

«УТВЕРЖДАЮ»

Руководитель Лаборатории Космического материаловедения ИК РАН – филиала Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук»,  
д.ф.-м.н. Стрелов В.И.  
«30» мая 2016 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Андреева Дмитрия Владимировича «Зарядовые явления в диэлектрических пленках МДП-структур и элементов энергонезависимой памяти при сильнополевой инжекции электронов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

**Актуальность темы работы.** Диоксид кремния на сегодняшний день является основным диэлектрическим материалом современной кремниевой микро- и нанoeлектроники. Он широко используется в полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах со структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Однако при уменьшении линейных размеров полевых транзисторов, изготавливаемых по МДП технологии, приходится уменьшать толщины пленок оксида кремния, и при проектных нормах 65 нм и ниже пленки диоксида кремния становятся туннельно-прозрачными, приводя к значительному возрастанию токов утечки. Следовательно, развитие современной микро- и нанoeлектроники требует использования других альтернативных диэлектрических материалов, например, диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемо-

стью (high-k диэлектрики), обеспечивающих ту же величину электрической емкости при больших толщинах пленки, а также поиск новых методов модификации пленок диоксида кремния с целью улучшения их электрофизических характеристик и управления их параметрами.

Одним из способов модификации пленок диоксида кремния является ее легирование фосфором с целью получения стека (многослойный диэлектрик) диоксид кремния - фосфорно-силикатного стекло ( $\text{SiO}_2$ -ФСС). Использование двухслойного диэлектрика  $\text{SiO}_2$ -ФСС позволяет улучшить зарядовые, надежные и другие характеристики образца. Для исследования характеристик таких диэлектрических пленок, а также для коррекции параметров МДП-приборов на их основе, в частности, используются сильнополевые инжекционные воздействия, а также радиационные облучения. Помимо использования high-k диэлектрических пленок в полевых транзисторах, они также применяются, например, в приборах энергонезависимой полупроводниковой памяти с плавающим затвором в тех случаях, когда проектные нормы становятся приблизительно равными 65 нм и меньше. Таким образом, диссертационная работа Андреева Д.В. посвящена важной и актуальной проблеме современной микро- и наноэлектроники.

**Во введении** обоснованы актуальность и цели исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту. Показана научная новизна полученных результатов и их практическая значимость.

**Первая глава** диссертационной работы посвящена рассмотрению возможных механизмов транспорта носителей заряда в тонких диэлектрических плёнках МДП-структур и сопровождающих их зарядовых явлений. Рассмотрены механизмы захвата носителей заряда в МДП-структурах. Рассмотрены наиболее распространенные модели захвата носителей заряда, а также часто встречающиеся виды зарядовых ловушек.

Рассмотрены зарядовые явления в high-k диэлектриках на примере двухслойного диэлектрика  $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$ , показана важность рассмотрения зарядовых эффектов в пленке high-k диэлектрика в совокупности со слоем диоксида

кремния. Рассмотрены особенности применения high-k диэлектриков, отражена возможная природа зарядовых дефектов в high-k диэлектриках.

Рассмотрены зарядовые явления в диэлектрических пленках элементов энергонезависимой NAND флэш-памяти и их надёжность, в частности рассмотрены особенности зарядовых эффектов применительно к NAND флэш-памяти с проектными нормами 20 нм и меньше.

Приведены методы исследований зарядовых явлений в тонких диэлектрических пленках МДП-структур, такие, как метод возрастающего напряжения (V-Ramp), возрастающего тока (J-Ramp), постоянного тока (Bounded J-Ramp), постоянного напряжения, метод внутренней фотоэмиссии (IPE), метод фото-инжекции, метод C-V характеристик, метод управляемой токовой нагрузки. В конце даны выводы по проведенному в главе анализу.

