На правах рукописи

Васютин Денис Сергеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАРЯДОВЫХ ДЕФЕКТОВ В СТРУКТУРАХ МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИК В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОПОЛЕВОЙ ТУННЕЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2012

Диссертация 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: доктор технических наук Стрельченко Станислав Сергеевич

кандидат физико-математических наук, Михеев Николай Николаевич

Ведущая организация ФГБНУ «Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий»

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1997141
Васютин Д.С.Исследование з

Защита состоится «27» июня 2012 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.17 при ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» по адресу:
248600, Калуга, ул. Баженова, д. 2.
Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана.

-142

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

Автореферат разослан « » мая 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета
кандидат технических наук, доцент Лоскутов С.А.

2408

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Основу современной микроэлектронной индустрии составляют кремниевые металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) технологии, доминирующие в цифровой технике и находящие все более широкое применение в аналоговой и микросистемной технике. Значительное число отказов полупроводниковых приборов и интегральных схем приходится на диэлектрические слои. Особое значение качество диэлектрических слоев имеет для полевых приборов и интегральных схем на основе структур металл-диэлектрик-полупроводник. Выявление потенциально ненадежных структур всегда имело важное значение для МДП-ИМС аппаратуры специального назначения. Остро данная проблема встала в настоящее время, когда производство ИМС характеризуется большой номенклатурой, малыми партиями, ограниченными сроками разработки и освоения производства. Обеспечение высокого качества изделий микроэлектроники в таких условиях предполагает разработку эффективных методов контроля качества и выявления потенциально ненадежных ИМС, позволяющих оценивать на ранних стадиях технологического процесса такие характеристики подзатворных диэлектрических слоев, как инжекционная стойкость, качество границы полупроводник-диэлектрик, плотность зарядовых дефектов, радиационную стойкость и др.

Особой чувствительностью к электрически активным дефектам обладают методы, использующие радиационные, термополевые, инжекционные воздействия. Одним из таких методов является сильнополевая туннельная инжекция электронов по Фаулеру-Нордгейму в подзатворный диэлектрик. В целом деградационные процессы в МДП-структурах в критических условиях изучены достаточно подробно. Разработаны методы определения параметров и характеристик МДП-структур в условиях сильнополевой туннельной инжекции. Однако они в большинстве своем не адаптированы к условиям производства интегральных схем. Определены механизмы и процессы накопления зарядов в диэлектрических слоях, изучена их кинетика. Однако широкому использованию данных методов препятствует недостаточная изученность процессов, протекающих в областях дефектов и локальных неоднородностей в критических условиях. Это связано с малыми размерами дефектов, невозможностью непосредственного изучения электрофизичеких процессов в областях локальных неоднородностей, что предполагает применение косвенных методов, и вызывает необходимость разработки новых подходов и методов исследования.

Поэтому актуальной задачей является разработка инжекционных методов оценки качества диэлектрических слоев и выявления потенциально нена-

дежных интегральных схем, основанных на исследованиях зарядовых дефектов в МДП-структурах в условиях сильных электрических полей.

Цель работы: установление физических механизмов накопления зарядов, особенностей переноса заряда и распределения полей в областях зарядовых дефектов, влияния их характеристик на устойчивость диэлектрических слоев к воздействию токополевых перегрузок при испытаниях и в процессе эксплуатации, а также разработка комплексного инжекционного метода контроля дефектности изоляции и зарядовой дефектности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- сформировать систему параметров для оперативного контроля качества технологического процесса получения подзатворного диэлектрика МДП-ИМС;
- разработать модель накопления зарядов в МДП-структуре, содержащей зарядовые дефекты разных видов в режимах заряда емкости структуры и инжекции электронов в диэлектрик постоянным током;
- исследовать влияние характеристик зарядовых дефектов на изменение вольт-амперной характеристики (ВАХ) МДП-структур;
- на основе физического моделирования процессов накопления зарядов в зарядовых дефектах МДП-структур установить изменение их характеристик в условиях сильных электрических полей и инжекции носителей в различных электрических режимах, с последующим использованием результатов моделирования для разработки методик производственного контроля и прогнозирования их инжекционной и радиационной стойкости;
- исследовать влияние зарядовых дефектов на инжекционную стойкость диэлектрических слоев, изготовленных по разным технологиям;
- разработать производственный комплексный инжекционный метод контроля дефектности изоляции и зарядовой дефектности диэлектрических слоев МДП-структур.

Научная новизна.

1. Разработана модель МДП-структуры с зарядовыми дефектами в условиях заряда емкости структуры и инжекции электронов постоянным током, позволяющая исследовать влияние электрофизических параметров зарядовых дефектов на ВАХ МДП-структуры.

2. На основе проведенного моделирования исследованы зависимости ВАХ МДП-структур с зарядовыми дефектами от плотности положительного заряда в диэлектрике, высоты потенциального барьера и толщины диэлектрической пленки в локальных областях зарядовых дефектов и проведена оценка параметров зарядовых дефектов структур, попадающих в главный пик гистограммы распределения МДП-структур по напряжению микропробоя.

