

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертацию Тягинова Станислава Эдуардовича
**«Моделирование процессов деградации, вызываемых горячими носителями,
в современных кремниевых транзисторах»,**
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
(специальность -- 1.3.11 «физика полупроводников»)

Наиболее разрушительным деградационным механизмом, ограничивающим работоспособность и снижающим временной ресурс полевого транзистора (ПТ), используемого в качестве базового элемента современной микроэлектроники, является деградация, вызываемая горячими носителями (ДВГН). Это связано, прежде всего, с тем фактом, что стремительная миниатюризация размеров приборов сопровождается значительно более медленным скейлингом рабочего напряжения, что приводит к высоким электрическим полям и значительному разогреву носителей заряда в канале таких приборов. Бомбардировка границы раздела кремний/диэлектрик этими высокоэнергетичными носителями приводит к ее повреждению (за счет генерации дефектов), что приводит к ухудшению характеристик прибора – этот деградационный механизм и является ДВГН. Соответственно, разработка модели ДВГН, обладающей предсказательной силой («предиктивной модели»), является крайне важной задачей. Такая модель, в частности, должна быть способна предсказать ресурс ПТ для его рабочего режима на основе экспериментальных данных, полученных при значительной перегрузке образца по напряжению (когда используемые напряжения значительно выше рабочих). Как было показано еще в конце 1990-х годов, при переходе от более агрессивных «стрессовых» воздействий на образец к более «щадящему» эксплуатационному режиму происходит изменение доминантного механизма, ответственного за ДВГН. Соответственно, полная модель ДВГН должна основываться на анализе и моделировании комплекса физических явлений, лежащих в основе ДВГН. Разработке и апробации такой модели ДВГН, имеющей предсказательную силу, и посвящена диссертация С.Э. Тягинова.

Структура диссертации и наиболее важные результаты: работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы.

Введение представляет собой краткий экскурс в предмет исследования – деградацию, вызываемую горячими носителями, приводится список основных результатов и формулируются положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** дается описание основных деградационных явлений в современных ПТ и подчеркивается доминирующая роль ДВГН; перечисляются основные свойства ДВГН. Основные изучаемые режимы ДВГН – это режим с наличием горячих носителей в канале прибора и туннелирование неравновесных носителей через пленку диэлектрика. Далее, следует сводка основных моделей ДВГН, включающая критический анализ концептуальных новшеств той или иной модели, а также их недостатков и ограничений применимости. Описываются как простые эмпирические модели, так и более комплексные подходы к моделированию ДВГН (включая модели групп Хесса, Рауха и Ла Розы, а также группы Бравэ). Важные выводы из анализа этих моделей: (1) на

микроскопическом уровне ДВГН является следствием взаимодействия много- и одночастичного механизмов разрыва связей кремний-водород (Si-H) на границе раздела кремний/диоксид кремния (Si/SiO₂); (2) эти механизмы «запускаются» низко- и высокоэнергетичными носителями, соответственно; (3) в короткоканальных ПТ электрон-электронное рассеяние усиливает ДВГН; (4) дисперсия энергии разрыва связей кремний-водород является важным фактором, который следует учитывать при моделировании ДВГН. Подчеркивается, что, хотя с каждой из проанализированных моделей удалось достичь определенного прогресса в описании процесса разрыва связей Si-H на интерфейсе Si/SiO₂, ни одна из них не позволила продемонстрировать, как *количественно* соответствующие встраиваемые дефекты влияют на характеристики ПТ на уровне физики приборов.

Основным результатом Главы 1 является вывод, что полная модель ДВГН, обладающая предсказательной силой, должна включать описание физической картины, лежащей в основе ДВГН. Такая модель должна позволять рассчитывать/предсказывать ресурс работы прибора для рабочих напряжений на основе экспериментальных данных, полученных при перегрузке образца при значительно более высоких напряжениях. При этом модель должна учитывать смену основного механизма, обуславливающего ДВГН.

