

На правах рукописи

Андреев Дмитрий Владимирович

ЗАРЯДОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ
МДП-СТРУКТУР И ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ
ПРИ СИЛЬНОПОЛЕВОЙ ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Столяров Александр Алексеевич

Официальные оппоненты: **Шерченков Алексей Анатольевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
университет «Московский институт электронной
техники», профессор кафедры
«Материалы функциональной электроники»

Литвинов Владимир Георгиевич,
кандидат физико-математических 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 «15 » июня 2016 г. в 14 часов 30 минут на заседании
диссертационного совета Д 212.141.17, созданного на базе ФГБОУ ВПО
«Московский государственный технический университет имени
Н.Э. Баумана» 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 « » 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Лоскутов С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Легирование пленки подзатворного диэлектрика на основе термического SiO_2 фосфором может применяться для стабилизации характеристик приборов. Плёнка фосфорно-силикатного стекла (ФСС) может возникать также при использовании затворов из поликристаллического кремния, легированных фосфором. Наличие плёнки ФСС существенно влияет на характер изменения зарядового состояния структур металлизированного диэлектрика-полупроводник (МДП) как при сильнополевой инжекции электронов в диэлектрик, так и при радиационном облучении. В последнее время подзатворный диэлектрик на основе пленки SiO_2 , пассивированной тонкой плёнкой ФСС, широко используется в полевых приборах на основе карбида кремния. Основной проблемой при создании диэлектрических пленок для полупроводниковых приборов на основе МДП-структур, позволяющих управлять параметрами приборов путем инжекционной и радиационной модификации после их изготовления, является создание требуемой оптимальной структуры диэлектрической пленки, обеспечивающей эффективный захват носителей заряда на ловушки и обладающей высокой инжекционной и радиационной стойкостью и низкой зарядовой дефектностью. Всё это обуславливает необходимость комплексного и всестороннего исследования процесса легирования плёнки SiO_2 фосфором и самой структуры SiO_2 -ФСС с целью оптимизации параметров диэлектрической пленки, необходимой для повышения стабильности и надежности МДП-приборов. В современной микро- и наноэлектронике при изготовлении МДП-структур наряду с пленками SiO_2 широко используется диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью (так называемые high-k диэлектрики: Al_2O_3 ($\epsilon \approx 10$), HfO_2 ($\epsilon \approx 25$) и др.). При этом high-k диэлектрики часто применяются совместно с пленками SiO_2 .

В ячейке традиционной NAND флэш-памяти межзатворный диэлектрик (InterPoly Dielectric – IPD) и управляющий затвор «обёрнуты» вокруг плавающего затвора с целью обеспечения коэффициента связи выше 60 %. Однако, такое «обёртывание» требует достаточного пространства между плавающими затворами соседних ячеек флэш-памяти для того, чтобы уместить толщину управляющего затвора и двойную толщину IPD в один питч (величина, равная половине от расстояния между соседними ячейками флэш-памяти). Когда размеры ячейки приближаются к столь малым, что управляющий затвор не может быть более «обёрнут» вокруг плавающего затвора вследствие слишком малого значения питча, то происходит некоторое уменьшение коэффициента связи, что приводит к ухудшению характеристик программирования и стеканию части заряда через межзатворный диэлектрик. Для того, чтобы перейти к меньшим размерам флэш-памяти (с проектными нормами 20 нм и ниже), при формировании планарной структуры плавающего затвора необходимо использовать стек high-k диэлектриков в качестве межзатворного изолятора. Такая структура памяти может быть реализована за счёт использования гибридного плавающего затвора со структурой поликремний/метал (poly-Si/metal), что

позволяет уменьшить его толщину, снизить влияние соседних ячеек флэш-памяти друг на друга, увеличить ширину окна программирования. Однако, при всех вышеуказанных преимуществах, высокая плотность электронных ловушек в high-k межзатворном диэлектрике остается важной проблемой в функционировании флэш-памяти, т.к. процессы их заряжения/разряжения могут являться причиной нестабильности ширины окна программирования/стирания информации, приводить к сокращению времени хранения информации. Таким образом, исследование природы электронных ловушек в high-k межзатворном диэлектрике, изучение процессов накопления на них отрицательного заряда при сильнополевой инжекции электронов и последующее его хранение является важной научной и практической задачей.

Цель работы: установление 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.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать метод контроля электрофизических характеристик тонких диэлектрических пленок МДП-структур, позволяющий контролировать параметры накапливаемого в подзатворном диэлектрике заряда в режиме сильнополевой инжекции электронов;
- провести исследование возможности модификации МДП-структур с пленкой SiO₂-ФСС путём сильнополевой туннельной инжекции электронов в подзатворный диэлектрик и облучения электронами;
- исследовать влияние режимов легирования пленки SiO₂ фосфором на характеристики МДП-структур;
- выполнить исследование возможности использования МДП-структур на основе диэлектрических пленок на основе оксида и алюмината гафния для элементов флэш-памяти;
- исследовать энергетическое распределение электронов в запрещенной зоне межзатворных диэлектриков на основе оксида гафния и алюмината гафния в элементах энергонезависимой памяти с гибридным плавающим затвором.

Научная новизна

1. 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.

2. Впервые показано, что применение подзатворного диэлектрика на основе пленки SiO₂, легированной фосфором с образованием двухслойного стека SiO₂-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.

3. Установлено, что 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, может использоваться для модификации МДП-приборов, при этом использование сильнополевой инжекции электронов позволяет получить большие плотности отрицательного заряда при меньших деградационных процессах.

4. Впервые с использованием метода всеобъемлющей спектроскопии фотопустощением получены энергетические распределения электронов, захватываемых в МДП-структуратах на основе диэлектрических пленок $\text{SiO}_2\text{-Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$ и в межзатворных диэлектриках на основе оксида гафния и трёхслойного стека $\text{Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$ в элементах флэш-памяти с Si/TiN_x и Si/Ru гибридными плавающими затворами, что позволило получить новую информацию о природе зарядовых ловушек в указанных диэлектрических пленках.

Практическая значимость работы

1. Разработан 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.

