

«Утверждаю»

Директор

Физико-технологического института

им. К.А. Валиева РАН

Член-корр. РАН В. Ф. Лукичев

«25» октября 2022г.



## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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»)

Расчет временного ресурса полевых транзисторов (ПТ) - элементов, на которых строятся сверхбольшие интегральные схемы (СБИС) - является важнейшей задачей микро- и наноэлектроники. Эта задача требует максимально точного решения при разработке ПТ нового поколения и, соответственно, проектировании СБИС. Такой расчет должен проводиться с учетом всего многообразия явлений деградации, ограничивающих работу транзистора. При этом следует учитывать, что деградация прибора является следствием коллективного отклика на различные процессы, активированные внешним воздействием. Соответственно, предсказательное моделирование процессов деградации должно основываться на тщательном описании всего многообразия физических механизмов, лежащих в их основе.

Среди деградационных процессов, типичных для современных миниатюризованных ПТ, наиболее опасными является процессы деградации, вызываемые горячими носителями (ДВГН). Это объясняется тем, что в ходе масштабирования размеры приборов снижаются значительно быстрее их рабочих напряжений и напряжений электрической перегрузки образца, что обусловливает наличие электрических полей высокой напряженности в таких приборах, сильному разогреву носителей и сильной ДВГН. В мощных ПТ рабочие напряжения также высоки, и ДВГН также является основным деградационным механизмом.

Диссертационная работа С.Э. Тягинова посвящена разработке модели ДВГН, основанной на физических принципах. Эта модель решает три

основных задач, включенных в общую проблему ДВГН, а именно, 1) моделирование процессов генерации дефектов, 2) моделирование транспорта горячих носителей и 3) расчет характеристик поврежденных приборов. Модель была верифицирована на основе обширного набора экспериментальных данных для ПТ различных классов.

## **СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

Работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы.

Во Введении дается краткое описание проблемы ДВГН, перечисляются основные результаты работы и положения, выносимые на защиту.

**Глава 1** посвящена описанию основных процессов деградации в современных ПТ, места ДВГН среди этих процессов, а также моделей ДВГН, предложенных и апробированных другими группами.

ДВГН является следствием бомбардировки границы раздела Si/SiO<sub>2</sub> неравновесными (горячими) носителями, приводящей к разрыву связей Si-H и генерации дефектов (Р<sub>в</sub>-центров). Подчёркивается доминантная роль ДВГН среди других процессов повреждения современного ПТ. На основе анализа моделей ДВГН и пределов их применимости делается вывод, что разрыв связи Si-H может провоцироваться как единичным горячим носителем (одночастичный процесс, ОЧ-процесс), так и бомбардировкой несколькими холодными носителями, приводящей к множественному возбуждению колебательных мод и разрыву связи (многочастичный процесс, МЧ-процесс). Утверждается, что корректное описание ДВГН должно быть основано на моделировании транспорта носителей и расчете функции распределения носителей по энергии. Показывается, что общим недостатком всех проанализированных моделей является отсутствие связи между микроскопической картиной процессов генерации дефектов и моделированием поврежденных приборов. Соответственно, все эти модели имеют ограниченную применимость и не позволяют рассчитать временной ресурс ПТ.

**Результаты Главы 1:** показано, что задача моделирования транспорта носителей для заданной архитектуры прибора и заданных условий перегрузки образца по напряжению является неотъемлемой частью модели ДВГН, претендующей на количественную точность. Вычисляемые функции распределения (ФР) носителей по энергии используются для вычисления темпов ОЧ- и МЧ-механизмов, а значит – для моделирования процессов встраивания дефектов. При наличии рассчитанных темпов генерации дефектов и координатно-зависимой плотности дефектов на границе раздела кремний/окисел вычисляются изменения характеристик приборов вследствие ДВГН как функции времени стресса. Подчеркивается, что для количественно точного моделирования ДВГН

требуется решение всех трех указанных выше подзадач в рамках единого подхода.

