

ОТЗЫВ
официального оппонента
о диссертационной работе Тягина Станислава Эдуардовича
«Моделирование процессов деградации, вызываемых горячими носителями,
в современных кремниевых транзисторах»,
представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 1.3.11 – физика полупроводников

Точное моделирование изменений характеристик полевого транзистора вследствие перегрузки образца по напряжению (стресса) требуется для расчета времени жизни как единичных полевых транзисторов (ПТ), так и СБИС на их основе.

На микроскопическом уровне деградационные процессы – это встраивание/активация дефектов.

Их кинетика определяется конкретными условиями воздействия на транзистор. Изменение условий стресса (например, при переходе от более разрушительных воздействий в ходе испытаний стойкости образцов к более щадящему рабочему режиму), как правило, сопровождается изменением механизма активации дефектов.

Соответственно, описание и моделирование процессов деградации должны вскрывать всю полноту физической картины, а эмпирические модели обладают весьма ограниченной применимостью.

Скейлинг современного ПТ сопровождается асимметрией между снижением размеров прибора и рабочих напряжений (последние снижаются медленнее). Это приводит к высоким электрическим полям и сильному разогреву носителей. Как следствие, деградация, вызываемая горячими носителями (ДВГН), является наиболее разрушительным деградационным явлением в современных ПТ.

Работа посвящена разработке и верификации модели ДВГН, основанной на физических принципах.

Структура: работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы.

В Введении описывается предмет исследования (ДВГН), обосновывается важность тематики работы и приводится сводка основных результатов, а также положений, выносимых на защиту.

В Главе 1 дается сводка основных деградационных режимов, типичных для современного ПТ, и подходов к их моделированию.

Упор делается на ДВГН, при этом подчеркивается, что в декананометровых ПТ есть два основных режима ДВГН: (1) режим разогрева носителей в канале ПТ и (2) туннелирование неравновесных носителей через пленку диэлектрика.

Представляется сводка моделей ДВГН, начиная от эмпирических подходов и заканчивая моделями, основанными на физических принципах.

Делаются выводы относительно ограничений применимости этих моделей.

На основе этих выводов утверждается (**это и есть основной результат Главы 1**), что полная модель ДВГН должна включать блоки: (1) транспорт носителей, (2) моделирование процессов генерации дефектов и (3) расчет характеристик ПТ при

наличии ненулевой концентрации дефектов. Все три подзадачи должны решаться в рамках единой модели.

Такая модель представлена в **Главе 2**.

Для решения задачи моделирования транспорта носителей используется симулятор ViennaSHE, который осуществляет детерминистическое решение уравнения Больцмана для заданной архитектуры прибора и условий испытаний образца. Результат – функции распределения носителей по энергии.

Функции распределения используются для вычисления темпов двух процессов генерации дефектов путем разрыва связей Si-H – одиночичного (ОЧ) механизма (запускается единичным горячим носителем) и многочастичного (МЧ) механизма (запускается бомбардировкой несколькими холодными частицами, которые возбуждают колебательные моды связи). Рассчитывается двумерная концентрация ловушек (N_{it}) на интерфейсе SiO_2/Si .

С вычисленной концентрацией N_{it} проводится моделирование характеристик поврежденных приборов, с учётом как искажения электрического потенциала ПТ, так и снижения подвижности носителей за счет заряженных ловушек. Верификация модели осуществляется воспроизведением изменений характеристик ПТ (пороговое напряжение, ток стока в линейном режиме и в режиме насыщения) со временем стресса.

Сама модель является центральным результатом работы.

В **Главе 3** рассматривается режим туннельного переноса при условии неоднородности распределения пленки диэлектрика с координатой.

Для параметризации такой пленки, помимо номинальной толщины и дисперсии толщины, вводится корреляционная длина флюктуаций – характерная длина пространственной неоднородности λ_d .

Предлагаются методы оценки величины λ_d .

Для их апробации используются экспериментальные данные, полученные для ПТ со слоями SiO_2 и CaF_2 .

Основным результатом Главы 3 стала демонстрация важности учета неоднородности толщины диэлектрика при анализе характеристик ПТ и МДП-структур разных размеров, до и после их повреждения.

Глава 4 посвящена основным особенностям ДВГН, таким как:

1. Локализация ДВГН в районе стока прибора.
2. Смена превалирующего механизма разрыва связей Si-H при уменьшении длины затвора транзистора с ОЧ на МЧ-процесс.
3. Изменение наихудших условий стресса (как следствие п. 2) при переходе от длинноканальных к короткоканальным ПТ.
4. Усиление ДВГН за счет электрон-электронного рассеяния при длинах затвора менее ~120нм.
5. Температурная зависимость ДВГН.

Основным результатом Главы 4 является вывод, что неотъемлемой частью физически корректной модели ДВГН является задача моделирования транспорта носителей. На базе анализа особенностей ДВГН обосновывается структура модели, предложенной в Главе 2.

В Главе 5 проводится верификация модели.

На основе результатов проводится изучение особенностей ДВГН в ПТ различных классов (планарные, трехмерные, мощные с непланарным интерфейсом Si/SiO₂).

Анализируется вклад каждого компонента модели в ДВГН.

Основной результат Главы 5:

Старая концепция понимания и моделирования ДВГН должна быть пересмотрена.

