

Труды XXIV научной конференции по радиофизике

**СЕКЦИЯ
«ЭЛЕКТРОНИКА»**

Председатель – С.В. Оболенский, секретарь – Е.С. Оболенская.
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАНОМЕТРОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИЗЛУЧЕНИЙ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

А.Д. Боженкина, И.Ю. Забавичев, М.Ю. Кудряшов, К.А. Насеткин,
Е.С. Оболенская, С.В. Оболенский, А.А. Потехин, А.С. Пузанов, Е.А. Тарасова,
А.Ю. Чурин

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Введение

Основным направлением развития элементной базы цифровой и аналоговой электроники является уменьшение размеров рабочих областей диодных и транзисторных структур, что, в конечном счете, обусловлено улучшением тактико-технических характеристик изделий микро- и наноэлектроники (быстродействия, увеличения объема памяти, увеличения предельных рабочих частот и усиливаемой мощности, снижения уровня шумов и т.д.) при сохранении или даже улучшении стоимостных показателей. Аналогичные процессы (с некоторой задержкой во времени) идут в области разработки специализированной элементной базы, предназначенной для применения в военных и космических системах.

Радиационное воздействие негативно влияет на электронные устройства, приводя к снижению срока службы, внезапным сбоям и отказам. Математическое моделирование реакции элементов на радиационное воздействие позволяет уменьшить объем испытаний, что, в конечном счете, снижает время и общую стоимость разработки как изделий микро- и наноэлектроники, так и радиоэлектронной аппаратуры на их основе. Однако, аналитические и простые численные модели, основанные на линейной суперпозиции радиационных эффектов, зачастую «не работают» для современных сверхвысокочастотных полупроводниковых приборов с субмикронными рабочими областями, динамика физических процессов в которых носит сложный комплексный нелинейный характер.

Традиционные модели переноса носителей заряда основаны на локально-равновесном диффузионно-дрейфовом или квазигидродинамическом приближении. Однако сокращение размеров рабочей области полупроводниковых структур до длины релаксации энергии и импульса электронно-дырочного газа (20...50 нм для Si и GaAs в нормальных условиях) и времени пролета рабочей области до времени релаксации энергии и импульса электронно-дырочного газа (0,1...0,2 пс для Si и GaAs в нормальных условиях) приводит к нарушению условий локальности, что обуславливает рост погрешности расчета характеристик элементов. Анализ реакции субмикронных структур на радиационное воздействие дополнительно требует учета неоднородности дефектообразования и стохастичной природы взаимодействия частиц и излучения с веществом – в результате модель постепенной деградации макроскопических характеристик полупроводника, таких как подвижность и время жизни, при воздействии радиации становится неприменимой. Так как размеры одиночного радиационного нарушения сравнимы с размерами рабочей области субмикронных структур хотя бы по одному из направлений, это приводит к резкому ухудшению характеристик

элемента при образовании кластера радиационных дефектов в рабочей области [1, 2]. Поэтому предпочтительной для субмикронных структур становится вероятностная модель внезапных радиационных отказов. Ключевым параметром данной модели является внутренняя структура одиночного радиационного нарушения – кластера радиационных дефектов. Строгий расчет структуры кластера радиационных дефектов возможен только при помощи метода молекулярной динамики [3]. Однако высокая вычислительная сложность метода молекулярной динамики в совокупности с большим объемом усредняемых данных ставят задачу разработки методов, основанных на приближении сплошной среды. Ввиду того, что время возникновения области разупорядочения лежит в субпикосекундном диапазоне, модель формирования кластера радиационных дефектов должна быть основана на локально-неравновесном приближении тепломассопереноса.

Как отмечалось выше, размеры рабочей области субмикронных полупроводниковых приборов сравнимы с длиной релаксации энергии и импульса электронно-дырочного газа. Это приводит к тому, что электронно-дырочный газ в подобных структурах не успевает термализоваться [4]. Поэтому вопрос о виде функции распределения неравновесных носителей заряда в микрообъеме при воздействии одиночных гамма-квантов и быстрых электронов становится чрезвычайно важным.