**Глава 2** посвящена центральному результату работы – разработанной и аprobированной модели ДВГН. В рамках этой модели проблема ДВГН условно разбивается на три подзадачи: (1) моделирование транспорта носителей, (2) моделирование процессов встраивания дефектов в ходе ДВГН и (3) расчет характеристик ПТ с учетом наличия дефектов. В рамках *первой задачи* решается транспортное уравнение Больцмана и вычисляется ФР носителей по энергии. Эти ФР используются для решения *второй задачи* – вычисляются темпы ОЧ- и МЧ-механизмов и временная зависимость плотности дефектов на интерфейсе  $N_{it}(t)$ . ОЧ- и МЧ-механизмы рассматриваются как конкурирующие пути протекания одной и той же реакции, трансформирующей нейтральные связи Si-H в электрически активные P<sub>b</sub>-центры. На основе вычисленной зависимости  $N_{it}(t)$  проводятся расчеты характеристик поврежденных приборов (третья подзадача), при этом вычисляются такие величины как сдвиг порогового напряжения  $\Delta V_{th}(t)$  и изменения тока стока  $\Delta I_d(t)$  в ходе стресса. Эпюры изменения  $\Delta V_{th}(t)$  и  $\Delta I_d(t)$  используются для верификации модели.

**Результаты Главы 2:** впервые все три подзадачи общей проблемы ДВГН были интегрированы в рамках единого подхода; предложенная модель является ключевым результатом работы.

**В Главе 3** изучается влияние неоднородности распределения толщины подзатворного окисла на стабильность работы прибора. В частности, исследуется пробой туннельно-тонкой диэлектрической пленки с неравномерно распределенной толщиной. Для параметризации такой пленки вводится корреляционная длина флюктуаций толщины диэлектрика  $\lambda_d$ . В зависимости от соотношения размера прибора  $L$  и длины  $\lambda_d$  приборы условно делятся на приборы большой площади ( $L \gg \lambda_d$ ) и приборы малой площади ( $L \sim \lambda_d$  или  $L > \lambda_d$ ). В первом случае среднеквадратичное отклонение туннельных токов от образца к образцу пренебрежимо мало; во втором случае оно определяется – помимо прочих параметров – соотношением  $L/\lambda_d$ . Статистический анализ экспериментальных вольт-амперных характеристик образцов позволяет оценить величину  $\lambda_d$ . Второй метод расчета  $\lambda_d$  основан на анализе скачков туннельного тока в ходе мягкого пробоя. Также  $\lambda_d$  может быть определена из анализа профилей толщины диэлектрика (для этого использовался сканирующий туннельный микроскоп).

**Результаты Главы 3:** основным результатом является внедрение нового подхода к параметризации пленки диэлектрика с неоднородным распределением ее толщины. А именно, помимо среднего значения

толщины пленки и ее среднеквадратичного отклонения – вводится корреляционная длина флуктуаций  $\lambda_d$ .

**Глава 4** посвящена основным особенностям ДВГН, наблюдаемым экспериментально. Анализируется роль ОЧ- и МЧ-механизмов разрыва связи; показывается, что смена доминантного механизма при миниатюризации ПТ приводит к изменению наиболее разрушительных условий ДВГН. Отмечается усиление ДВГН в короткоканальных приборах за счет электрон-электронного рассеяния. На основе литературных данных делается вывод, что усиление/ослабление ДВГН при нагреве образца определяется длиной затвора прибора. Показывается, что ДВГН локализована в районе стока прибора.

**Результаты Главы 4:** на основе анализа приведенных в главе экспериментальных данных делается вывод, что полное и корректное моделирование ДВГН должно быть основано на решении задачи транспорта носителей. Вычисленная функция распределения носителей по энергии позволяет рассчитать темпы ОЧ- и МЧ-механизмов, темпы различных механизмов рассеяния (включая электрон-электронное взаимодействие), которые и определяют температурную зависимость ДВГН и ее локализацию. Результаты этой главы обосновывают структуру модели ДВГН, разработанной в данной работе (Глава 2).