3. С использованием модели зарядового состояния МДП-структур с зарядовыми дефектами при сильнополевой туннельной инжекции электронов из кремния, учитывающие неравномерное протекание инжекционного тока,

проведены исследования электронных процессов в локальных областях зарядовых дефектов различной природы в условиях сильнополевой туннельной инжекции.

4. Выполнены исследования влияния зарядовых дефектов на инжекционную стойкость диэлектрических слоев МДП-структур с термической пленкой SiO_2.

Практическая значимость работы.

1. Разработан инжекционный метод оценки качества диэлектрических слоев МДП-структур на ранних стадиях технологических процессов, основанный на анализе временной зависимости напряжения на структуре при подаче на нее импульсов постоянного тока, и аппаратура для его реализации в производственных условиях.

2. Разработана система параметров, характеризующих качество диэлектрических слоев МДП-структур в условиях производства МДП-ИС.

3. Предложены алгоритмы инжекционных воздействий и методики обработки результатов измерений, позволяющие характеризовать как дефекты изоляции, так и дефекты зарядовой стабильности.

4. Проведена апробация разработанных методик при аттестации технологических процессов получения диэлектрических слоев изделий микроэлектроники.

5. Предложены рекомендации по совершенствованию технологического процесса формирования подзатворного диэлектрика МДП-транзисторов серии 2П7146 на ЗАО «ВЗПП-Микрон» (г. Воронеж) и ОКБ «МЭЛ» (г. Калуга).

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

- результаты исследования влияния электрофизических параметров зарядовых дефектов на ВАХ диэлектрических слоев МДП-структур с термической пленкой SiO_2 и характера и степени изменения зарядового состояния и токовой нагрузки зарядовых дефектов в условиях сильнополевой инжекции;
- производственный комплексный инжекционный метод контроля дефектности изоляции и зарядовой дефектности диэлектрических слоев МДП-структур, на ранних стадиях технологического процесса, основанный на анализе временной зависимости напряжения на структуре при подаче на нее импульсов постоянного тока, позволивший осуществить единый подход к исследованию дефектности изоляции и зарядовой стабильности;
- результаты применения инжекционного метода оценки качества диэлектрических пленок для контроля зарядовой дефектности и стабильности МДП-структур в условиях производства МДП-приборов.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях, семинарах и симпозиумах: Межвузовской научной школе молодых специалистов «Кон-

центрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» (Москва, 2009 г., 2010 г.), Региональных научно-технических конференциях "Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе" (Калуга, 2007 г., 2008 г., 2009 г., 2010 г., 2011 г.), International conference "Physics of electronic materials" (Kaluga, 2008 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе» (Калуга, 2005 - 2011 гг.), 18-20 Международном совещании "Радиационная физика твёрдого тела". (Севастополь, 2008 г., 2009 г., 2010 г.), I - IV Всероссийских школах-семинарах студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноинженерия» (Москва, Калуга, 2008, 2009, 2010, 2011), I и III Всероссийских школах-семинарах студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноматериалы» (Рязань, 2008, 2010), 1-й Всероссийской школа-семинаре студентов, аспирантов и молодых ученых по тематическому направлению деятельности национальной нанотехнологической сети "Функциональные наноматериалы для космической техники" (Москва, 2010), Международной научно-технической конференция «Нанотехнологии функциональных материалов» (Санкт-Петербург, 2010), 41 Международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, МГУ, 2011).

Личный вклад автора: разработан инжекционный метод оценки качества диэлектрических слоев МДП-структур и аппаратура для его реализации в производственных условиях; разработана модель МДП-структуры с зарядовыми дефектами в условиях заряда емкости структуры и инжекции электронов постоянным током, позволяющая исследовать влияние электрофизических параметров зарядовых дефектов на ВАХ МДП-структуры; выполнены все аналитические и экспериментальные исследования характеристик зарядовых дефектов в подзатворном диэлектрике МДП-структур; проведена интерпретация экспериментальных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ, из которых 2 – 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 140 страниц, включая 28 рисунков и 1 таблицу. Список литературы содержит 154 наименования.

Часть исследований проведена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы ГК №16.740.11.0151 и П470, а также при финансовой поддержке РФФИ и администрации Калужской области (грант № 12-02-97533).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проведенный анализ известных методов исследования и контроля МДП-структур в условиях сильнополевой туннельной инжекции показал, что они обладают недостаточной информативностью, не позволяющей комплексно характеризовать дефектность диэлектрических слоев.

Для реализации в условиях промышленного производства МДП-ИМС предложенного единого подхода к исследованию дефектов изоляции и зарядовых дефектов необходимо решить следующие задачи:

- исследовать влияние режимов испытаний на результаты контроля;
- исследовать процессы переноса и накопления зарядов в зарядовых дефектах;
- разработать систему параметров комплексно характеризующих дефектность диэлектрических слоев;
- определить методы измерения отдельных параметров;
- разработать методы применения аппаратных средств и методики контроля;
- выработать рекомендации к их применению.