Анализ современного состояния исследований

В настоящее время разработан широкий спектр физико-топологических моделей переноса носителей заряда при радиационном воздействии [5, 6], основанные на приближениях: парного взаимодействия – кинетическое уравнение Больцмана и сплошной среды – диффузионно-дрейфовая, электротепловая и квазигидродинамическая системы уравнений. Также для анализа реакции изделий микро- и нанoeлектроники на радиационное воздействие в составе радиоэлектронной аппаратуры применяется метод эквивалентной схемы [6, 7].

В большинстве проводимых в настоящее время исследованиях, расчетная оценка стойкости изделий микро- и нанoeлектроники к воздействию фотонных и корпускулярных излучений носит детерминированный характер. Имеющие место немногочисленные вероятностные модели основаны на предположении существования технологического разброса параметров полупроводниковых структур до облучения либо существенно опираются на результаты статистической обработки экспериментальных данных, либо предполагают расчеты по детерминированным моделям с разным набором параметров.

Как отмечалось выше, важной особенностью реакции субмикронных полупроводниковых структур на радиационное воздействие является вероятностный характер сбоев и отказов, обусловленный стохастической природой взаимодействия проникающих излучений с веществом на микроуровне. Таким образом, не отрицая влияния технологического разброса параметров, существует дополнительный источник вероятностного характера радиационной реакции изделий микро- и нанoeлектроники, причем с уменьшением размера рабочей области его вклад будет увеличиваться [8]. Это обстоятельство важно учитывать при планировании облучательных экспериментов и их интерпретации.

Достигнутые результаты

В рамках инициативных научно-исследовательских работ на кафедре квантовой радиофизики и электроники радиофизического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского разработан и внедрен в опытную эксплуатацию на ряде нижегородских предприятий пакет прикладных программ для комплексного анализа переноса носителей заряда в субмикронных полупроводниковых структурах в момент формирования кластера радиационных дефектов и релаксации возбужденных неравновесных радиационно-генерированных электронно-дырочных пар. Верификация пакета прикладных программ осуществлена путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными, в том числе оригинальными [9-11].

Применение результатов моделирования при разработке изделий микро- и наноэлектроники позволило уменьшить объем экспериментальных исследований, сократить сроки и стоимость проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Работа выполнена в рамках базовой части Государственного задания, проект 0729-2020-0057

- [1] Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50, № 12. С. 1706.
- [2] Забавичев И.Ю., Потехин А.А., Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, № 11. С. 1520.
- [3] Забавичев И.Ю., Потехин А.А., Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53, № 9. С. 1279.
- [4] Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2020. Т. 54, № 8. С. 791.
- [5] Кудряшов Н.А., Кучеренко С.С., Сыцько Ю.И. // Математическое моделирование. 1989. Т. 1, № 12. С. 1.
- [6] Demarima N.V., Obolensky S.V. // Microelectronics Reliability. 1999. Vol. 39. P. 1247.
- [7] Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988, 296 с.
- [8] Александров П.А., Жук В.И., Литвинов В.Л. // Природа. 2015. Т. 104, № 1. С. 14.
- [9] Тарасова Е.А., Демидова Д.С., Оболенский С.В., Фефелов А.Г., Дюков Д.И. // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46, № 12. С. 1587.
- [10] Тарасова Е.А., Оболенский С.В., Галкин О.Е., Хананова А.В., Макаров А.Б. // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, № 11. С. 1543.
- [11] Тарасова Е.А., Оболенский С.В., Венедиктов М.М., Боженькина А.Д., Елсин В.В., Чуков Г.В., Метелкин И.О., Кревский М.А., Дюков Д.И., Фефелов А.Г. // Физика и техника полупроводников. 2018. Т. 52, № 12. С. 1414.

ТЕРАГЕРЦОВОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ КЛАСТЕРА РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ГЕТЕРОНАНОСТРУКТУРАХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ИЗДЕЛИЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

И.Ю. Забавичев¹⁾, В.А. Козлов²⁾, Е.С. Оболенская¹⁾, С.В. Оболенский¹⁾, Д.Г. Павельев¹⁾, А.А. Потехин¹⁾, А.С. Пузанов¹⁾, Е.А. Тарасова¹⁾, А.Ю. Чурин¹⁾

¹⁾ ННГУ им. Н.И. Лобачевского

²⁾ Институт физики микроструктур РАН

Введение

Известно, что радиационное воздействие излучений космического пространства и ядерного взрыва негативно влияет на электронные устройства, приводя к снижению срока службы, внезапным сбоям и отказам, а также радиационно-индуцированному пробоям. Математическое моделирование реакции элементов на радиационное воздействие позволяет уменьшить число циклов макетирования изделий нанoeлектроники при разработке и проведении испытаний на радиационную стойкость, что сокращает сроки и снижает общую стоимость научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Однако перенос носителей заряда в современных гетеронаноструктурах при радиационном воздействии имеет ряд особенностей, обусловленных усилением влияния неоднородности дефектообразования и ионизации, а также возможностью полного перекрытия канала современного полевого нанотранзистора или базы биполярного транзистора одиночным кластером радиационных дефектов, который формируют быстрые нейтроны и тяжелые заряженные частицы. Разогрев неравновесных носителей заряда в момент формирования кластера радиационных дефектов формирует импульс тока в гетеронаноструктуре, амплитуда, а также длительности фронта и спада которого существенным образом зависят от энергии рожденных при дефектообразовании электронов и дырок. Ранее подобные эффекты при моделировании переноса носителей заряда и анализе радиационной стойкости изделий нанoeлектроники не учитывались. Теоретически и экспериментально показано изменение коэффициента усиления нанoeлектронных (до 30 нм) транзисторов при нейтронном воздействии не только в сторону уменьшения, что хорошо объясняется традиционной теорией, но и в сторону увеличения [1]. Последнее может быть объяснено только особенностями протекания «горячих» носителей заряда через кластер радиационных дефектов.

Характеристики кластера радиационных дефектов (его размеры, степень «рыхлости» и т.д.) определяют динамику рассеяния основных носителей заряда и рекомбинацию неосновных носителей заряда в гетеронаноструктурах. Таким образом, моделирование фемтосекундных процессов транспорта электронов и дырок (как рожденных при кластерообразовании, так и пролетающих через область кластера) позволяет учесть особенности переноса (изменение частоты рассеяния как на радиационных дефектах, так и на оптических фононах) из-за изменения энергии носителей заряда. Это принципиально изменяет процедуру анализа радиационной стойкости изделий нанoeлектроники, но для реализации требует детальной информации о процессе фор-

мирования и стабилизации кластера радиационных дефектов в многослойных полупроводниковых гетеронаноструктурах.

Формирование кластера радиационных дефектов относится к сверхбыстрым процессам (10-1000 фс) и экспериментально на начальной стадии еще не изучено. Ранее была впервые предложена методика детектирования импульса терагерцового излучения, возникающего в момент формирования кластеров радиационных дефектов при импульсном нейтронном облучении специальной сборки из полупроводниковых диодов [2]. Анализ спектра указанного импульса позволяет получить информацию о фемтосекундных процессах формирования кластера радиационных дефектов, включая динамику разогрева электронно-дырочного газа при радиационном воздействии.

Следует отметить, что ранее подобные эксперименты не проводились, так что в используемых в настоящее время в системах автоматизированного проектирования изделий микро- и наноэлектроники полностью отсутствуют методики моделирования транспорта горячих носителей через гетеронаноструктуру диода или транзистора в момент формирования кластера радиационных дефектов. Из-за ограничений, связанных с санкциями, отсутствуют возможности моделирования сбоев при нейтронном облучении. Из-за того, что характерные размеры такого кластера сопоставимы с размерами активных областей современных транзисторов (10-1000 нм), а характерные времена процессов формирования сопоставимы с временами переключения транзисторов (пролета электронов через активную область прибора), моделирование процессов сбоя микросхем в настоящее время проводится весьма грубо с использованием поправок, основанных на эмпирических данных об интегральном количестве сбоев микросхем за время действия радиационного излучения. Такой подход серьезно затрудняет проектирование специализированных радиационно-стойких микросхем.