2. Показано, что при высоких плотностях инжекционного тока контроль характеристик накапливаемого в подзатворном диэлектрике МДП-структуры заряда методом стрессовых и измерительных уровней тока необходимо проводить по изменению напряжения при амплитуде измерительного инжекционного тока много меньшей амплитуды стрессового тока.

3. Найдены энергетические распределения электронов, захватываемых в МДП-структуратах на основе диэлектрических пленок $\text{SiO}_2\text{-Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$ и $\text{SiO}_2\text{-HfO}_2$, а также в межзатворных диэлектриках на основе алюмината гафния и трёхслойного стека $\text{Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$ в элементах флэш-памяти с Si/TiN_x и Si/Ru гибридными плавающими затворами.

4. Проанализированы различные способы формирования high-k диэлектриков на основе оксида гафния и их влияние на плотность и энергетическое распределение электронных ловушек в диэлектрической пленке.

5. Показано, что применение сильнополевой инжекции электронов для модификации зарядового состояния МДП-структур предпочтительнее использования электронного облучения, поскольку появляется возможность индивидуальной коррекции характеристик каждого прибора и при определенных режимах сильнополевой инжекции можно значительно снизить сопутствующие деградационные процессы.

6. Предложены рекомендации по совершенствованию технологического процесса формирования подзатворного диэлектрика КМДП интегральных

микросхем на АО «Восход» – Калужский радиоламповый завод и АО «ОКБ Микроэлектроники» (г. Калуга).

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

– 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 при высоких плотностях стрессового инжекционного тока 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;

– результаты исследования модификации МДП-структур с двухслойным подзатворным диэлектриком SiO_2 -ФСС, находящихся в условиях как сильнополевой туннельной инжекции электронов, так и при электронном облучении, направленную на корректировку зарядового состояния диэлектрической пленки;

– 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 с концентрацией фосфора 0,4–0,9 %, позволяющего залечивать слабые места в подзатворном диэлектрике за счет накопления в ФСС при сильнополевой инжекции электронов отрицательного заряда, приводящего к увеличению потенциального барьера в месте дефекта и, как следствие, к уменьшению локальных токов;

– результаты исследования энергетических распределений электронов, захватываемых в МДП-структурах на основе диэлектрических пленок $\text{SiO}_2\text{-Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$ и $\text{SiO}_2\text{-HfO}_2$, а также в межзатворных диэлектриках на основе алюмината гафния и трёхслойного стека $\text{Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$ в элементах флэш-памяти с Si/TiN_x и Si/Ru гибридными плавающими затворами.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях, семинарах и симпозиумах: Весенних конференциях Европейского общества по исследованию материалов E-MRS 2014, E-MRS 2015 (Лилль, Франция, 2014, 2015); XII и XIII Международных конференциях "Физика диэлектриков" (Санкт-Петербург, 2011 г., 2014 г.); 41, 42, 44, 45 Международных Тулиновских конференциях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, МГУ, 2011 г., 2012 г., 2014 г., 2015 г.); 21-25 Международных конференциях "Радиационная физика твёрдого тела". (Севастополь, 2011 - 2015 гг.); I и III - VIII Всероссийских школах-семинарах студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноматериалы» и «Диагностика наноматериалов и наноструктур» (Рязань, 2008, 2010 – 2015 гг.); I - IV Всероссийских школах-семинарах студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноинженерия» (Москва, Калуга, 2008, 2009, 2010, 2011); Международной научно-технической

конференция «Нанотехнологии функциональных материалов» (Санкт-Петербург, 2010); 1 и 2 Всероссийских школах-семинарах студентов, аспирантов и молодых ученых по тематическому направлению деятельности национальной нанотехнологической сети "Функциональные наноматериалы для космической техники" (Москва, 2010 г., 2011 г.); Всероссийских научно-технических конференциях «Наукоемкие технологии в приboro- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе» (Калуга, 2008 - 2015 гг.); 13 Европейском вакуумном конгрессе EVC13 (Аveйру, Португалия, 2014 г.); 9 Международной конференции «Новые электрические и электронные технологии и их промышленное применение» NEET 2015 (Закопане, Польша, 2015).

Личный вклад автора: разработан метод стрессовых и измерительных уровней тока для исследования и модификации тонких диэлектрических пленок МДП-структур; проведены исследования МДП-структур с двухслойным подзатворным диэлектриком SiO_2 -ФСС как в процессе сильнополевой туннельной инжекции электронов, так и при электронном облучении; предложен способ повышения средней величины заряда, инжектированного в диэлектрик до его пробоя, и уменьшения количества дефектных структур; выполнены аналитические и экспериментальные исследования энергетических распределений электронов, захватываемых в МДП-структурах на основе диэлектрических пленок $\text{SiO}_2\text{-Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$ и $\text{SiO}_2\text{-HfO}_2$, а также в межзатворных диэлектриках на основе алюмината гафния и трёхслойного стека $\text{Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$; проведена интерпретация экспериментальных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 35 работ, из которых 9 – 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 158 страниц, включая 50 рисунков. Список литературы содержит 130 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 и проанализированы: механизмы возникновения инжекционного тока в сильных электрических полях; зарядовые явления, протекающие в тонких диэлектрических пленках МДП-структур при инжекции электронов; влияние диффузионного легирования пленки SiO_2 фосфором на электрофизические характеристики стека SiO_2 -ФСС; особенности зарядовых явлений, возникающих в high-k диэлектриках и стеках SiO_2 -high-k диэлектрик; роль межзатворного диэлектрика в элементах энергонезависимой памяти с гибридным плавающим затвором; электрофизические и фотоэлектрические методы исследования зарядовых явлений в тонких диэлектрических пленках и на границах раздела МДП-структур.

Во второй главе описан разработанный в диссертационной работе 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 в инжекционном режиме. Описан метод всеобъемлющей спектроскопии фотоопустошением. Описаны установки для реализации методов стрессовых и измерительных уровней тока и всеобъемлющей спектроскопии фотоопустошением.