Во второй главе на основе обобщения опыта оценки качества диэлектрических слоев при изготовлении партий специализированных интегральных схем и полупроводниковых приборов сформирована система параметров для оперативного контроля качества технологического процесса получения подзатворного диэлектрика МДП-ИМС и проведен выбор методов их определения.

Показано, что применение инжекционного метода и системы параметров при контроле качества технологического процесса получения подзатворного диэлектрика позволяет контролировать устойчивость диэлектрика к инжекции носителей, комплексно оценивать характеристики дефектности изоляции и зарядовой стабильности на основе единого подхода к их изучению, контролировать характеристики заряда диэлектрической пленки и параметры границы раздела.

Проведенный выбор методов определения параметров, характеризующих качество диэлектрических слоев МДП-структур, дает возможность реализовать комплексный метод контроля, позволяющий оценивать в рамках одного метода дефектность изоляции, зарядовую дефектность, характеристики центров захвата носителей.

Разработан алгоритм инжекции заряда в диэлектрик и измерения параметров (рис. 1), входящих в систему параметров оперативного контроля качества технологического процесса получения подзатворного диэлектрика МДП-ИМС.

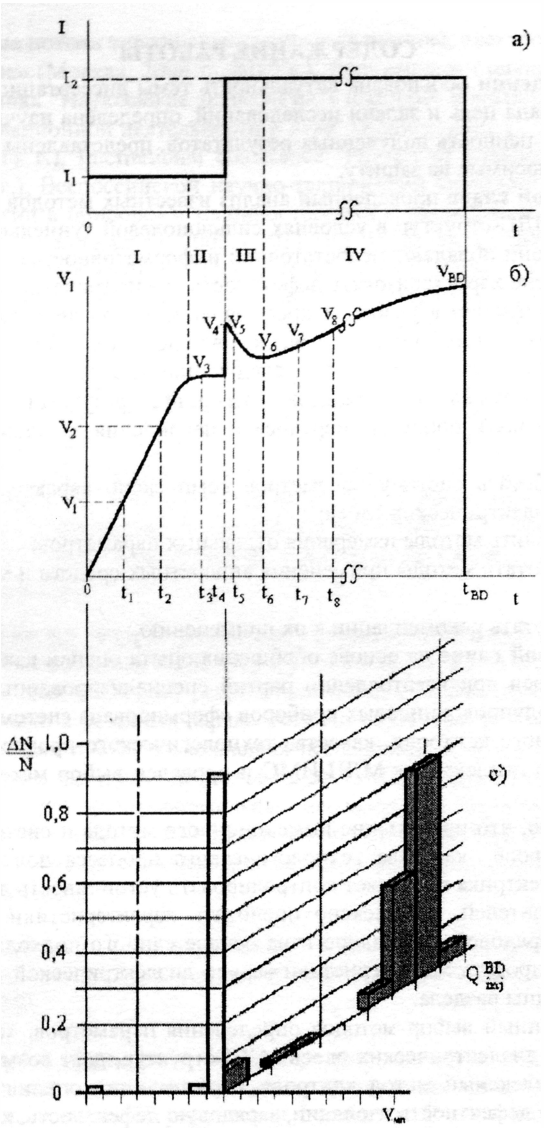


Рис. 1. Временные зависимости токовой нагрузки (а) и напряжения на МДП-структуре (б), а также совмещенные гистограммы распределения МДП-структур по напряжению микропробоя $V_{мп}$ и заряду, инжектированному до пробоя Q_{inj}^{BD} (с)

Предложена наглядная форма представления результатов контроля дефектности изоляции и зарядовой стабильности в виде совмещенных гистограмм распределений МДП-структур по напряжению микропробоя $V_{мп}$ и заряду, инжектированному до пробоя Q_{inj}^{BD} (рис. 1, с).

На участке I МДП-структура заряжается постоянным током. На этом участке ток, протекающий через МДП-структуру, является чисто емкостным и емкость МДП-структуры будет обратно пропорциональна скорости изменения напряжения на МДП-структуре. На участке I определяется толщина диэлектрической пленки.

На участке II емкость МДП-структуры полностью заряжена. Ток, протекающий через МДП-структуру, является током инжекции равным измерительному току I_1. На участке II измеряется напряжение микропробоя $V_{МП}= V_3$, когда напряжение на МДП-структуре перестает изменяться и производная напряжения по времени стремится к нулю.