Анализ современного состояния исследований

Задача исследования быстропротекающих процессов возникает во многих областях физики, химии и биологии. В настоящее время основным методом исследования фундаментальных сверхбыстрых процессов в веществе являются измерения в схеме «накачка-зондирование». Однако, несмотря на достижения фемтосекундного временного разрешения [3, 4], указанные методы регистрации зависят от точного повторения исследуемого сверхбыстрого события во время сканирования. Следовательно, эти методы неприменимы для визуализации стохастических и неповторяющихся переходных явлений, к числу которых относятся фемтосекундные процессы формирования и стабилизации кластера радиационных дефектов в полупроводниковых структурах.

Экспериментально процесс формирования кластера радиационных дефектов на начальной фемтосекундной стадии еще не изучен [5]. В работе [2] впервые была предложена методика терагерцового детектирования процессов формирования и стабилизации кластера радиационных дефектов в полупроводниковых структурах. Основная идея заключается в том, что в момент формирования и стабилизации кластера радиационных дефектов возникает слабый импульс фемтосекундной (10-1000 фс) длительности, который может быть зарегистрирован набором чувствительных приемников терагерцового излучения, каждый из которых настроен на свою частоту. Впервые предложено форму импульса излучения, отражающую динамику

формирования и стабилизации кластера радиационных дефектов, восстанавливать через преобразование Фурье «частота-время». Позднее в работе [6] предложен схожий подход фемтосекундной визуализации в режиме реального времени, используя принцип пространственно-временной дуальности, с последующим восстановлением сигнала через преобразование Фурье «пространство-время».

В настоящее время моделирование переноса носителей заряда в полупроводниковых структурах проводится при помощи системы автоматизированного проектирования TCAD [7, 8], которая имеет ряд экспортных ограничений, связанных с расчетом реакции изделий микро- и нанoeлектроники на радиационное воздействие. Кроме того, зарубежные программные продукты практически невозможно проверить на наличие «закладок», неявных преднамеренных ошибок и т.д. В литературе [9] отмечается ряд недостатков TCAD при моделировании гетеронаноструктур. Ситуация усугубляется при анализе радиационного воздействия, так как модель переноса носителей заряда в TCAD основана на локально-равновесном приближении, что дает большую погрешность при моделировании сверхбыстрых процессов релаксации фототока в полупроводниковых структурах [10] при воздействии одиночных тяжелых заряженных частиц и быстрых нейтронов (0,1-1000 МэВ).

Метод исследования

В связи с развитием техники терагерцового эксперимента (с использованием ламп бегущей волны с умножением частоты на выходе или квантовых каскадных лазеров, а также чувствительных сверхбыстродействующих детекторов) и уменьшением размеров перспективных полупроводниковых приборов до значений сравнимых с величиной одного кластера радиационных дефектов, в настоящее время становится возможной организация эксперимента по изучению фемтосекундных (10-1000 фс) процессов, происходящих при радиационном воздействии на современные полупроводниковые приборы. Эксперимент по терагерцовой регистрации процессов формирования кластера радиационных дефектов может быть организован следующим образом. Вблизи источника мгновенных нейтронов спектра деления – импульсного ядерного реактора – необходимо разместить исследуемый образец, представляющий собой сборку параллельно включенных нанодиодов, соединенных с терагерцовой антенной, излучающей генерируемый при облучении терагерцовый сигнал. В цепи питания сборки диодов от постоянного источника напряжения следует предусмотреть возможность съема сигнала с сопротивления нагрузки с использованием радиочастотного кабеля. Отдельно следует контролировать зависимость интенсивности нейтронного излучения от времени стандартным детектором.

Благодаря тому, что характерные времена протекающих процессов лежат в рабочем диапазоне характерных времен переключения детекторов, можно осуществить самодетектирование процессов, протекающих в приборе. Детектор частиц будет сам являться источником электрического сигнала терагерцового диапазона частот. Также возможно произвести регистрацию терагерцовых процессов за счет использования детектора в режиме смесителя внешнего (опорного) электромагнитного сигнала и внутреннего сигнала детектора, возникающего за счет процессов транспорта неравновесных носителей заряда. В качестве детектора может быть использован диод Шоттки или иная структура с малым временем реакции.

Схема приемной части регистратора может быть реализована по аналогии со схемой, примененной в работе [11] для генерации гармоник терагерцового излучения умножением частоты. Схема проведения эксперимента показана на рис. 1.