Предложен новый метод стрессовых и измерительных уровней тока. В отличие от стандартных методов исследования подзатворного диэлектрика, таких как метод постоянного тока и метод возрастающего тока (J-Ramp), в разработанном методе к МДП-структуре прикладывается ток, изменяемый по специальному алгоритму, а характеристики диэлектрика контролируются по анализу временной зависимости напряжения, падающего на образце. При этом учитываются процессы заряда и разряда емкости МДП-структуры, а также захвата заряда в подзатворном диэлектрике. Учет процессов заряда емкости МДП-структуры и захвата заряда в подзатворном диэлектрике МДП-структур в инжекционном режиме дает возможность существенно повысить метрологические характеристики метода и уменьшить погрешности, возникающие при определении характеристик МДП-структур.

Разработана модель, описывающая изменение зарядового состояния МДП-структур как в режиме заряда емкости, так и в режиме инжекции носителей заряда. Использование этой модели позволяет выбрать оптимальный алгоритм токового воздействия и повысить точность измерений. В основе разработанной модели лежит следующая система уравнений:

– уравнение нейтральности заряда:

$$Q_0(t) = Q_C(t) + Q_{\text{inj}}(t) + Q_t(t); \quad (1)$$

– уравнение для заряда, обусловленного приложением к МДП-структуре многоуровневой токовой нагрузки:

$$Q_0(t) = \int_0^t i_0(t) dt = \sum_{j=1}^n I_{0j} \cdot \Delta t_j; \quad (2)$$

– уравнение заряда емкости МДП-структуры:

$$Q_C(t) = C(t)V_I(t); \quad (3)$$

– уравнение для заряда, инжектированного в диэлектрик:

$$Q_{\text{inj}}(t) = \int_0^t i_{\text{inj}}(t) dt; \quad (4)$$

– уравнение для инжекционного тока Фаулера-Нордгейма:

$$i_{\text{inj}}^{\text{FN}}(t) = AS_g \frac{V_I^2(t)}{d_{\text{ox}}^2} \exp\left[-B \frac{d_{\text{ox}}}{V_I(t)}\right], \quad (5)$$

где $Q_t(t)$ – заряд, захватываемый на ловушках в окисле; I_{0j} – амплитуда прикладываемого к МДП-структуре тока на j -ом участке; Δt_j – длительность

j -ого участка; $C(t)$ – временная зависимость емкости МДП-структурь (в режиме аккумуляции $C(t) = C_{\text{ox}}$); $V_1(t)$ – временная зависимость напряжения, падающего на МДП-структуре; S_g – площадь затвора МДП-структурь; d_{ox} – толщина подзатворного диэлектрика; t – время; $A = 1,54 \cdot 10^{-6} \cdot m_0 / m^* \cdot \phi_b^{-1}$ [А/В²] и $B = 6,83 \cdot 10^7 \cdot m_0 / m^* \cdot \phi_b^{3/2}$ [В/см] – постоянные туннельной инжеции; m_0 и m^* – масса электрона в вакууме и эффективная масса электрона в диэлектрике соответственно; ϕ_b – высота потенциального барьера на инжектирующей границе раздела.

Для изучения процессов изменения зарядового состояния МДП-структур при сильнополевой инжеции электронов предлагается использовать алгоритм испытаний, показанный на Рис. 1. На Рис. 1 представлены временные зависимости токовой нагрузки (а) и напряжения на МДП-структуре (б). В этом алгоритме используются два уровня токового воздействия: I_s , соответствующий стрессовому режиму, при котором изучается изменение зарядового состояния МДП-структурь, и I_m , соответствующий измерительному режиму, при котором не наблюдается заметных изменений зарядового состояния подзатворного диэлектрика (обычно $I_m \ll I_s$). Использование противоположной полярности токовых воздействий в измерительном режиме, т.е. $-I_m$, дает возможность определить плотность, сечение захвата зарядовых ловушек и положение центроида заряда в диэлектрике. Инжецию заряда в подзатворный диэлектрик в стрессовом режиме предлагается проводить частями (участки 3, 7, 11). После инжеции каждой части заряда токовая нагрузка переключается в режимы I_m и $-I_m$, что позволяет измерить изменение напряжения на МДП-структуре как при положительной, так и при отрицательной полярности затвора при измерительной амплитуде инжеционного тока.

При больших плотностях инжеционного тока возрастает скорость изменения зарядового состояния подзатворного диэлектрика при выходе МДП-структурь на режим инжеции, соответствующий заданному стрессовому току I_s , в результате чего при установлении стационарного инжеционного режима в подзатворном диэлектрике может произойти накопление некоторой части заряда. Вследствие этого временная зависимость $V_s(t)$ на участке 3 (Рис. 1) не учитывает этот заряд, что может приводить к существенным погрешностям при оценке изменения зарядового состояния МДП-структур.

Измерение изменения напряжения на МДП-структуре при токе I_m позволяет учесть заряд, накапливаемый в подзатворном диэлектрике при выходе МДП-структурь на режим инжеции, соответствующий стрессовому току и, тем самым, значительно снизить погрешность, присущую методу постоянного тока. Предложенный способ получения С-В и И-В характеристик в рамках одного метода позволяет контролировать параметры зарядовой деградации сразу после туннельной инжеции, снизив влияние релаксационных процессов.