Затем в момент времени t_4 на МДП-структуру подается стрессовый уровень тока I_2 и инжектируется определенный заряд (на участке III происходит накопление положительного заряда) и проводится определение скорости накопления положительного заряда. Для определения скорости накопления положительного заряда измеряются напряжения в моменты t_4 и t_5, соответственно V_4 и V_5. Скорость накопления положительного заряда определяется по формуле:

$$\Delta Q_P/\Delta t = (\varepsilon\varepsilon_0/q)\,(V_5 - V_4)/(t_5 - t_4),$$

где ε - относительная диэлектрическая проницаемость подзатворного диэлектрика; ε_0 – электрическая постоянная; q – заряд электрона. На участке накопления отрицательного заряда (участок IV) - определяется скорость накопления отрицательного заряда:

$$\Delta Q_n/\Delta t = (\varepsilon\varepsilon_0/q)\,(V_7 - V_8)/(t_8 - t_7).$$

Максимальная плотность положительного заряда захваченная в диэлектрике может оцениваться по разности напряжений V_4 и $V_{min}=V_6$, где V_{min} минимальное напряжение на участках III и IV:

$$Q_{Pmax} = (\varepsilon\varepsilon_0/q)\,(V_4 - V_{min}).$$

В диэлектрический слой инжектируется заряд стрессовым током I_2 до момента пробоя МДП-структуры, в который определяется $Q_{BD}= I_{BD}(t_{BD}-t_4)$.

По значениям I_1, I_2, V_4 и V_5 можно оценить величину потенциального барьера на инжектирующей границе раздела. Используя выражение для плотности тока сильнополевой туннельной инжекции по Фаулеру-Нордгейму, можно получить:

$$\varphi_B \cong \sqrt[1,5]{\frac{(j_2/E_{C2}^2)-(j_1/E_{C1}^2)}{\left(\frac{4(2m^*)^{1/2}}{3\cdot q\cdot\hbar}\right)(1/E_{C2}-1/E_{C1})}},$$

где $E_{C1} = V_3/d_{ox}$ - напряженность электрического поля на катоде при плотности тока j_1; $E_{C2} = V_4/d_{ox}$ - напряженность электрического поля на катоде

при плотности тока j_2; m^* - эффективная масса электрона; $\hbar$ - приведенная постоянная Планка.

Для применения предложенной методики контроля дефектности диэлектрических слоев МДП-структур, реализующей единый подход к исследованию и контролю дефектов изоляции и зарядовых дефектов, требуется осуществить следующий порядок проведения измерений и испытаний при реализации комплексного метода контроля:

- выбираются измерительный и стрессовый уровни тока инжекции, исходя из площади МДП-структур, толщины диэлектрика, временных ограничений;
- измеряется временная зависимость изменения напряжения на МДП-структуре при измерительном и стрессовом токах инжекции;
- определяются времена измерения параметров: $t_1 \div t_{BD}$;
- проводятся измерения параметров на МДП-структурах;
- строятся совмещенные гистограммы распределения МДП-структур по напряжению микропробоя и заряду, инжектированному до пробоя рис. 1, гистограммы распределения структур, по $\Delta Q_P/\Delta t$, $\Delta Q_n/\Delta t$, Q_{Pmax};
- определяются количественные характеристики групп МДП-структур.

Кратко излагаются методы измерения и оценки параметров и характеристик. Рассмотрены экспериментальные установки, применяемые при исследовании зарядовых дефектов и определении параметров и характеристик исследуемых образцов. Для снижения влияния вибрации контактирующее устройство размещалось на экспериментальном образце системы активной защиты от вибрации, разработанном специалистами Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института кристаллографии им. А.В. Шубникова Российской академии наук (ИК РАН) в рамках выполнения проекта № 16.513.11.3093 от 26 июля 2011, работающей в диапазоне рабочих частот (0,2-300 Гц) и максимальным коэффициентом подавления колебаний 60 дБ.

В третьей главе приводятся результаты моделирования инжекционно-стимулированных процессов зарядовой нестабильности в зарядовых дефектах МДП-структур в условиях сильнополевой туннельной инжекции.

Применение инжекционных методов исследований и испытаний существенно сдерживается тем, что многие физические механизмы процессов деградации в условиях сильных электрических полей остаются до сих пор до конца невыясненными, а интерпретации экспериментальных данных носит противоречивый характер. Это не позволяет выработать научно-обоснованный подход к выбору параметров исследуемых структур и режимов испытаний.

Предложена модель зарядовой нестабильности МДП-структур с термической двуокисью кремния, содержащих зарядовые дефекты в условиях сильнополевой туннельной инжекции. В модели МДП-структура представлялась в виде суммы площадей областей зарядовых дефектов с аномальными характеристиками и бездефектной части структуры. В пределах каждой из

областей процессы зарядовой нестабильности описывались на основе следующих моделей.

При моделировании процессов зарядовой нестабильности при неравномерном распределении туннельного тока МДП-структура представлялась состоящей из i областей: бездефектной части структуры площадью S_1 и областей дефектов площадью S_2, S_3... S_n. В режиме постоянного тока на начальном участке инжекции ток, пропускаемый через МДП-структуру I_0, будет распределяться между током инжекции в бездефектной части структуры I_1, токами областей дефектов I_2 , I_3, .. I_n, и емкостным током:

$$I_0 = \sum_{i=1}^{n} I_i + C\,\frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^{n} j_i \cdot S_i + C\frac{dV}{dt}, \qquad (1)$$

где j_i – плотность тока в i области, C - емкость МДП-структуры в режиме аккумуляции; V - напряжение на структуре.