**Вторая глава** посвящена рассмотрению и подробному описанию используемых в диссертационной работе методов исследования и модификации тонких диэлектрических пленок МДП-структур и элементов энергонезависимой памяти, таких как метод стрессовых и измерительных уровней тока для исследования тонких подзатворных диэлектриков МДП-структур; метод всеобъемлющей спектроскопии фотоопустошением, позволяющий исследовать образцы энергонезависимой памяти на основе МДП-структур с проектными нормами 20 нм и менее; метод сильнополевой инжекционной модификации тонких диэлектрических пленок МДП-структур. Приведена математическая модель, описывающая протекание зарядовых явлений в диэлектрических пленках МДП-структур, находящихся в условиях сильнополевой инжекции электронов, позволяющая, в частности, улучшить эффективность использования вышеуказанных методов исследования. Также приведены экспериментальные установки для реализации методов исследования и модификации тонких диэлектрических пленок МДП-структур и элементов энергонезависимой памяти. В конце главы даны выводы. Необходимо отметить, что как сам метод стрессовых и измерительных уровней тока, так и установка, его реализующая, являются новыми и ранее не освещались в каких-либо диссертаци-

онных работах. Новый метод всеобъемлющей спектроскопии фотоопустошением предложен в лаборатории физики полупроводников Лёвенского Католического университета, где соискатель проходил стажировку и занимался, в частности, апробацией и совершенствованием этого метода.

**Третья глава** посвящена рассмотрению возможности модификации МДП-структур с пленкой  $\text{SiO}_2$ , легированной фосфором, путём сильнополевой туннельной инжекции электронов в подзатворный диэлектрик и облучения структур низкоэнергетическими электронами, а также проведено исследование влияния режимов легирования пленки  $\text{SiO}_2$  фосфором на характеристики МДП-структур и изменения их параметров при модификации. Проведено исследование и моделирование воздействия ионизирующих излучений на МДП-структуры с наноразмерными диэлектрическими пленками. Проведено исследование процессов генерации и эволюции зарядов, накапливаемых в диэлектрических пленках МДП-структур в процессе сильнополевой туннельной инжекции электронов. Методом стрессовых и измерительных уровней тока выполнено исследование процессов накопления отрицательного заряда в МДП-структурах с подзатворным диэлектриком  $\text{SiO}_2$ -ФСС в условиях сильнополевой инжекции электронов. Проведено сравнение модификации МДП-структур инжекционным воздействием и радиационным облучением. Сделаны выводы об их достоинствах и недостатках.

**Четвертая глава** посвящена исследованию зарядовых явлений в тонких диэлектрических пленках элементов энергонезависимой памяти. При помощи метода всеобъемлющей спектроскопии и метода стрессовых и измерительных уровней тока проведен анализ энергетического распределения исходных электронных ловушек в диэлектриках  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$ , полученных посредством атомно-слоевого осаждения. В результате были получены новые сведения о зарядовых ловушках как в диэлектрической пленке  $\text{HfO}_2$ , так и  $\text{Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$ , что, несомненно, является одним из ключевых результатов диссертационной работы. Также было проведено исследование МДП-структур с тремя различными видами  $\text{HfO}_2$ , отличающихся, прежде всего, технологией

получения. Выполнено исследование энергетического распределения электронов в элементах флэш-памяти на основе МДП-структур с диэлектрической пленкой  $\text{SiO}_2\text{-Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$ , а также диэлектрическими стеками. Получено, что такие диэлектрические пленки обладают требуемыми характеристиками и на их основе могут быть построены стабильные по электрическим характеристикам, долговечные приборы энергонезависимой флэш-памяти. Проведен анализ энергетического распределения электронов в элементах флэш-памяти на основе  $\text{Si/TiN}_x$  и  $\text{Si/Ru}$  гибридных плавающих затворов и имеющих межзатворный диэлектрик на основе оксида гафния. По полученным результатам сделан вывод, что использование рутения в гибридном плавающем затворе не дает ожидаемого улучшения надежностных характеристик по сравнению с нитридом титана.