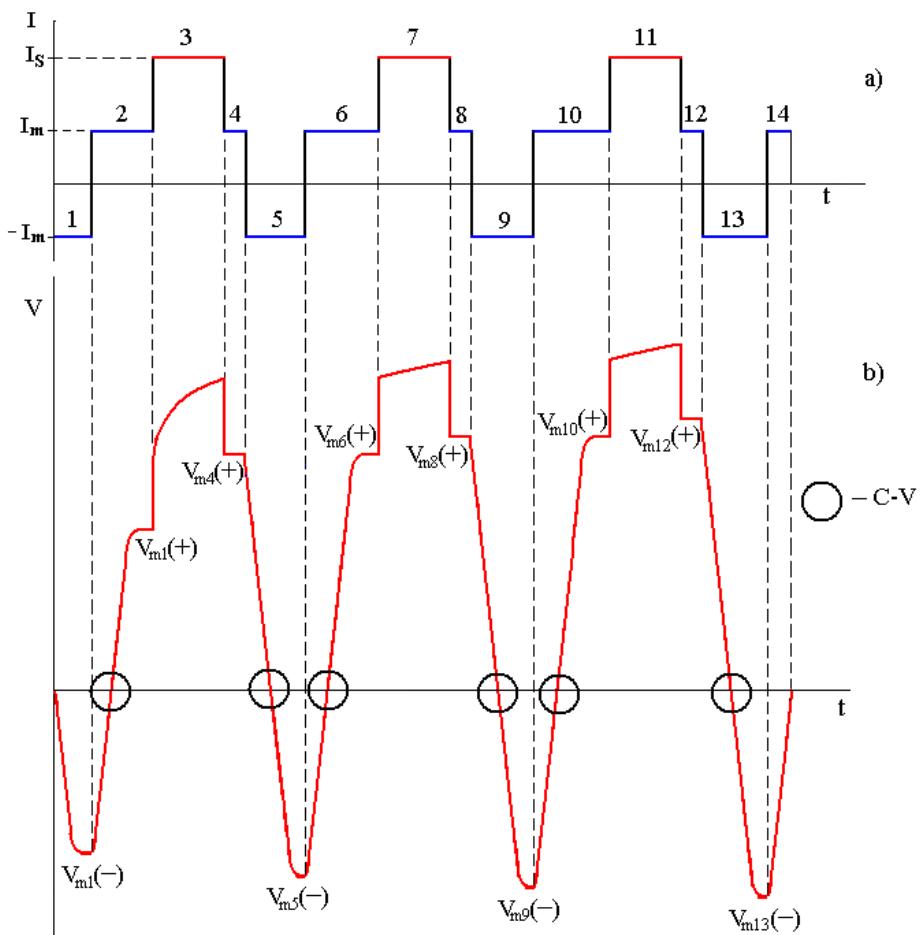


Рис. 1. Временные зависимости токовой нагрузки (а) и напряжения, измеренного на МДП-структуре (б)

Для исследования зарядовых ловушек и их энергетического распределения в МДП-структурах и в межзатворных диэлектриках в элементах флэш-памяти использовался метод всеобъемлющей спектроскопии фотоопустошением (Exhaustive PhotoDepopulation Spectroscopy – EPDS). Метод всеобъемлющей спектроскопии фотоопустошением позволяет достичь насыщения процесса освобождения электронов из диэлектрической пленки за счёт её облучения при данной энергии фотона $h\nu$ и вычислить соответствующее изменение зарядового состояния диэлектрика посредством измерения величины сдвига вольт-фарадной или вольт-амперной характеристик образца, а из полученного изменения зарядового состояния вычислить спектральную плотность заряда. Насыщение процесса освобождения с ловушек означает, что практически все носители заряда, доступные для фотовозбуждения при данной величине энергии фотона $h\nu$ высвобождены, т.е. нет электронов, оставшихся на энергетических состояниях, лежащих на глубине $E_t < h\nu$. Начиная с малого значения энергии $h\nu$ и затем увеличивая его на небольшое значение $\Delta h\nu$ (шаг), освобождение будет приходить к насыщению, т.е. полному удалению носителей заряда с ловушек в соответствующем интервале энергий $\{h\nu; h\nu + \Delta h\nu\}$. Затем, после облучения фотонами из всего заданного дискретного энергетического спектра, становится возможным найти распределение электронных ловушек

как функцию E_t по всей запрещённой зоне диэлектрика. Важно то, что в отличие от методики измерения фототока, наблюдение за зарядом позволяет определять его знак, тем самым разделяя переход возбуждённого электрона из валентной зоны диэлектрика на пустой дефектный уровень и переход электрона из запрещённой зоны диэлектрика в зону проводимости. По энергии начала активного освобождения с ловушек, полученной спектроскопией фотопустошением, можно определить, откуда происходит высвобождение основной части заряда – с ловушек в МДП диэлектрике или с плавающего затвора для случая ячейки флэш-памяти.

Для реализации метода стрессовых и измерительных уровней тока была разработана автоматизированная установка инжекционного контроля диэлектрических пленок.

Разработанный метод стрессовых и измерительных уровней тока используется в производственном процессе на АО «Восход» - Калужский радиоламповый завод и АО «Микроэлектроники» и применяется для контроля параметров подзатворного диэлектрика КМДП интегральных микросхем.

В третьей главе представлены результаты комплексного исследования зарядовых явлений в МДП-структурках с термическими пленками SiO_2 , легированными фосфором, при сильнополевой инжекции электронов и облучении низкоэнергетическими электронами.

Рассмотрена возможность модификации МДП-структур с пленкой SiO_2 -ФСС путём сильнополевой туннельной инжекции электронов в подзатворный диэлектрик и облучения структур низкоэнергетическими электронами, а также проведено исследование влияния режимов сильнополевой инжекционной обработки на характеристики МДП-структур.

В качестве экспериментальных образцов использовались тестовые МДП-конденсаторы, изготовленные на кремнии n-типа. Слой диоксид кремния толщиной $7 \div 50$ нм получали термическим окислением кремния в атмосфере кислорода при температуре $850 \div 1000$ °C. Пленку ФСС толщиной $3 \div 15$ нм формировали диффузией фосфора из газовой фазы путем пиролиза смеси $\text{POCl}_3\text{-O}_2$ при температуре 900 °C. С целью получения экспериментальных образцов с различной толщиной ФСС варьировалось время загонки фосфора в пределах от 1,5 до 6 минут. В качестве затвора использовались пленки поликремния (Si^*), легированные фосфором, а также пленки алюминия, имеющие площадь $10^{-4} \div 10^{-2}$ см².