Поскольку рассматривались МДП-структуры, не содержащие грубых дефектов, оказывающих существенное влияние на вольт-амперную характеристику, напряжение микропробоя, которых находится в главном пике гистограммы распределения структур по напряжению микропробоя, то считалось, что и в бездефектной части структуры и в областях зарядовых дефектов с аномальными характеристиками осуществляется сильнополсвая туннельная инжекция по Фаулеру-Нордгейму.

Плотности захваченных в SiO_2 дырок определялись из решения методом Рунге-Кутта четвертого порядка дифференциального уравнения:

$$q\frac{dp_i}{dt} = j_i(m_i - 1)\cdot\sigma_{pi}(N_{pi} - p_i) - j_i\cdot\sigma_{ni}\cdot p_i, \qquad (2)$$

где p – плотность захваченных дырок; N_{Pi} - плотности дырочных ловушек; σ_{Pi} - сечения захвата дырочных ловушек; $\sigma_{ni} = 3\cdot10^{-13}\,E^{-3}$ см^2 - сечения захвата электронов положительно заряженными центрами, образовавшимися в результате захвата дырок на ловушки в двуокиси кремния вблизи границы раздела полупроводник-диэлектрик (E - напряженность электрического поля в диэлектрике МВ/см); $(m_i - 1)$ - коэффициенты генерации дырок.

Плотности электронов захваченных на ловушки в окисле:

$$n_{ti} = N_{ti}\left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_{ti}\cdot j_i\cdot t}{q}\right)\right], \qquad (3)$$

где N_{ti} - плотности первичных ловушек, σ_{ti} - сечения захвата.

Изменения зарядового состояния диэлектрика в дефектных и бездефектных частях МДП-структур описывались напряжениями сдвига ВАХ на участке туннельной инжекции:

$$\Delta V_{Ii} = \Delta V_{nti} - \Delta V_{Pi},$$

где ΔV_{nti} - напряжения сдвига ВАХ, обусловленные накоплением электронов на ловушках; ΔV_{Pi} - напряжения сдвига ВАХ, обусловленные накоплением положительного заряда.

Представленные модели зарядовой нестабильности МДП-систем с зарядовыми дефектами учитывают перераспределение тока между дефектной и бездефектной частями структуры и позволяют исследовать процессы накопления зарядов в диэлектрике зарядового дефекта как на начальном этапе инжекции при заряде емкости структуры, так и при длительной инжекции. Так как пробой подзатворного диэлектрика происходит в одном зарядовом дефекте, имеющем наиболее аномальные характеристики, то рассматривалось в основном изменение характеристик в этом дефекте.

На основе проведенного моделирования исследованы зависимости напряжения микропробоя от плотности положительного заряда в диэлектрике, высоты потенциального барьера и толщины диэлектрической пленки в локальных областях зарядовых дефектов и проведена оценка параметров зарядовых дефектов структур, попадающих в главный пик гистограммы распределения МДП-структур по напряжению микропробоя. Анализ полученных зависимостей изменений напряжений микропробоя от параметров зарядовых дефектов показывает, что существует определенный диапазон их изменений, в пределах которого зарядовые дефекты не могут быть зарегистрированы по результатам измерения напряжения микропробоя.

Проведена оценка характера и степени изменения зарядового состояния и токовой нагрузки зарядовых дефектов на начальном этапе инжекции, установлена зависимость интенсивности процессов накопления зарядов от соотношения площадей дефектной и бездефектной частей структуры и показана возможность локального увеличения токовой нагрузки в области зарядового дефекта.

Приведены результаты моделирования инжекционно-стимулированных процессов зарядовой нестабильности в условиях сильнополевой туннельной инжекции в зарядовых дефектах МДП-структур, связанных с наличием начального положительного заряда плотностью 10^{11}-10^{13} $см^{-2}$ с пониженным эффективным потенциальным барьером на границе раздела полупроводник-диэлектрик 2÷2,8 эВ, и меньшей эффективной толщиной диэлектрика 80÷100 нм, в режиме постоянного тока на начальном этапе инжекции заряда в диэлектрик для МДП-структуры находящейся в режиме аккумуляции.

В дефектах с эффективной толщиной диэлектрика 80÷90 нм на начальном этапе инжекции наблюдалось преимущественное накопление положительного заряда (рис. 2, кривые 1-4), а в дефектах с меньшим эффективным потенциальным барьером - отрицательного (рис. 2, кривые 5-9). Изменения приращения плотности приведенного заряда и токовые нагрузки дефектных областей увеличивались с уменьшением высоты эффективного потенциального барьера и толщины диэлектрика.

В дефектах с толщиной диэлектрика 90÷100 нм наблюдалась смена преимущественного накопления положительного заряда на накопление отрицательного заряда, характерное для бездефектной части структуры.

Токовые нагрузки и степень изменения зарядового состояния диэлектрика в дефектных областях возрастали с уменьшением высоты эффективного потенциального барьера, толщины диэлектрика, с увеличением отношения площади бездефектной части МДП-структуры к площади дефекта и с ростом плотности тока, пропускаемого через структуры.

Показано, что в областях дефектов с пониженным потенциальным барьером и меньшей толщиной диэлектрика происходит локальное увеличение плотности тока. Наибольшая токовая нагрузка наблюдалась на начальном этапе инжекции. Поэтому начальная стадия инжекции является наиболее опасной с точки зрения пробоя в области дефекта. Параметры областей дефектов МДП-структур: высота потенциально барьера 2 эВ и толщина 80 нм; являются критическими для плотностей токов 10^{-5} А/см^2, пропускаемых через МДП-структуры. В таких дефектах наблюдаются плотности тока и инжектированного заряда, способные вызвать необратимый пробой.

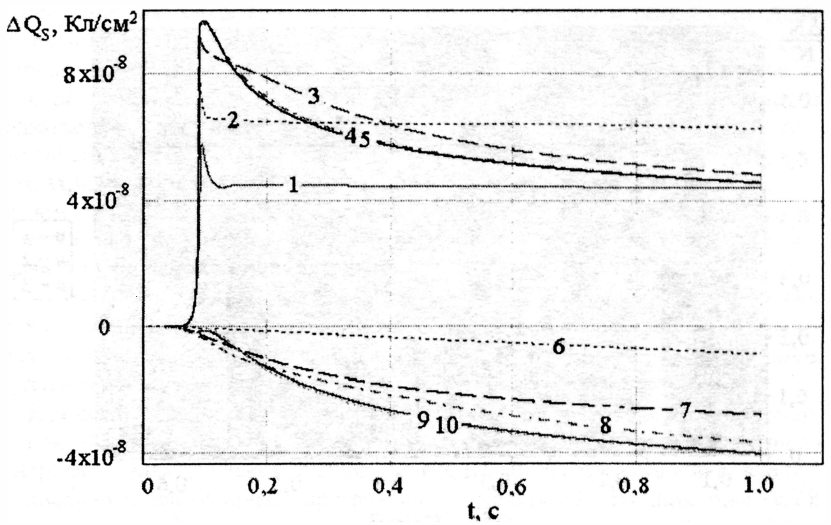


Рис. 2. Временные зависимости приращения плотности приведенного заряда в дефектной области с толщиной окисла 80 нм и высотой потенциального барьера 2,2 эВ при протекании тока $I_0 = 10^{-7}$: 1,2,3,4,5 - T_{ox2}=80 нм; 6,7,8,9,10 - φ_{B2} =2,2 эВ; при S_{MOS}/S_2: 1,6-10^3; 2,7-10^4; 3,8-10^5; 4,9-10^6; 5,10-10^8

Таким образом, установленные механизмы и разработанные модели деградации МДП-структур с зарядовыми дефектами позволяют сформулировать практические рекомендации для проведения ускоренных инжекционных испытаний с целью адекватного прогнозирования долговременной радиационной и инжекционной стойкости и надежности элементов МДП технологий.

В четвертой главе приведены результаты исследования зарядовой дефектности и стабильности МДП-структур и рассмотрены основные направления практического применения инжекционного метода оценки качества диэлектрических пленок в условиях промышленного производства МДП-приборов.

Установлено, что при контроле инжекционной стойкости МДП-структур инжекционным методом оценки качества диэлектрических пленок плотность инжекционного тока существенным образом влияет на вид и характер выявляемых дефектов зарядовой стабильности. Повышение плотности инжекционного тока, с одной стороны, увеличивает оперативность контроля, а с другой, приводит к ужесточению режимов испытаний и возрастанию количества структур, пробивающихся на начальном этапе инжекции, а также к уменьшению средней величины зарядов, инжектированных до пробоя. Гистограммы зарядов инжектированных в диэлектрик до его пробоя, для различных плотностей инжекционного тока приведены на рис. 3.

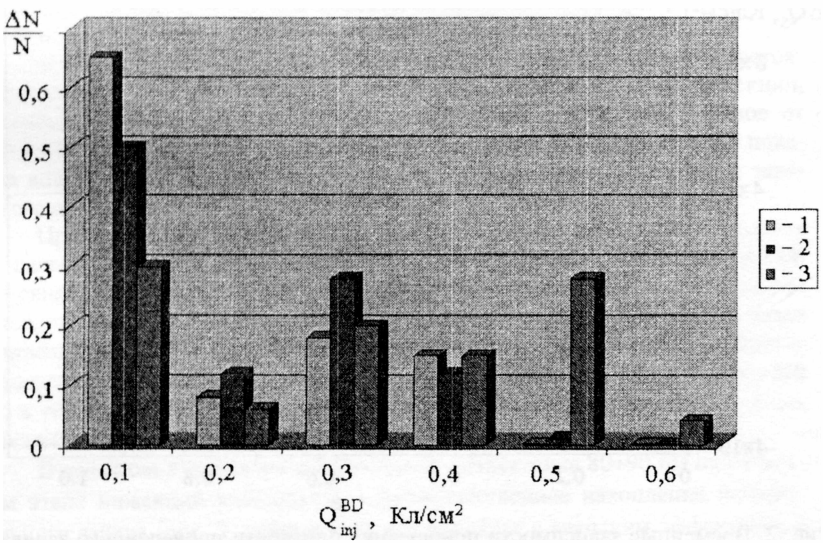


Рис. 3. Гистограммы распределения структур по заряду инжектированному в диэлектрик до его пробоя для различных плотностей инжекционного тока: 1 – 10 мА/см^2, 2 – 2 мА/см^2, 3 – 0,1 мА/см^2.

Показано, что при контроле инжекционной стойкости МДП-структур разработанным методом плотность инжекционного тока существенным образом влияет на вид и характер выявляемых дефектов зарядовой стабильности. Повышение плотности инжекционного тока, с одной стороны, увеличивает оперативность контроля, а с другой приводит к ужесточению режимов испы-

таний и возрастанию количества структур, пробивающихся на начальном этапе инжекции, а также к уменьшению средней величины зарядов, инжектированных до пробоя. Следовательно, для комплексного контроля зарядовой стабильности необходимо иметь несколько гистограмм распределения зарядов, инжектированных до пробоя, измеренных при различных плотностях постоянного инжекционного тока.

На основе анализа совмещенных гистограмм предложена классификация МДП-структур по степени дефектности изоляции и зарядовой стабильности и разработана методика сравнения качества диэлектрических слоев при стрессовых воздействиях.

С использованием метода управляемой токовой нагрузки проведена сравнительная оценка дефектности изоляции и зарядовой стабильности МДП-структур, изготовленных по различным технологиям. Установлено, что проведение окисления во влажной среде при пониженных температурах окисления позволяет получать диэлектрические слои с повышенной инжекционной и радиационной стойкостью. Получены статистические распределения параметров, характеризующих процессы генерации и релаксации положительного заряда по пластине для МДП-структур, изготовленных по различным технологическим процессам. Установлено, что скорость стекания положительного заряда незначительно зависит от технологии изготовления подзатворного диэлектрика. Отмечается, что подзатворный диэлектрик, выращенный в парах воды, характеризуется меньшей генерацией положительного заряда при инжекции заряда в сильных электрических полях и большим числом вновь созданных электронных ловушек. Эти данные хорошо согласуются с моделью перераспределения водорода в диэлектрике после сильнополевой туннельной инжекции.

Проведена сравнительная оценка зарядовой дефектности диэлектрических слоев МДП-структур, изготовленных по различным технологиям. Определены оптимальные характеристики технологического процесса формирования подзатворного диэлектрика МДП-транзисторов.

Для реализации инжекционного метода оценки качества диэлектрических пленок была разработана автоматизированная установка инжекционного контроля диэлектрических пленок АУИКДП. В состав установки входят: специально разработанный, программно управляемый источник тока (ИТ); автомат для разбраковки микросхем на полупроводниковой пластине (например, "Зонд М6020"); персональный компьютер типа IBM PC. АУИКДП имеет следующие основные технические характеристики: диапазон выходных токов 10^{-10} - 10^{-2} А; амплитуда испытательного напряжения ±200 В; толщина исследуемых диэлектрических пленок 4 - 1000 нм; емкость контролируемого образца 5 – 5000 пФ. Разработанные установка и метод управляемой токовой нагрузки используются в производственном процессе на ЗАО «Воронежский завод полупроводниковых приборов - Микрон» и применяются для контроля параметров подзатворного диэлектрика МДП-транзисторов: 2П7146, 2П7147, 2П769, 2П767.

На основе методов, предложенных в диссертационной работе, разработана схема управления технологическим процессом получения подзатворного диэлектрика МДП-транзисторов серии 2П7146 на ЗАО «ВЗПП-Микрон» (г. Воронеж) до и после проведения операции формирования поликремниевых затворов.

В заключении обобщены результаты проделанной работы.

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

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана модель МДП-структуры с зарядовыми дефектами в условиях заряда емкости структуры постоянным током, позволяющая исследовать влияние электрофизических параметров зарядовых дефектов на ВАХ МДП- структуры.

2. На основе проведенного моделирования исследованы зависимости ВАХ МДП-структур с зарядовыми дефектами от плотности положительного заряда в диэлектрике, высоты потенциального барьера и толщины диэлектрической пленки в локальных областях зарядовых дефектов и проведена оценка параметров зарядовых дефектов структур, попадающих в главный пик гистограммы распределения МДП-структур по напряжению микропробоя.

3. С использованием модели зарядового состояния МДП-структур с зарядовыми дефектами при сильнополевой туннельной инжекции электронов из кремния, учитывающей неравномерное протекание инжекционного тока, проведены исследования электронных процессов в локальных областях зарядовых дефектов различной природы в условиях сильнополевой туннельной инжекции.

4. Выполнены исследования влияния зарядовых дефектов на инжекционную стойкость диэлектрических слоев МДП-структур с термической пленкой SiO_2, полученной по различным технологическим режимам.

5. Разработан инжекционный метод оценки качества диэлектрических слоев МДП-структур на ранних стадиях технологических процессов, основанный на анализе временной зависимости напряжения на структуре при подаче на нее импульсов постоянного тока.

6. Разработана система параметров характеризующих качество диэлектрических слоев МДП-структур в условиях производства МДП полупроводниковых приборов и ИС.

7. Предложены алгоритмы инжекционных воздействий и методики обработки результатов измерений, позволяющие характеризовать как дефекты изоляции, так и дефекты зарядовой стабильности в МДП-структурах и приборах на их основе.

8. Проведена апробация разработанных методик на при аттестации технологических процессов получения диэлектрических слоев изделий микроэлектроники на ЗАО «ВЗПП-Микрон» (г. Воронеж).

9. Предложены рекомендации по совершенствованию технологического процесса формирования подзатворного диэлектрика МДП-транзисторов серии 2П7146 на ЗАО «ВЗПП-Микрон» (г. Воронеж) и ОКБ «МЭЛ» (г. Калуга).

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Исследование влияния режимов сильнополевой инжекции электронов на модификацию диэлектрических пленок МДП-приборов / Д.С. Васютин [и др.] // Перспективные материалы. 2009. № 2. С. 19-24.
2. Контроль качества диэлектрических слоев интегральных микросхем и изделий микросистемной техники / Д.С. Васютин [и др.] // Наукоемкие технологии. 2010. Т. 11, № 7. С.44-52.
3. Influence of High_Field Electron Injection Regimes on Modification of Dielectric Films of MOS Devices / D.S. Vasyutin [et al.] // Inorganic Materials: Applied Research. 2010. Vol. 1, № 2. P. 105-109.
4. Активный чувствительный элемент детектора заряженных частиц на основе структур металл-диэлектрик-полупроводник / Д.С. Васютин [и др.] // Радиационная физика твёрдого тела: Труды 17 Международного совещания. М., 2007. С.406-409.
5. Исследование влияния электронного облучения на зарядовое состояние МДП-структур / Д.С. Васютин [и др.] // Радиационная физика твёрдого тела: Труды 18 Международного совещания. М., 2008. С.371-377.
6. Инжекционно-термическая обработка подзатворного диэлектрика полупроводниковых приборов со структурой металл-диэлектрик-полупроводник / Д.С. Васютин [и др.] // Радиационная физика твёрдого тела: Труды 19 Международного совещания. М., 2009. С.406-411.
7. Моделирование воздействия ионизирующих излучений на МДП-структуры в режиме сильнополевой инжекции / Д.С. Васютин [и др.] // Радиационная физика твёрдого тела: Труды 20 Международного совещания. М., 2010. С.240-247.
8. Метод снижения времени инжекции заряда при модификации МДП-транзисторов / Д.С. Васютин [и др.] // Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Мат. Всероссийской науч.-техн. конф. М., 2007. С. 196.
9. Васютин Д.С., Михальков А.М. Влияния режимов инжекционной модификации на зарядовое состояние нанометровых диэлектрических слоев МДП-транзисторов // Наноматериалы: Труды I Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых. Рязань, 2008. С. 179.

10. Столяров А.А., Андреев Д.В., Васютин Д.С. Моделирование процессов инжекционной модификации наноразмерных диэлектрических пленок МДП-структур // Нанотехнологии функциональных материалов. (НФМ'10): Труды международной научно-технической конференции. Санкт-Петербург, 2010. С.624.
11. Investigation of injection modification influence on charge state of gate insulator in MOS devices / D.S. Vasyutin [et al.] // PEM'2008: Internation Conf. Proceed. Kaluga, 2008. P. 223-224.
12. Васютин Д.С, Бузунов Н.В. Исследование зарядового состояния наноразмерных дефектных областей подзатворного диэлектрика МДП-структур // Наноматериалы: Труды III Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых. Рязань, 2010. Т. 1. С. 15-16.
13. Васютин Д.С, Бузунов Н.В. Выявление наноразмерных дефектных областей подзатворного диэлектрика МДП-структур // Наноинженерия: Сборник трудов III Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых. М., 2010. С.309-312.
14. Васютин Д.С, Бузунов Н.В. Исследование процессов изменения зарядового состояния дефектных областей диэлектрика МДП-структур // Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Мат. региональной науч.-техн. конф. М., 2010. С.37-38.
15. Моделирование воздействия ионизирующих излучений на МДП-структуры с наноразмерными диэлектрическими плёнками / Д.С. Васютин [и др.] // Функциональные наноматериалы для космической техники: Труды 1-й Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых учёных. М., 2010. С. 140-143.
16. Изменение зарядового состояния МДП-структур при воздействии ионизирующих излучений / Д.С. Васютин [и др.] // Концентрированные потоки энергии в космической технике электронике, экологии и медицине: Труды XI межвузовской научной школы молодых специалистов. М., 2010. С. 19-25.
17. Столяров А.А., Андреев Д.В., Васютин Д.С. Моделирование воздействия ионизирующих излучений на структуры металл-диэлектрик-полупроводник // Тезисы докладов 41 Международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. М., 2011. С.161.