**Глава 5** посвящена моделированию ДВГН в ПТ принципиально разных назначений и архитектур, включая планарные транзисторы, трехмерные транзисторные архитектуры (FinFET) и мощные приборы с непланарным интерфейсом Si/SiO<sub>2</sub> (LDMOS). Помимо верификации модели проводится также анализ вкладов различных механизмов, учитываемых при моделировании (ОЧ- и МЧ-процессы, электрон-электронное рассеяние, учет дисперсии энергии связи кремний-водород и т.д.).

**Результаты Главы 5:**

1. Установлено, что не существует универсальной температурной зависимости ДВГН, а усиление/ослабление ДВГН при нагреве образца определяется не одной только длиной затвора прибора, а всей совокупностью условий перегрузки образца по напряжению и его архитектурой.
2. Показано, что ОЧ-механизм дает заметный вклад в ДВГН даже в короткоканальных ПТ (при высоких напряжениях перегрузки), а МЧ-механизм играет значительную роль в случае ДВГН даже в случае мощных ПТ, подвергнутых стрессу при высоких напряжениях. Таким образом, устоявшаяся парадигма понимания и моделирования ДВГН должна быть пересмотрена: роли ОЧ- и МЧ-процессов определяются всей полнотой особенностей архитектуры прибора и условий электрического стресса.

3. То же самое касается электрон-электронного рассеяния, которое, как было показано, заметно усиливает ДВГН даже в ПТ с длинами затвора 150нм (в литературе указывалось что этот механизм рассеяния играет заметную роль в приборах с длиной затвора менее 100нм).

**Глава 6:** решение транспортного уравнения Больцмана является трудоемкой задачей, однако в случае длинноканальных ПТ упрощенные подходы к его решению обеспечивают надлежащую точность. Автором разработана и апробирована упрощенная модель ДВГН, использующая дрейфово-диффузионную модель в сочетании с аналитическим выражением для ФР носителей по энергии, включающим члены, описывающие популяции горячих и термализовавшихся носителей. Модель была апробирована путем воспроизведения изменений характеристик мощных транзисторов со временем в ходе ДВГН.

**Результаты Главы 6:** упрощенная модель ДВГН достаточно точно воспроизводит деградационные характеристики мощных ПТ; по сравнению с полной моделью она не требует значительных вычислительных ресурсов.

**В Заключении** систематизируются основные результаты работы. Наиболее интересными из них представляются следующие:

1. Для полноты описания пленки диэлектрика с неоднородно распределенной толщиной (помимо математического ожидания и среднеквадратичного отклонения) вводится корреляционная длина флюктуации толщины. Этот параметр характеризует качество выращенного слоя диэлектрика. Были разработаны и апробированы (с использованием приборов со слоями  $\text{SiO}_2$  и  $\text{CaF}_2$ ) методы определения корреляционной длины.
2. Разработана и апробирована модель ДВГН, базирующаяся на детальном описании физической картины в основе ДВГН. Впервые в истории моделирования ДВГН предложенная модель консолидирует три основные подзадачи ДВГН, решаемые в рамках единого подхода: (1) моделирование транспорта носителей, (2) вычисление темпов генерации дефектов и (3) моделирование характеристик поврежденных приборов. Модель была верифицирована с использованием широкого класса ПТ.
3. Вопреки прежнему пониманию ДВГН, не существует универсальной температурной зависимости ДВГН, она определяется всем многообразием архитектур ПТ и условий электрического стресса.
4. Роли одночастичного и многочастичного механизмов разрыва связи должны быть пересмотрены. Показано, что даже в короткоканальном ПТ с длиной затвора 65нм и при перегрузке

образца при высоком напряжении ОЧ-механизм дает существенный вклад в ДВГН. Продемонстрировано, что МЧ-процесс дает определяющий вклад в ДВГН в мощных приборах и при высоких напряжениях. Роли этих механизмов также определяются архитектурой прибора и условиями стресса (т.е. не только длиной канала/затвора).