Ранее утверждалось, что в длинноканальных ПТ ДВГН становится слабее при нагреве образца, а в короткоканальных, наоборот, усиливается. Смена температурной зависимости, как утверждалось ранее, происходит при длинах затвора 100-120нм. В работе было показано, что нет универсальной температурной зависимости ДВГН и что в одном и том же приборе ДВГН может как усиливаться, так и ослабляться с ростом температуры. Иными словами, температурная зависимость ДВГН определяется как архитектурой прибора, так и условиями стресса.

Показано, что, вопреки старому видению ДВГН, ОЧ-процесс дает определяющий вклад даже в короткоканальном приборе с длиной в 44нм при высоких напряжениях стресса.

МЧ-процесс, который, согласно старым представлениям о ДВГН, является пренебрежимо слабым в длинноканальных ПТ, как было показано в работе, дает очень значительный вклад даже в мощных транзисторах с длиной интерфейса ~3.4мкм и при напряжениях стока в режиме перегрузки образца более 18В.

Роли ОЧ- и МЧ-механизмов определяются не одной лишь длиной прибора, а всей совокупностью деталей его архитектуры и условий перегрузки образца по напряжению.

Глава 6: решение транспортного уравнения Больцмана – ресурсоёмкая задача, однако в случае мощных приборов упрощенный подход на базе дрейфово-диффузационного приближения является достаточно точным. На основе этого подхода была разработана упрощенная модель ДВГН, использующая аналитическое выражение для функций распределения носителей по энергии. Модель была апробирована для случая мощных транзисторов.

Основным результатом этой главы является утверждение о применимости данной модели в случае мощных ПТ. Модель проста и не требует значительных вычислительных ресурсов.

Заключение

Основные результаты работы

Новизна и достоверность:

Новизна -- Впервые была представлена и верифицирована модель ДВГН, включающая полную совокупность физических механизмов, лежащих в основе ДВГН. Решаются три основных подзадачи: моделирование транспорта носителей, моделирование процессов встраивания дефектов и моделирование поврежденных приборов.

Достоверность научных результатов обуславливается тщательной верификацией модели с использованием широкого набора условий стресса и транзисторов принципиально разных архитектур.

Результаты докладывались на международных конференциях и были опубликованы в реферируемых журналах.

Практическая значимость: модель является предиктивной, т.е. позволяет как рассчитывать деградационные характеристики уже существующих/изготовленных приборов, так и предсказывать время жизни перспективных ПТ, находящихся только в стадии разработки.

Вопросы и замечания:

1. В ходе ДВГН происходит диссиpация энергии носителей, которая приводит к нагреву образца. Очевидно, в ПТ с каналом в форме плавника теплоотвод из канала затруднён, поэтому температура решетки может быть (локально) значительно выше температуры окружающей среды. Как это учитывается при моделировании?
2. В разделе 2.3 есть фрагмент, посвященный восстановлению характеристик ПТ, после снятия напряжений, соответствующих режиму ДВГН. Показано, что восстановление становится заметным при температурах более 150°C. Однако данные, полученные при участии автора, приведены только для одного типа ПТ/технологического процесса. Проводились ли с участием автора систематические исследования восстановления характеристик после ДВГН?
3. В Главе 1 обсуждается ННТ, показывается, что это деградационное явление имеет значительную обратимую компоненту. Однако рассмотрение ограничивается случаем равновесных носителей (при отсутствии напряжения между стоком и истоком – $V_{ds} = 0$).
 - a. Как изменится картина при подаче $V_{ds} \neq 0$?
 - b. Что будет в случае сильно разогретых носителей?
 - c. Будет ли такой режим деградации также характеризоваться значительной восстанавливаемой компонентой?
4. При эксплуатации ПТ в СБИС происходит его многократное переключение из выключенного во включенное состояние и обратно. Соответственно, ПТ подвергается как ДВГН, так и ННТ. Планируется ли объединение разработанной модели ДВГН с моделью ННТ?
5. Будет ли полная деградация при последовательной перегрузке ПТ в режимах ДВГН и ННТ суммой вкладов каждого их механизмов или ситуация более сложная?
6. На стр. 55 идут разговоры о т.н. самокомпенсации деградации (“turn-around effect”), когда сдвиги порогового напряжения вследствие захвата разного типа носителей на ловушки (частично) компенсируют друг друга. Моделировал ли автор этот режим? Если нет, хотелось бы услышать рассуждения, как такое моделирование может проводиться.

Сформулированные замечания и вопросы не умаляют важности и надежности результатов, а являются, скорее, мотивацией к дальнейшим исследованиям.

Диссертация С.Э. Тягинова является законченным и оригинальным исследованием, содержит принципиально новые результаты. Сумму полученных результатов можно квалифицировать как научное достижение. Диссертационная работа удовлетворяет

требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к докторским диссертациям, и «Положению о присуждении ученых степеней ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН» от 19.08.2019 г. С.Э. Тягинов безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11 - физика полупроводников.

Доктор физико-математических наук,
Член-корреспондент РАН,
Специальность 01.04.10 – физика полупроводников,
Главный научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук
Копьев Петр Сергеевич
24 октября 2022 г.
194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.26
Тел. 8 812 2973620, e-mail ps@kopjev.ioffe.ru

Согласен на обработку персональных данных и
их размещение на сайте ФТИ, необходимые для оформления
диссертационного дела

_____ Копьев Петр Сергеевич

Подпись Копьева П.С. заверяю:

Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе
Канд. физ.-мат.наук

М.И. Патров