Новизна работы, прежде всего, определяется основными полученными результатами и выводами, в полной мере отражающими ключевые достижения работы: разработка метода стрессовых и измерительных уровней тока для исследования и модификации тонких диэлектрических пленок МДП-структур, обладающего более высокими метрологическими характеристиками по сравнению с традиционно используемыми методами, а также особенностей применения метода; создание модели, описывающей изменение зарядового состояния МДП-структур как в режиме заряда емкости, так и в режиме инжекции носителей заряда, что дает возможность выбирать оптимальный алгоритм токового воздействия и повышать точность измерений; установление возможности использования накапливаемого в результате инжекционного воздействия отрицательного заряда в пленке ФСС МДП-структуры с диэлектриком  $\text{SiO}_2\text{-ФСС}$  для модификации МДП-приборов с соответствующей структурой; установление при помощи анализа энергетического спектра захваченного в диэлектрической пленке и на плавающем затворе вследствие инжекционного воздействия заряда факта возможности использования МДП-структур на основе диэлектрических пленок  $\text{SiO}_2\text{-Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$  для создания приборов флэш-памяти; отсутствие ожидаемой зна-

чительной разницы в надежностных характеристиках флэш-памяти при использовании рутения в гибридном плавающем затворе Si/Ru вместо  $TiN_x$ ; анализ различных способов формирования high-k диэлектриков на основе оксида гафния и их влияние на плотность и энергетическое распределение электронных ловушек в диэлектрической пленке.

Все защищаемые положения диссертации сформулированы на основании полученных диссертантом **новых заключений**.

**Значимость** выводов и заключений диссертационной работы определяется возможностью их использования как в прикладных (практических) областях, так и для фундаментальных исследований. Несомненно, что 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, о чем свидетельствуют акты внедрения результатов диссертационной работы на предприятиях АО «Восход» – Калужский радиоламповый завод и АО «ОКБ Микроэлектроники». 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.

**Достоверность** диссертационной работы обусловлена аккуратным сравнением результатов, получаемых при использовании новых методов, с результатами, полученными с использованием существующих и хорошо апробированных методик. Достоверность экспериментальных данных также подтверждается результатами моделирования, как собственными, так и литературными. Диссертацию характеризует обоснованное и последовательное развитие собственных идей диссертанта.

Несмотря на отмеченный высокий уровень выполнения работы, по диссертации необходимо упомянуть ряд **недостатков и замечаний**:

– не проведено совместного исследования процессов изменения зарядового состояния подзатворного диэлектрика при сильнополевой инжекции электронов и радиационном облучении МДП-структур со структурными изменениями диэлектрика и границы раздела диэлектрик-полупроводник;

– в модели, описывающей изменение зарядового состояния МДП-структур с термической плёнкой  $\text{SiO}_2$ , легированной фосфором, при сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик и радиационном облучении, не учитывается движение и перераспределение водорода в подзатворном диэлектрике, которое в ряде случаев может оказывать существенное влияние на зарядовые эффекты;

– не везде указывается объем выборки при проведении экспериментальных исследований;

– в тексте диссертации встречаются незначительные стилистические ошибки.

Полученные автором результаты достоверны, выводы и защищаемые положения обоснованы. Диссертация логично построена и аккуратно оформлена. По каждой из глав даны четкие выводы.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертационной работы. Результаты работы **апробированы** на Международных и Всероссийских конференциях. Опубликовано 9 работ в рецензируемых журналах. Все это указывает на то, что работа выполнена на высоком научном уровне.

**Заключение.** Из всего вышесказанного можно заключить, что диссертация Андреева Дмитрия Владимировича «Зарядовые явления в диэлектрических пленках МДП-структур и элементов энергонезависимой памяти при сильнополевой инжекции электронов» полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, и соответствует требованиям раздела II «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 21.04.2016 N 335), а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степе-

ни кандидата технических наук по специальности 01.04.07 – «физика конденсированного состояния».

Доклад Д.В. Андреева заслушан, обсужден на научном семинаре ЛКМ ИК РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. «19» мая 2016 г. Протокол № 7-16.

Николай Николаевич Михеев,  
к.ф.-м.н. (специальность 01.04.10),  
зав. лабораторией  
структурных исследований

Почтовый адрес: 248640, г. Калуга, ул. Академическая, 8.

Телефон: +7 (4842) 76-26-67.

Адрес электронной почты: kmikran@spark-mail.ru.

Организация – место работы: Лаборатория Космического материаловедения ИК РАН – филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук».