

ОТЗЫВ

**официального оппонента Барабана Александра Петровича
на диссертационную работу Тягина Станислава Эдуардовича
«Моделирование процессов деградации, вызываемых
горячими носителями, в современных кремниевых транзисторах», представленную на
соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 1.3.11 – физика полупроводников**

Актуальность исследования

Одно из приоритетных направлений современной науки связано с развитием твердотельной электроники, что, безусловно, требует не только совершенствования уже существующих методов диагностики наноматериалов и низкоразмерных структур, но и развития новых подходов, особенно методов математического моделирования, для изучения физических процессов, протекающих в приборах твердотельной электроники в процессе функционирования. Существенные изменения физических размеров базового элемента современной твердотельной электроники (полевого транзистора с изолированным затвором) сопровождается как появлением приборов новой архитектуры, так и использованием новых материалов, как в качестве диэлектрических сдоев, так и в качестве полупроводниковой подложки. Перспективы внедрения новых полупроводниковых материалов представляются спорными вследствие пока недостаточной стабильности и воспроизводимости характеристик приборов. При этом важнейшими факторами, определяющими жизнеспособность используемого технологического подхода, по-прежнему являются деградационная стойкость и надежность конкретного прибора. Спектр деградационных явлений, типичных для кремниевых полевых транзисторов наиболее продвинутого технологического поколения, достаточно широк, однако, и здесь я полностью согласен с выводом автора, основную роль играют деградационные процессы, связанные с горячими носителями.

Приведенные выше соображения свидетельствуют о необходимости создания надежной модели деградационных явлений, вызываемых горячими носителями, которая позволит моделировать изменения характеристик приборов как в ходе длительной эксплуатации в рабочем режиме, так и при более жестких деградационных условиях. Именно в этом направлении выполнена диссертационная работа С.Э.Тягина, что, несомненно, обуславливает не только ее актуальность, но и практическую значимость.

Структура диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка публикаций автора по теме диссертационной работы и списка цитируемой литературы. Во введении содержаться определения цели и задач работы, сформулированы научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе был дан обзор моделей вызываемой горячими носителями деградации, который охватил как эмпирические модели, так и более сложные подходы, основанные на анализе микрокартины физических механизмов, ответственных за деградационные процессы.

Во второй главе представлена модель условно разбитая на три модуля, интегрированных в рамках одной вычислительной структуры и требующих самосогласованного решения: моделирование транспорта носителей в полупроводниковых системах, описание механизмов встраивания дефектов в ходе деградации вызываемой горячими носителями и расчет характеристик поврежденных приборов. Необходимо отметить, что предложенная модель процессов встраивания дефектов включает учет всех суперпозиций одночастичного и многочастичного механизмов разрыва связей кремний-водород и позволяет вычислить пространственное распределение концентрации интерфейсных состояний для определенной архитектуры прибора и заданных условий стресса.

В главе 3 представлена методика расчета туннельных токов, протекающих через слой подзатворного диэлектрика в полевых транзисторах. Она включает решение трех задач: расчет зонной диаграммы туннельной МДП структуры, вычисление туннельных токов при наличии полной информации о зонной диаграмме структуры, и нахождение положения квазиуровня Ферми для неосновных носителей в случае инверсии.

В главе 4 детально рассмотрены основные свойства деградации, вызываемой горячими носителями, с учетом которых будет составлен ряд требований к модели, описывающей этот деградационный эффект.

В пятой главе был проведен анализ особенностей, обусловленных деградацией, вызываемой горячими носителями, в полевых транзисторах планарной архитектуры, в приборах с каналом в форме плавника и в мощных горизонтальных МОП-транзисторах, изготовленных методом двойной диффузии. Необходимо отметить, что предложенная модель воспроизводит результат деградации в приборах различных архитектур с хорошей точностью, причем при этом используется единый набор параметров. В итоге был получен ряд новых и нетривиальных результатов.