Для инжекционной модификации МДП-структур использовалась сильнополевая туннельная инжекция электронов из кремниевой подложки в режиме протекания постоянного инжекционного тока плотностью от 0,1 мА/см² до 10 мА/см². В процессе инжекции осуществлялся контроль напряжения на МДП-структуре, что позволяло получать информацию об изменении зарядового состояния диэлектрической пленки непосредственно в процессе модификации. Для определения величины термостабильной компоненты накопленного в диэлектрике отрицательного заряда, после инжекционных и радиационных обработок МДП-структуры подвергались отжигу при температурах

150 ÷ 250 °C в течение времени от 5 до 30 мин. Изменение зарядового состояния МДП-структур контролировалось с использованием С-В метода и метода стрессовых и измерительных уровней тока. Для изучения влияния воздействия электронного облучения на характеристики МДП-структур использовался растровый электронный микроскоп EVO 40 фирмы Zeiss.

На Рис. 2 приведены зависимости приращения напряжения на МДП-структуре в процессе инжекционной (1) и радиационной (2) модификации от плотности инжектированного заряда и флюенса электронов (с энергией 18 кэВ). При облучении низкоэнергетическом электронами изменение зарядового состояния МДП-структур в основном обусловлено протеканием ионизационных процессов и наблюдаемые физические процессы во многом идентичны явлениям, возникающим при сильнополевой инжекции электронов. На Рис. 2 плотность инжектированных электронов определяется как $N = Q_{\text{inj}} / q$, где Q_{inj} – заряд, инжектированный в диэлектрик; q – заряд электрона. Как видно из Рис. 2, при облучении электронами в подзатворном диэлектрике накапливается более низкая плотность отрицательного заряда по сравнению со случаем использования сильнополевой инжекции.

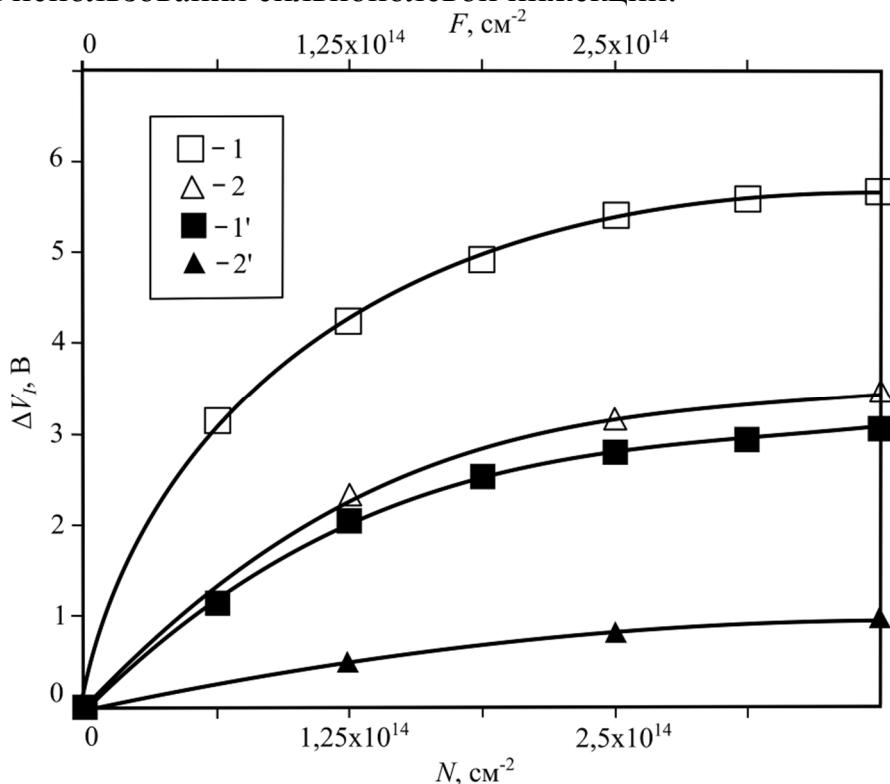


Рис. 2. Зависимости приращения напряжения на МДП-структуре в процессе сильнополевой инжекции электронов (1) и электронного облучения с энергией 18 кэВ (2), а также после отжига обработанных образцов при 200 °C (1', 2') от плотности инжектированных электронов (N) (1, 1') и флюенса электронов (F) при облучении (2, 2')

Накопление в объеме подзатворного диэлектрика заданной плотности термостабильной компоненты отрицательного заряда позволяет корректировать пороговое напряжение МДП-транзисторов, а также повышать пробивное

напряжение подзатворного диэлектрика и уменьшать вероятность его пробоя путем залечивания дефектов («слабых мест») за счет накопления в них отрицательного заряда. На Рис. 3 представлены гистограммы распределения МДП-структур по заряду, инжектированному в диэлектрик до его пробоя в режиме протекания постоянного тока, для образцов, имеющих подзатворный диэлектрик SiO_2 (1), и образцов с двухслойным подзатворным диэлектриком $\text{SiO}_2\text{-ФСС}$ (2, 3). Как видно из Рис. 3, применение двухслойного подзатворного диэлектрика $\text{SiO}_2\text{-ФСС}$ с концентрацией фосфора в пленке ФСС 0,4–0,9 % позволяет повысить среднюю величину заряда, инжектированного в диэлектрик до его пробоя и уменьшить количество дефектных структур с малым значением заряда, инжектированного до пробоя. Этот эффект объясняется залечиванием «слабых мест» в подзатворном диэлектрике за счет накопления в них отрицательного заряда и, как следствие, уменьшением величины локальных инжекционных токов, протекающих в местах дефектов и приводящих к его пробою. В результате захвата инжектированных электронов увеличивается потенциальный барьер, препятствующий локализации токов в областях дефектов в диэлектрической пленке.

