

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Тягинова Станислава Эдуардовича
«Моделирование процессов деградации, вызываемых горячими носителями,
в современных кремниевых транзисторах»
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 1.3.11 – физика полупроводников

Современный тренд на скейлинг полевого транзистора (ПТ) включает стремительное уменьшение размеров прибора на фоне куда более медленного снижения его рабочего напряжения. Эта ситуация означает появление сильных электрических полей в ПТ и, как следствие, сильный разогрев носителей. Горячие носители взаимодействуют с границей раздела кремний/окисел, что приводит к генерации дефектов на этой границе и искажению рабочих характеристик ПТ (сдвигу порогового напряжения, снижению подвижности в канале, уменьшению тока стока). Такой паразитный эффект называется «деградацией, вызываемой горячими носителями (ДВГН)» и весьма серьезно ограничивает надежность современного ПТ. Соответственно, моделирование ДВГН, основанное на физических принципах (в отличие от эмпирических моделей), – актуальнейшая задача современной микроэлектроники.

Диссертация посвящена разработке и апробации такого подхода к моделированию ДВГН. Микроскопическим механизмом в основе ДВГН является генерация ловушек на интерфейсе кремний/окисел путем разрыва связей кремний-водород. Процесс разрыва связей может быть одночастичным (ОЧ), когда энергия носителя превышает энергию связи и ее диссоциация происходит при единичном столкновении, и многочастичным (МЧ), когда идет бомбардировка связи несколькими низкоэнергетичными носителями, приводящая к множественному возбуждению колебательных мод связи, её ослаблению и в итоге разрыву. Моделирование темпов этих конкурирующих процессов основано на вычислении плотности распределения электронов/дырок по энергии при решении транспортного уравнения Больцмана. Встраивание заряженных дефектов приводит к локальному искажению профиля зон в ПТ и снижению подвижности носителей. Оба этих компонента учитываются при моделировании характеристик повреждённых приборов. Таким образом, данная модель *впервые* осуществляет решение трех основных подзадач ДВГН в рамках единого вычислительного подхода – (i) задачу моделирования транспорта носителей, (ii) вычисление темпов встраивания дефектов и (iii) симуляции характеристик поврежденных приборов.

Апробация модели проводилась с использованием (i) короткоканальных планарных ПТ, (ii) миниатюризированных ПТ трехмерной архитектуры с каналом в форме плавника с трапециевидным сечением и (iii) мощных транзисторов с высокими рабочими напряжениями, непланарным интерфейсом и размерами в несколько мкм. Модель точно воспроизводит деградационные характеристики транзисторов в широком диапазоне условий испытаний. Получен ряд новых результатов, из которых выделил бы следующие:

1. Оказывается, что даже при длине канала 44 нм ОЧ процесс разрыва связи дает определяющий вклад в ДВГН при высоких напряжениях.
2. В мощных ПТ с длиной интерфейса ~3.5 мкм и напряжениях перегрузки ~20В МЧ механизм разрыва связей по-прежнему играет значимую роль.
3. Старая картина понимания и моделирования ДВГН требует ревизии – важность ОЧ и МЧ механизмов, как было показано диссертантом, определяется не столько

длиной канала ПТ, сколько его архитектурой в совокупности с условиями перегрузки образца по напряжению.

4. Не существует универсальной температурной зависимости ДВГН. Иными словами, ДВГН в одном и том же ПТ может как усиливаться при нагреве образца, так и ослабляться – в зависимости от условий стресса.

Всесторонняя апробация/верификация модели с привлечением больших объемов экспериментальных данных обеспечивает достоверность результатов. Результаты также докладывались на международных конференциях и публиковались в авторитетных журналах.

Замечаний у меня нет.

Считаю, что диссертационная работа С.Э. Тягинова «Моделирование процессов деградации, вызываемых горячими носителями, в современных кремниевых транзисторах» соответствует всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физ.-мат. наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников.

17 октября 2022 г.



Геннадий Гисакович Берсукер
старший научный сотрудник
Отделения микроэлектронной технологии
Аэрокосмической Корпорации
Адрес:
почтовый ящик 92957 Лос-Анжелес,
Калифорния 90009-2957,
Соединенные Штаты Америки

(Gennadi Bersuker
Senior Scientist
Microelectronics Technology Department
The Aerospace Corporation
P.O. Box 92957
Los Angeles, CA 90009-2957, USA)

e-mail: gennadi.bersuker@aero.org