В Главе 6 представлена компактная версия модели деградации, вызываемой горячими носителями, основанная на подходе диффузии-дрейфа к решению уравнения Больцмана, который по мнению автора значительно проще и эффективнее полного (детерминистического) решения этого уравнения. Показано, что, несмотря на простоту данной реализации модели деградации, она точно воспроизводит как функции распределения носителей по энергии, так и деградационные характеристики, включая профили концентрации ловушек на интерфейсе и изменения тока стока.

В заключении отмечено, что в работе было предпринято комплексное исследование двух основных деградационных эффектов, ограничивающих функционирование современного полевого транзистора на основе кремния и обусловленных появлением в приборе при определенных условиях горячих носителей, которые оказывают разрушающее воздействие.

Полный объём диссертации составляет 367 страниц, включая 169 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 453 наименования.

Новизна проведенных исследований и полученных результатов

В отличие от предшествующих работ в данной работе проблема анализа надежности и деградационной стойкости полевого транзистора была решена путем построения модели деградации, вызываемой горячими носителями, в совокупности с моделью для расчета туннельных токов сильно неравновесных носителей в структурах с флюктуирующей толщиной диэлектрической пленки. Моделирование этих двух явлений позволило решить задачу оптимизации архитектуры новых поколений полевых транзисторов с целью увеличения времени жизни транзистора, оптимизации потребляемой мощности и подавления статистического разброса характеристик от образца к образцу. Кроме того необходимо отметить, что предложенный автором подход (в отличие от других моделей деградации, вызываемой горячими носителями) учитывает все суперпозиции одночастотного и многочастотного механизмов разрыва кремниево-водородных связей на межфазовой границе.

Для практической реализации построенной модели на базе “полной” версии модели деградации, вызываемой горячими носителями, основанной на детерминистическом решении уравнения Больцмана, была разработана и протестирована компактная версия модели, основанная на упрощенном (и, соответственно, более эффективном с вычислительной точки зрения) подходе диффузии-дрейфа к решению уравнения Больцмана. Апробация модели была проведена применительно к мощным полупроводниковым приборам, а также к планарным транзисторам с длинами затвора менее 300 нм.

Научная и практическая значимость

Научная новизна состоит в разработке самосогласованных физических моделей для двух деградационных процессов, связанных с горячими носителями: деградации, вызываемой горячими носителями, и туннелирования сильно неравновесных частиц. Разработанная автором модель деградации, вызываемой горячими носителями, уникальна и объединяет моделирование транспорта носителей, описание процессов генерации дефектов и моделирование характеристик деградированных приборов.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанные модели позволяют дать рекомендации по оптимизации архитектуры прибора с целью подавления деградационных процессов, связанных с горячими носителями. При этом анализируется влияние особенностей топологии приборов широкого класса, от планарных полевых транзисторов до трехмерных приборов с каналом в форме плавника и их функционала от мощных транзисторов с рабочими напряжениями более 50 В до маломощных полевых транзисторов, используемых в сверхбольших интегральных схемах с рабочим напряжением 0.9 В, а особенности развития процесса деградации, вызываемой горячими носителями, связываются с деталями архитектуры приборов. Разработанная модель туннелирования

сильно неравновесных носителей через диэлектрические слои с флюктуирующей толщиной, позволяет прогнозировать статистический разброс туннельных токов от образца к образцу и экстрагировать величину корреляционной длины флюктуаций толщины для разнообразных материалов, включая новые диэлектрики.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов, рекомендаций и заключений

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов, рекомендаций и заключений, сформулированных в диссертации С.Э.Тягина, обеспечивается тщательной апробацией моделей, которая проводилась на основе приборов разных классов с различными диэлектрическими материалами в широком диапазоне прикладываемых напряжений и температур. Достоверность полученных результатов подтверждается согласием модельных расчетов и экспериментальных данных. Основные результаты были представлены на многих всероссийских и международных конференциях, симпозиумах, семинарах и в публикациях в реферируемых авторитетных российских и международных журналах.

У меня возникли следующие вопросы и замечания по диссертации, не имеющие принципиального характера:

1. В работе автор полагает, что природа деградации, вызываемой горячими носителями (под "горячими носителями" подразумеваются электроны и дырки, обладающие достаточной энергией), – это разрыв связей Si-H, инициированный носителями заряда, взаимодействующими с интерфейсом кремний/диоксид кремния.