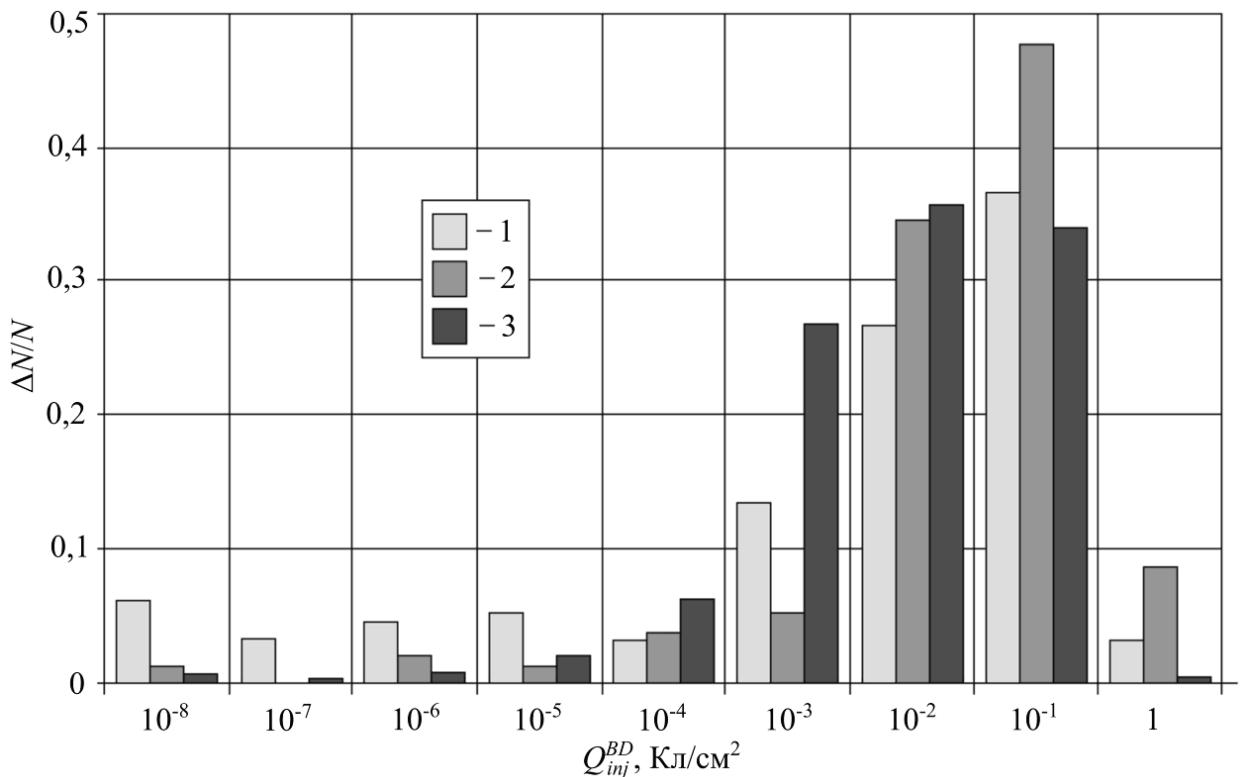


Рис. 3. Гистограммы распределения МДП-структур по заряду, инжектированному в диэлектрик до его пробоя, для образцов с подзатворным диэлектриком SiO_2 (1) и образцов с двухслойным подзатворным диэлектриком $\text{SiO}_2\text{-ФСС}$ (2, 3), имеющих пленку ФСС различной толщины: 2 – 9 нм; 3 – 22 нм

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

В четвертой главе приведены результаты исследования зарядовых явлений в тонких диэлектрических пленках элементов энергонезависимой памяти, сформированных на основе high-k диэлектриков (HfO_2 , $\text{Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$, диэлектрического стека $\text{Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$).

Исследование МДП-структур на основе диэлектрических пленок $\text{SiO}_2\text{-Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$ показало, что энергетическое распределение электронов, захватываемых в $\text{Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$, лежит в диапазоне 1,5 ÷ 3,5 эВ и, следовательно, на основе таких структур могут создаваться элементы флэш-памяти.

На Рис. 4 приведены энергетические распределения зарядов, захваченных в элементах энергонезависимой флэш-памяти со структурой $p\text{-Si/SiO}_2/\text{Si/TiN}_x/\text{Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x/\text{TiN}_x$ (с гибридным плавающим затвором Si/TiN_x) в результате проведения инжекции электронов из полупроводниковой подложки при напряжении на затворе $V_g = 12$ В, полученные в результате применения метода всеобъемлющей спектроскопии фотоопустошением. Из результатов, показанных на Рис. 4, можно сделать вывод, что как для образцов флэш-памяти, отожжённых в атмосфере N_2 в течение 5 минут при 800 °C, так и для образцов, по отношению к которым отжиг не применялся, фотоопустошение электронов начинается с энергии, равной приблизительно 2,8 эВ и находится в активной фазе вплоть до 4,3 эВ.

Очевидно, что этот энергетический диапазон шириной 1,5 эВ (начиная с 2,8 эВ) отличается от соответствующего при проведении фотоопустошения с ловушек, локализованных в межзатворном диэлектрике $\text{Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$. Исходя из этого, можно заключить, что основная часть инжектируемых электронов захватывается на гибридный плавающий затвор, в то время как число электронов, захватываемых на ловушки в межзатворном диэлектрике, незначительно. Таким образом, можно сказать, что энергетическое распределение электронов в стеке $\text{Si/TiN}_x/\text{Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$ существенно более глубокое по сравнению с энергетическим распределением электронов в образцах без гибридного плавающего затвора, а центр распределения имеет значение примерно 3 эВ (Рис. 4, б). Необходимо также отметить, что энергия начала фотоопустошения, равная ~2,8 эВ, совпадает с высотой потенциального барьера на границе $\text{TiN}_x/\text{Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$, из чего можно сделать вывод, что электроны выбрасываются именно из гибридного плавающего затвора Si/TiN_x .

Схожие энергетические распределения электронов наблюдаются после электронной инжекции, выполненной при больших амплитудах импульса напряжения записи ($V_g > 12$ В). Таким образом, используя указанные межзатворные диэлектрики совместно с Si/TiN_x в качестве гибридного плавающего затвора, можно улучшить характеристики ячеек памяти.

