

ОТЗЫВ НА АВТОРЕФЕРАТ

диссертации С.Э. Тягинова

*«Моделирование процессов деградации, вызываемых горячими носителями,
в современных кремниевых транзисторах»*,

представленной на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук
(специальность: 1.3.11 – физика полупроводников)

В МДП-структурах с ультратонким слоем диэлектрика и приборах на их основе, бомбардировка границы кремний-диэлектрик горячими электронами/дырками приводит к разрыву связей Si-H, которые затем превращаются в амфотерные ловушки. Их наличие изменяет электростатику структуры, так как появляется добавочный зарядовый член в уравнении Пуассона. Такой паразитный эффект возникает независимо от способа появления/введения горячих носителей в зону вблизи кремниевой поверхности (и носит название ДВГН – деградация, вызываемая горячими носителями), но макроскопические проявления, зависят от объекта исследования.

Автор диссертации выбрал для изучения кремниевый полевой транзистор (ПТ), что, во-первых, позволяет рассмотреть большой «набор» таких проявлений, а во-вторых, повышает практическую ценность работы. В ПТ, встраивание дефектов, в числе прочего, приводит к сдвигу V_{th} , уменьшению подвижности, а значит, проводимости канала и тока стока прибора.

Автором была разработана и апробирована модель ДВГН, основанная на физических принципах. Разрыв связей Si-H может осуществляться разными комбинациями «одночастичных» и «многочастичных» процессов бомбардировки связей, что учтено в диссертации. Плотность энергетического распределения электронов df/dE находится решением транспортного уравнения Больцмана. Концентрация дефектов рассчитывается на каждом шаге по времени, а на следующем шаге из-за электростатических отклонений модифицируются и вид df/dE , и темпы разрыва связи.

Безусловно, подобные задачи решались ранее и другими научными группами, но именно разработанная модель охватила все уровни физической картины, лежащей в фундаменте ДВГН: и микроскопическое описание генерации дефектов, и моделирование транспорта носителей, и моделирование токов через электроды транзистора. Разработанная автором модель весьма универсальна и оказывается состоятельной применительно и к декананометровым ПТ, и к мощным приборам. Для последних предложены и некоторые упрощения, позволяющие значительно уменьшить вычислительные ресурсы, требуемые для решения транспортной подзадачи моделирования ДВГН.

Замечания

1. В работе говорится о разрыве связей кремний-водород на границе раздела кремний/диоксид кремния, однако (и этот факт упоминается в диссертации) в современных КМОП транзисторах в качестве подзатворных часто используются так называемые high-*k* диэлектрики. Что изменится, если перейти к HfO₂, Al₂O₃ и др. подобным материалам?
2. Качество выращенных слоев high-*k* диэлектриков обычно значительно уступает качеству пленок SiO₂. К каким последствиям это может привести в контексте деградации, вызываемой горячими носителями?

Хочу подчеркнуть, что сформулированные вопросы никак не влияют на научную значимость работы и ее результатов.

Диссертация С.Э. Тягинова представляет собой законченную работу в актуальном направлении физики полупроводников и микроэлектроники. Её результаты были опубликованы в ведущих научных журналах, а также озвучивались на десятках международных конференций. Диссертационная работа удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, а С.Э. Тягинов заслуживает присуждения ученой степени доктора физ.-мат. наук по специальности 1.3.11 «физика полупроводников».

Андреев Владимир Викторович,
доктор технических наук по специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния, Калужский филиал федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», профессор, заведующий кафедрой проектирования и технологии производства электронных приборов.

Адрес: 248000, Калуга, ул. Баженова, 2
Телефон: (4842) 79-77-91
E-mail: vladimir_andreev@bmstu.ru

« 17 » _____ 10 _____ 2022 г.

_____ В.В. Андреев
подпись

Подпись В.В. Андреева заверяю:
Заместитель директора
по научно-исследовательской работе
Калужского филиала ФГБОУ ВО
«Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)» _____ Е.В. Вершинин