Существуют ли экспериментальные доказательства реализации такого процесса?

Будет ли наблюдаться и как будет протекать процесс деградации в структурах, не содержащих водород (аналог SIMOX технологии)?

В каком зарядовом состоянии оказываются формируемые поверхностные состояния непосредственно после разрыва связи и возможно ли его изменение в процессе дальнейшей деградации?

При ненулевой вероятности разрыва связей Si-H деградация должна демонстрировать значительную восстанавливаемую компоненту. Приводились ли систематические исследования этого вопроса (при участии автора или другими группами)?

Существуют ли экспериментальные факты подтверждающие спектр колебательных мод связи Si-H, рассматриваемый в работе?

2. Возникает вопрос к результатам, приведенным на рисунке 3.14 (Профили распределения высоты $h(x)$ слоя диэлектрика вдоль координаты в плоскости интерфейса кремний/диэлектрик, измеренные с помощью микроскопа атомных сил для пленки SiO_2), поскольку выше в тексте указано, что для исследуемой структуры $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ слой SiO_2 номинальной толщины $d_n = 2.7 \text{ нм}$ был выращен методом сухого термического окисления.
3. Не совсем понятен предложенный автором способ оценки величины корреляционной длины λ_d основанный на анализе данных по изменению тока, протекающего через затвор туннельной МДП структуры, подвергнутой стрессовому воздействию при постоянном напряжении. Что являлось основанием для предположения, сделанного автором диссертации: «При электрической перегрузке образца первыми пробиваются его самые тонкие участки, то есть – в нашей модели – ячейка с минимальной толщиной диэлектрика».
4. Чем обусловлено плато, видимое на функциях распределения при средних энергиях (раздел 4.2.1)?
5. Существуют ли принципиальные различия в деградационных процессах в зависимости от типа проводимости подложки и ее ориентации. Можно ли в настоящий момент высказать предположения о существовании единого физического механизма процесса деградации слоистых структур на основе кремния или деградация – совокупность физических процессов, протекающих практически независимо.
6. Автор утверждает, что не существует универсальной температурной зависимости деградации, вызываемой горячими носителями. Это утверждение подкрепляется экспериментальными данными для одного прибора (n-канальный полевой транзистор с длиной затвора 65 нм). Есть ли систематические экспериментальные исследования этого вопроса с привлечением транзисторов разных технологий?
7. Объем диссертационной работы мог бы быть существенно сокращен без ущерба значимости и содержания.

Общая характеристика диссертационной работы

В целом, несмотря на отмеченные замечания, которые носят частный характер, можно утверждать, что диссертация вносит существенный вклад в развитие физики взаимодействия горячих носителей заряда с интерфейсами в слоистых структурах на основе кремния, в разработку научных основ моделирования деградационных процессов, вызываемых горячими носителями заряда. Совокупность представленных в диссертации результатов

можно квалифицировать как значительное научное достижение в области физики полупроводников, способствующее развитию современной твердотельной электроники.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

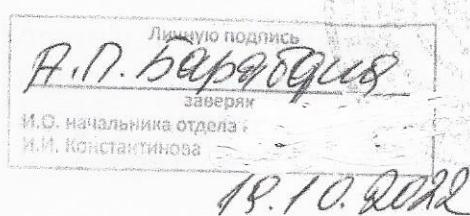
Учитывая актуальность выполненных исследований, научную новизну и практическую значимость полученных результатов, считаю, что представленная диссертация удовлетворяет всем требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор Тягинов Станислав Эдуардович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,
профессор, профессор с возложенными
обязанностями заведующего кафедры
электроники твердого тела
Санкт-Петербургского государственного
университета
19.10.2022

Барабан Александр Петрович

198504, Санкт-Петербург, Петродворец
Ульяновская, д.1
8-812-428-44-98
a.baraban@spbu.ru



Текст документа размещен
в открытом доступе
на сайте СПбГУ по адресу
<http://spbu.ru/science/expert.html>

Документ подготовлен
в порядке исполнения
трудовых обязанностей