Таким образом, проведено сравнение энергетических распределений электронов, захваченных в диэлектрике $\text{Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$, используемом в качестве межзатворного диэлектрика, и распределений электронов, захваченных в элементах флэш-памяти, содержащих либо Si/TiN_x , либо Si/Ru гибридный плавающий затвор. Факт того, что захват электронов в структурах с гибридным пла-

вающим затвором происходит на плавающем затворе, показывает возможность использования этой концепции ячеек памяти для создания ячеек с размерами менее 20 нм. Однако, не удалось выявить существенной разницы в пороговой энергии фотоионизации между образцами с Si/TiN_x и Si/Ru гибридными плавающими затворами: и для тех, и для других, энергия начала высвобождения электронов составляет $\sim 2,8$ эВ. Эта энергия сопоставима с величиной энергетического барьера между уровнем Ферми металла в гибридном плавающем затворе и дном зоны проводимости Hf_{0.8}Al_{0.2}O_x, из чего можно заключить, что эффективное значение энергии работы выхода рутения на границе с Hf_{0.8}Al_{0.2}O_x остаётся недостаточно высоким и близко к соответствующему значению для TiN_x.

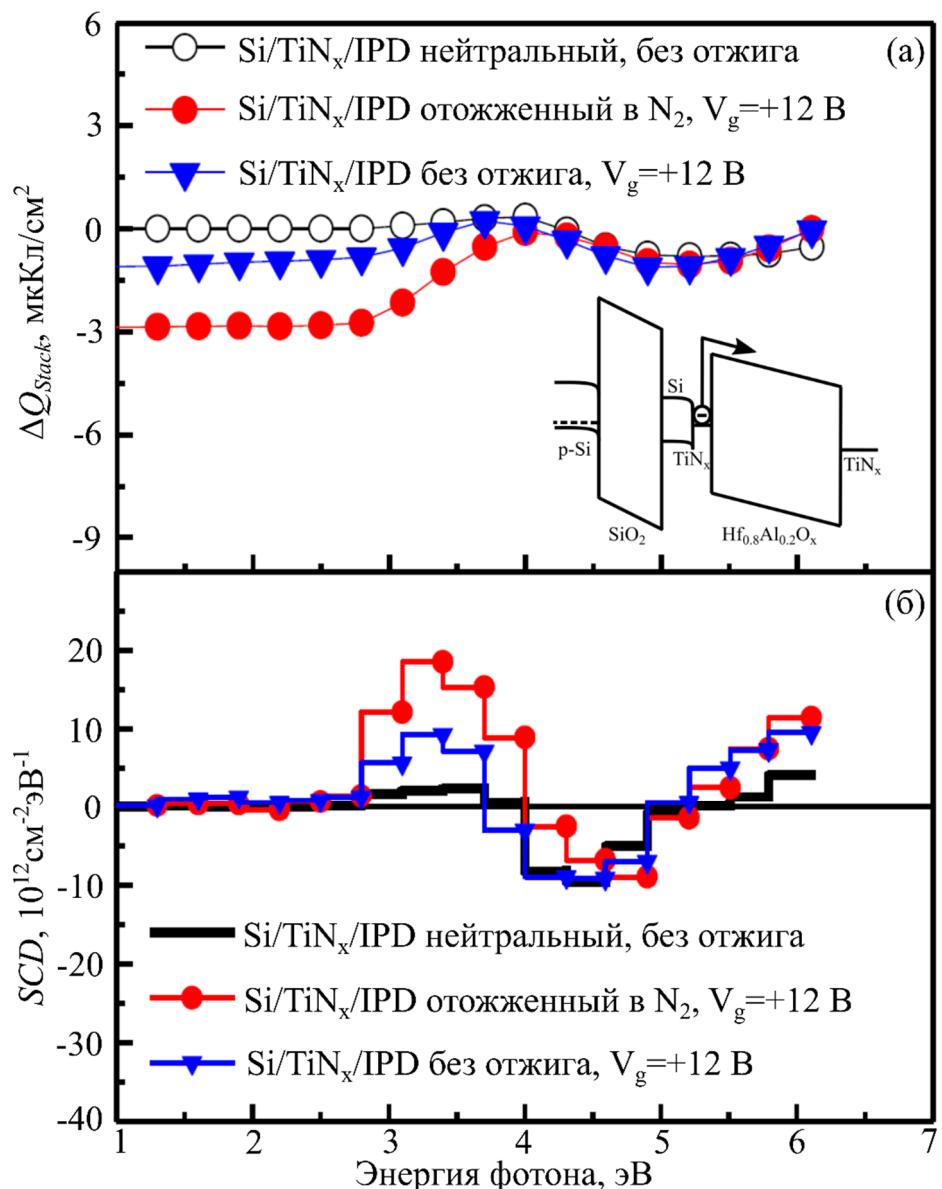


Рис. 4. Вызванные воздействием света изменения зарядового состояния (а) и полученные из них распределения спектральной плотности заряда (б) как для образцов p-Si/SiO₂/Si/TiN_x/Hf_{0.8}Al_{0.2}O_x/TiN_x, подвергавшихся отжигу в атмосфере N₂ при температуре 800 °C в течение 5 минут (●), так и для неотожженных образцов (▼)

В заключении обобщены результаты проделанной работы.

В приложении приведены акты об использовании результатов диссертационной работы на предприятиях АО «Восход» – Калужский радиоламповый завод и АО «ОКБ Микроэлектроники» (г. Калуга).

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Предложен новый метод стрессовых и измерительных уровней тока для исследования и модификации тонких диэлектрических пленок МДП-структур. Отличительной особенностью этого метода является учет процессов заряда емкости МДП-структур и захвата заряда в подзатворном диэлектрике МДП-структур в инжекционном режиме, что дает возможность существенно повысить метрологические характеристики метода и уменьшить погрешности, возникающие при определении характеристик МДП-структур. 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.

2. Показано, что при высоких плотностях инжекционного тока контроль характеристик накапливаемого в подзатворном диэлектрике заряда методом стрессовых и измерительных уровней тока необходимо проводить по изменению напряжения на МДП-структуре, контролируемого при измерительной амплитуде инжекционного тока много меньшей амплитуды стрессового тока.

3. Установлено, что отрицательный заряд, накапливающийся в плёнке ФСС в структурах с двухслойным подзатворным диэлектриком $\text{SiO}_2\text{-ФСС}$ как в процессе сильнополевой туннельной инжекции электронов, так и при электронном облучении, может использоваться для модификации МДП-приборов. Показано, что применение сильнополевой инжекции электронов для модификации зарядового состояния МДП-структур предпочтительнее использования электронного облучения, поскольку появляется возможность индивидуальной коррекции характеристик каждого прибора и при определенных режимах сильнополевой инжекции можно значительно снизить сопутствующие деградационные процессы.

4. Показано, что применение двухслойного подзатворного диэлектрика $\text{SiO}_2\text{-ФСС}$ с концентрацией фосфора в пленке ФСС 0,4–0,9 % позволяет повысить среднюю величину заряда, инжектированного в диэлектрик до его пробоя и уменьшить количество дефектных структур с малым значением заряда, инжектированного до пробоя. Этот эффект объясняется залечиванием «слабых мест» в подзатворном диэлектрике за счет накопления в нем отрицательного заряда и, как следствие, повышения барьера и уменьшения величины локальных инжекционных токов.

5. Исследование МДП-структур на основе диэлектрических пленок $\text{SiO}_2\text{-Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$ показало, что энергетическое распределение электронов, захватываемых в $\text{Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$, лежит в диапазоне 1,5 ÷ 3,5 эВ и, следовательно, на основе таких структур могут создаваться элементы флэш-памяти.

6. Анализ энергетического распределения электронов в межзатворном

диэлектрике на основе алюмината гафния в элементах энергонезависимой памяти с Si/TiN_x и Si/Ru гибридными плавающими затворами позволил определить, что оба типа образцов имеют близкую энергию фотоионизации, равную ~2,8 эВ. Эта энергия сопоставима с величиной энергетического барьера между уровнем Ферми металла в гибридном плавающем затворе (TiN_x или Ru) и дном зоны проводимости Hf_{0,8}Al_{0,2}O_x.

7. Проанализированы различные способы формирования high-k диэлектриков на основе оксида гафния и их влияние на плотность и энергетические распределение электронных ловушек в диэлектрической пленке.

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

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Моделирование воздействия ионизирующих излучений на МДП-структуры с наноразмерными диэлектрическими пленками / Д.В. Андреев [и др.] // Физика и химия обработки материалов. 2011. № 5. С. 18–25. (0,55 п.л. / 0,14 п.л.).

2. 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 21.03.2016) (0,55 п.л. / 0,18 п.л.).

3. A touch sensor based on a tensoresistive polymer / D.V. Andreev [et al.] // High Temperature Material Processes. 2014. Vol. 18. Issue 1–2. P. 63–69. (0,48 п.л. / 0,12 п.л.).

4. 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. (0,48 п.л. / 0,16 п.л.).

5. Modification and Reduction of Defects in Thin Gate Dielectric of MIS Devices by Injection-Thermal and Irradiation Treatments / D.V. Andreev [et al.] // Phys. Stat. Sol. C. 2015. Vol. 12. No. 1–2. P. 126–130. (0,5 п.л. / 0,1 п.л.).

6. Control current stress technique for the investigation of gate dielectrics of MIS devices / D.V. Andreev [et al.] // Phys. Stat. Sol. C. 2015. Vol. 12. No. 3. P. 299–303. (0,5 п.л. / 0,1 п.л.).

7. Electron energy distribution in Si/TiN and Si/Ru hybrid floating gates with hafnium oxide based insulators for charge trapping memory devices / D.V. Andreev [et al.] // Phys. Stat. Sol. A. 2016. Vol. 213. No. 2. P. 265–269. (0,5 п.л. / 0,07 п.л.).

8. 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. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.).

9. Modification of thin oxide films of MOS structure by high-field injection

and irradiation / D.V. Andreev [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 110. P. 012041 (1–6). (0,6 п.л. / 0,15 п.л.).

10. Андреев Д.В., Столяров А.А. Сильнополевая инжекционная модификация МДП-структур с термической пленкой SiO_2 , легированной фосфором // Физика диэлектриков (Диэлектрики – 2014): Материалы XIII Международной конференции. Санкт-Петербург. 2014. Т. 2. С. 210–213. (0,27 п.л. / 0,14 п.л.).

11. Control current stress technique for the investigation of ultrathin gate dielectrics of MIS devices / D.V. Andreev [et al.] // E-MRS 2014 Spring meeting, Symposium H: Abstracts. Lille (France). 2014. Р. HP6 8. (0,06 п.л. / 0,01 п.л.).

12. Андреев Д.В., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А. Модификация МДП-структур сильнополевой инжекцией электронов и электронным облучением // Радиационная физика твёрдого тела: Труды 25 Международной конференции. Москва. 2015. С. 242–252. (0,75 п.л. / 0,25 п.л.).

13. Андреев Д.В., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А. Модификация МДП-структур электронным облучением и сильнополевой инжекцией электронов // Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: Тезисы докладов 45 Международной конференции. Москва. 2015. С. 121. (0,06 п.л. / 0,02 п.л.).

14. Андреев Д.В. Моделирование транспорта электронов в тонких диэлектрических пленках МДП-структур // Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы конференции. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. Т. 1. С. 139–142. (0,27 п.л.).

15. Electron energy distribution in Si/TiN and Si/Ru hybrid floating gates with hafnium oxide based insulators for charge trapping memory devices D.V. Andreev [et al.] // E-MRS 2015 Spring meeting, Symposium AA: Abstracts. Lille (France). 2015. Р. AA-AA.II.2. (0,06 п.л. / 0,01 п.л.).

16. Андреев Д.В. Модификация наноразмерных диэлектриков МДП-структур сильнополевой инжекцией электронов и электронным облучением // Труды VIII Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых учёных по направлению «Диагностика наноматериалов иnanoструктур»: Сборник трудов. Рязань: РГРТУ. 2015. Т. III. С. 35–39. (0,34 п.л.).

17. Андреев Д.В. Моделирование стекания заряда в элементах энергонезависимой памяти на основе МДП-структур // Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы конференции. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. Т. 1. С. 152–155. (0,27 п.л.).

Андреев Дмитрий Владимирович

ЗАРЯДОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ
МДП-СТРУКТУР И ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ
ПРИ СИЛЬНОПОЛЕВОЙ ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 11.04.2016 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