5. На основе полной модели ДВГН была разработана упрощенная модель, основанная на дрейфово-диффузационном подходе к решению уравнения Больцмана и с использованием аналитического выражения для ФР носителей для энергии. Упрощённый подход применим для точного моделирования ДВГН в мощных ПТ и не требует значительных вычислительных ресурсов.

### **Научная новизна**

По сравнению со многими другими моделями ДВГН, предложенный автором подход является наиболее полным, т.к. включает решение трех основных подзадач проблемы ДВГН – (1) транспорта носителей, (2) моделирования кинетики встраивания дефектов и (3) симуляции поврежденных приборов. Полнота описания физической картины ДВГН позволяет утверждать, что разработанная модель является предиктивной, а также обеспечивает достоверность результатов моделирования. Проведена комплексная верификация модели с привлечением самых различных транзисторных архитектур (планарные ПТ, трехмерные приборы с каналом в форме плавника, мощные ПТ с высокими рабочими напряжениями) и обширного массива экспериментальных данных. Можно заключить, что достоверность результатов бесспорна.

**Практическая значимость:** полнота и предсказательная сила предложенной модели позволяют использовать ее для оптимизации архитектуры/геометрии транзисторных структур с целью минимизации нежелательного явления ДВГН; кроме того, модель может быть использована для оценки временного ресурса ПТ новых поколений и анализа их работоспособности.

### **К работе имеются замечания.**

1. Автор демонстрирует хорошее совпадение результатов моделирования на основе функции распределения горячих электронов (формула 6.6), состоящей из равновесной и неравновесной частей, с экспериментальными значениями. Однако такое совпадение может быть обусловлено наличием 5 подгоночных параметров. При использовании такого подхода следовало бы убедиться в том, что подгоночные параметры не выходят за рамки разумных.
2. При расчете туннельного тока рассматривается только прямое туннелирование в ВКБ приближении. Не ясно, какой вклад дает туннелирование через промежуточные дефекты.

3. Предположение об эквидистантности уровней, используемое при расчете темпов разрыва связей Si-H сомнительно, поскольку, на самом деле, при высоких энергиях уровни сгущаются. Не ясно, насколько эти факты влияют на точность расчета одночастичного и многочастичного разрыва связи.

4. В работе рассматривается довольно непривычный подзатворный диэлектрик  $\text{CaF}_2$ , упоминаются его достоинства и, в то же время, указывается на неоднородность его распределения по поверхности (рис. 3.16). Можно ли в итоге сделать вывод о целесообразности его использования в полевых транзисторах?

Указанные замечания являются несущественными и не убавляют высокую оценку работы.

Результаты диссертации могут быть использованы во всех организациях, занимающихся разработкой приборов микро- и наноэлектроники, а также развитием физики твердого тела, в частности: завод «Микрон», НИИМЭ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ФТИАН им. К.А. Валиева РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН, ИФМ РАН, ИПТМ РАН, ИФТТ РАН и др.

Работа рассмотрена на научном семинаре ФТИАН «Перспективные технологии и устройства микро- и наноэлектроники» 13 сентября 2022.

Исходя из вышеизложенного, считаем, что диссертация С.Э. Тягинова полностью удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11 «физика полупроводников», а ее автор, С.Э. Тягинов, заслуживает присуждения ему искомой степени.

Отзыв составил заместитель директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технологический институт им. К.А. Валиева Российской академии наук, доктор физ.-мат. наук, специальность – 1.3.11 «физика полупроводников»

Руденко Константин Васильевич

«25» октября 2022г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технологический институт им. К.А. Валиева Российской академии наук (ФТИАН РАН)

Адрес: 117218, Россия, Москва, Нахимовский пр., д. 36, корп. 1

e-mail: rudenko@ftian.ru

тел.: +7 (499) 129-56-08