Глава 2 представляет описание модели, удовлетворяющей сформулированным выше критериям. Показано, что комплексная проблема ДВГН может быть разделена на три подзадачи. Первая – это моделирование транспорта носителей в транзисторе заданной архитектуры, подвергнутом перегрузке при напряжениях, соответствующих режиму с наличием горячих носителей. В рамках этой подзадачи осуществлялось решение транспортного уравнения Больцмана, для чего использовался транспортный симулятор ViennaSHE. Результатом являлась функция распределения (ФР) носителей по энергии, полученная с использованием информации об архитектуре ПТ. Вторая подзадача – это описание микроскопических механизмов генерации дефектов путем разрыва связей Si-H на границе раздела Si/SiO₂. При решении этой подзадачи рассматриваются всевозможные комбинации многочастичного и одночастичного механизмов разрыва связи; темпы этих процессов вычисляются на основе ФР носителей по энергии. Результатом вычислений является зависимость плотности ловушек от координат(ы) на интерфейсе Si/SiO₂. Ловушки на интерфейсе являются амфотерными, т.е. они могут захватывать электроны/дырки, становясь таким образом заряженными дефектами. Эти дефекты снижают подвижность носителей и приводят к локальным искажениям электростатического потенциала в ПТ. Оба эффекта учитываются при моделировании изменений характеристик прибора в ходе ДВГН, что составляет третью подзадачу. В рамках этой подзадачи осуществляется калибровка/апробация разработанной модели путем воспроизведения изменений со временем стрессового воздействия высоким напряжением на образец таких характеристик ПТ как пороговое напряжение и ток стока в линейном режиме и режиме насыщения.

Разработанная модель является ключевым результатом диссертационной работы.

Глава 3 посвящена моделированию туннельного транспорта носителей через слой диэлектрика с неоднородно распределенной толщиной. Для параметризации пространственной неоднородности толщины диэлектрика введена корреляционная длина флуктуаций толщины диэлектрика λ_d . Это параметр, наряду со значением среднеквадратичного отклонения толщины, является показателем качества

диэлектрической пленки. Были разработаны три метода оценки величины λ_d : первый метод состоит в анализе профиля толщины диэлектрика, полученного, например, с помощью просвечивающего электронного микроскопа, второй основан на анализе статистического ансамбля туннельных токов и третий метод использует величину скачкообразного уменьшения туннельного тока в ходе мягкого пробоя диэлектрической пленки и исключением области площади $\lambda_d \times \lambda_d$ из процесса туннельного транспорта.

Ключевым результатом главы является апробация этих методов и значения λ_d , полученные с помощью них. Использовались структуры со слоями диоксида кремния (SiO_2) и фторида кальция (CaF_2) в качестве диэлектрических слоев. Значения λ_d , полученные с помощью различных методов, находятся в хорошем соответствии.

В **Главе 4**, приводится подробный анализ основных особенностей ДВГН, наблюдаемых экспериментально: (1) смена доминантного механизма разрыва связей с одночастичного («запускаемого» единичным высокоэнергетичным носителем) на многочастичный процесс (вследствие многократной бомбардировки связи холодными носителями, вызывающей возбуждение ее колебательных мод) в ходе скейлинга ПТ – и, как следствие, (2) смена наиболее разрушительных условий ДВГН в ходе скейлинга транзистора; (3) усиление ДВГН за счет электрон-электронного рассеяния в ПТ с длиной канала менее 100 нм; (4) сильная локализация ДВГН в районе стока и (5) смена температурной зависимости ДВГН при переходе от длинноканальных ПТ (ослабление ДВГН при нагреве образца) к суб-100-нанометровым транзисторам (усиление ДВГН с ростом температуры).

Основным результатом данной главы и анализа перечисленных особенностей является вывод, что ключевой подзадачей проблемы моделирования ДВГН является проблема транспорта носителей и что знание функции распределения носителей по энергии позволяет вычислять темпы процессов разрыва связи, электрон-электронного взаимодействия и анализировать, как зависящие от температуры темпы механизмов рассеяния в комбинации с температурно-зависимой скоростью реакции разрыва связей Si-H могут приводить к ослаблению/усилению ДВГН при нагреве образца. Именно эти идеи и легли в основу реализации представленной в Главе 2 модели.

Глава 5, по сути, посвящена апробации разработанной модели ДВГН – здесь моделируются зависимости изменений характеристик приборов существенно разной архитектуры в ходе ДВГН. Анализируется роль различных компонентов разработанной модели, а именно: одночастичного и многочастичного механизмов разрыва связей кремний-водород, электрон-электронного взаимодействия, дисперсии энергии разрыва связей, ее уменьшения вследствие взаимодействия дипольного момента связи с электрическим полем в диэлектрическом слое. Исследуются планарные ПТ с оксинитридом кремния (SiON) в качестве подзатворного диэлектрика, трехмерные транзисторные структуры с каналом в форме плавника с двуслойным диэлектриком, состоящим из пленок SiO_2 и диоксида гафния (HfO_2), а также мощные транзисторы с непланарным интерфейсом Si/ SiO_2 .

Основным результатом Главы 5 является обоснование необходимости радикального пересмотра общепринятой картины ДВГН, предполагающей, что в мощных транзисторах роль многочастичного процесса разрыва связей ничтожно мала, а в короткоканальных ПТ с «холодными» носителями, наоборот, ролью одночастичного процесса можно пренебречь. Было показано, что и в случае мощных транзисторов (в

режиме перегрузки образца при напряжении сток-исток более 20В) многочастичный процесс играет важную роль, а пренебрежение этим механизмом ведет к значительной недооценке изменений характеристик прибора в ходе ДВГН. С другой стороны, в ПТ с длиной канала менее 45нм одночастичный процесс становится очень значительным при условии подачи высокого напряжения сток-исток. Что касается температурной зависимости ДВГН, автором показано, что не существует универсальной зависимости, т.е. в одном и том же транзисторе – при разных комбинациях подаваемых напряжений на сток и затвор (V_{ds} и V_{gs} , соответственно) – ДВГН может как становиться сильнее с ростом температуры, так и ослабляться. Наконец, было показано, что модель аккуратно воспроизводит изменение транзисторных характеристик в ходе ДВГН в широком диапазоне напряжений (V_{ds} , V_{gs}) для широкого класса приборов.

Глава 6: В случае высоковольтных транзисторов полная версия модели ДВГН может быть усечена до более компактного варианта, когда трудоёмкое решение уравнения Больцмана опускается, а функция распределения носителей по энергии моделируется с помощью аналитического выражения. Эта упрощенная версия позволяет значительно сократить вычислительные ресурсы, но при этом обеспечивает высокую точность при моделировании изменений транзисторных характеристик в ходе деградации.

Основным результатом главы является демонстрация применимости данной упрощенной модели и ее валидация путем воспроизведения изменения характеристик вследствие ДВГН в мощных транзисторах (напряжения сток-исток в режиме перегрузки образца – 18В и выше).

В Заключение формулируются основные результаты диссертационной работы.

Среди полученных результатов я бы выделил четыре наиболее интересных:

1. Ключевым результатом данной работы является модель ДВГН, которая базируется на комплексном описании данного явления и включает расчет транспорта носителей, моделирование процессов встраивания дефектов и симуляции характеристик поврежденных приборов. Модель была апробирована с привлечением широкого класса транзисторов и с использованием значительного диапазона условий перегрузки ПТ по напряжению/току, что позволяет утверждать о ее предсказательной силе.
2. Показано, что роли одночастичных и многочастичных механизмов разрыва связей кремний-водород определяются всей совокупностью архитектуры прибора и условий перегрузки образца по напряжению (а не только размерами ПТ, как утверждалось ранее). Это представление дает толчок к пересмотру общепринятой парадигмы понимания и моделирования ДВГН.
3. Аналогично, было показано, что не существует универсальной зависимости ДВГН от температуры. Усиление/ослабление ДВГН при нагреве образца также определяется комбинацией напряжений стресса и особенностей архитектуры ПТ.
4. Повреждение подзатворного диэлектрика вследствие туннелирования горячих носителей, сопровождающееся локальной утерей диэлектрических свойств пленкой, может приводить к скачкообразному уменьшению тока затвора. На основе анализа этого поведения была экстрагирована величина корреляционной длины флуктуаций толщины диэлектрика λ_d . Значение λ_d ,

полученное на основе данного метода, совпадает с величиной λ_d , вычисленной на основе статистического анализа разброса туннельных токов и непосредственно из обработки профиля толщина слоя диэлектрика, измеренного с помощью просвечивающего электронного микроскопа или микроскопа атомных сил. Два первых метода являются значительно менее трудоемкими по сравнению с третьим.

Новизна и достоверность: В диссертационной работе *впервые* разработана модель, которая наиболее полно охватывает и консолидирует три основных аспекта комплексной проблемы ДВГН: моделирование транспорта носителей, вычисление темпов встраивания дефектов и симуляции характеристик поврежденных приборов. Рассматриваются как режим горячих носителей в канале ПТ, так и режим туннелирования сильно неравновесных носителей. Этим определяется *научная новизна*. Модель была апробирована на обширном наборе экспериментальных данных, полученных с привлечением широкого класса приборов (от миниатюризированных ПТ с длиной канала 28нм до высоковольтных транзисторов с размерами в несколько мкм), подвергнутых перегрузке по напряжению при различных условиях. Результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на международных конференциях и были опубликованы в авторитетных международных журналах; они хорошо известны научному сообществу. Считаю, что *достоверность полученных результатов* бесспорна.

Практическая значимость: разработанная модель является полной и обладает предсказательной силой, т.е. она может служить мощным инструментом для анализа ресурса и расчета/предсказания деградационных характеристик как существующих приборов, так и гипотетических транзисторов, архитектура и технология изготовления которых находится в стадии разработки. Наличие такого инструмента позволяет оптимизировать структуру ПТ, а также принять решение о целесообразности разработки прибора определенной архитектуры.

Вопросы и замечания:

1. В работе упоминается, что связь кремний-водород имеет колебательные моды изгиба и растяжения, при этом в разработанной модели полагается, что разрыв связи происходит через моду растяжения. Соответствующей аргументации посвящен короткий абзац №2 на стр. 102, однако хотелось бы видеть полноценную дискуссию, посвященную этому вопросу.
2. Диоксид кремния, используемый в современных ПТ в качестве подзатворного диэлектрика, является аморфным материалом (как и т.н. high- k диэлектрики). Как это учитывается в модели?
3. Очевидно, что сильно разогретые носители могут туннелировать на ловушки в толще SiO₂. Этот механизм идентичен нестабильности, вызываемой комбинацией подачи напряжения на затвор и повышения температуры (ННТ), обсуждавшейся в Главе 1, с той разницей, что в ходе «классической» ННТ на ловушки (и с ловушек) туннелируют равновесные носители. Уделялось ли автором внимание туннелированию разогретых носителей?
4. Встраивание дефектов в ходе ДВН является случайным процессом. Предполагается, что в случае уменьшения длины канала транзистора будет

наблюдаться значительный статистический разброс деградационных характеристик от образца к образцу. Было бы интересно узнать мнение автора относительно перспектив дополнения/расширения данной детерминистической модели ДВГН в направлении статистического описания.

5. Декананометровые транзисторы содержат лишь «конечное» число атомов легирующей примеси, позиции которых случайны. Соответственно, уже в неповрежденных приборах наблюдается статистический разброс характеристик от образца к образцу. Есть ли корреляция между этим разбросом и разбросом характеристик вследствие встраивания дефектов в ходе ДВГН?
6. Хотелось бы услышать рассуждения автора относительно того, какие факторы, механизмы и процессы не были учтены в представленной модели и как они влияют на устойчивость полученных результатов.

Я хочу подчеркнуть, что *сформулированные замечания и вопросы не умаляют важности и надежности результатов*, равно как и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы. Предполагается, что эти критические замечания послужат импульсом к дальнейшим исследованиям по тематике, смежной с данной работой.

Диссертация С.Э. Тягинова является законченным и оригинальным исследованием, в рамках которого были получены важные для физики полупроводниковых приборов и микроэлектроники результаты, а разработанная модель имеет большую ценность для моделирования процессов деградации современных транзисторных структур и оценки их ресурса. Диссертационная работа удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года. С.Э. Тягинов заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11 «физика полупроводников».

20 октября 2022 г.

Официальный оппонент _____ Гриценко Владимир Алексеевич
главный научный сотрудник
Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,
д. ф.-м.н.

Почтовый адрес: 630090 Новосибирск, Проспект Лаврентьева 13

Тел: +7 (383) 330 88 91

Адрес электронной почты: grits@isp.nsc.ru