В качестве приемной антенны может быть использована как рупорная антенна, так и диэлектрическая линза для частот более 1 ТГц. Весь приемный тракт может быть размещен в криостате для повышения чувствительности. В качестве гетеродина

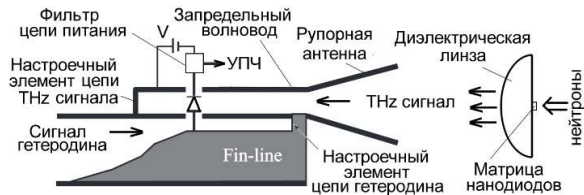


Рис. 1

предлагается использовать генератор на лампах обратной волны миллиметрового диапазона частот (либо квантовый каскадный лазер), так что детектирование будет происходить на определенных гармониках сигнала генератора, т.е. «инверсно» по отношению к процессам, обсужденным в работе [11]. Для ограничения влияния на приемный элемент паразитных излучений с частотами меньше исследуемых, предлагается применить запредельный терагерцовый волновод. Применение такого волновода было, например, успешно использовано в работе [12] для выделения слабого импульсного сигнала с частотой порядка 1 ТГц на фоне сильного (порядка 1 кВт) сигнала с частотой порядка 0,32 ТГц. Анализ терагерцовых сигналов, генерируемых матрицей диодов, даст возможность оценить длительность и фронт единичного импульса терагерцового излучения.

Работа выполнена в рамках базовой части Государственного задания, проект 0729-2020-0057

- [1] Оболенский С.В. // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2002. № 6. С. 310.
- [2] Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А., Волкова Е.В., Павельев Д.Г. // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49, № 12. С.1585.
- [3] Schaffer С.В., Nishimura N., Glezer E.N., Kim А.М., Mazur E. // Opt. Express. 2002. Vol. 10. P. 196.
- [4] Velten A. et al. // Nature Communications. 2012. Vol. 3. P. 745.
- [5] Калинин Б.А. Физическое материаловедение. Том 4. Физические основы прочности. Радиационная физика твердого тела. Компьютерное моделирование. – М.: МИФИ, 2008, с. 231.
- [6] Liang J., Zhu L., Wang L.V. // Light: Science & Applications. 2018. Vol. 7, № 42. P. 1.
- [7] <https://www.synopsys.com>
- [8] <https://www.silvaco.com>
- [9] Vasileska D., Goodnick S.M., Klimeck G. Computational Electronics. Semiclassical and Quantum Device Modeling and Simulation. – CRC Press
- [10] Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2018. Т. 52, № 11. С. 1295.
- [11] Павельев Д.Г., Кошуринов Ю.И., Иванов А.С. и др. // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46, № 1. С. 125.
- [12] Belyantsev A.M., Kozlov V.A., Piskaryov V.I. // Infrared Physics. 1981. Vol. 21. P. 79.

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

**И.Ю. Забавичев, Е.С. Оболенская, С.В. Оболенский, А.А. Потехин, А.С. Пузанов,
Е.А. Тарасова**

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Введение

Требования к скорости передачи данных неуклонно растут. Решение данной задачи может быть достигнуто только расширением полосы канала связи, что неизбежно требует увеличения частоты несущей сигнала вплоть до миллиметрового диапазона длин волн. Это приводит к необходимости разработки источников и приемников терагерцового излучения, в том числе работающих в неблагоприятных условиях внешней среды, например, при радиационном воздействии. Решение данной задачи позволит ускорить и удешевить процесс разработки радиационно-стойких полупроводниковых источников и приемников терагерцового излучения.

Анализ современного состояния исследований

В последние годы идет исследование взаимодействия различных видов фотонного и корпускулярного излучений полупроводниковыми гетеронаноструктурами, а также с составными частями радиоэлектронной аппаратуры: интегральными схемами и дискретными полупроводниковыми приборами [1]. С одной стороны, важность подобных исследований обусловлена проблемой радиационной стойкости военных и космических систем [2], а с другой стороны – развитием и все большим применением радиационных технологических процессов, использующихся как для изготовления, так и во время испытаний полупроводниковых устройств на радиационную стойкость [3]. Воздействие радиации приводит к образованию дефектов и ионизации полупроводника [4]. Радиационные дефекты условно можно разделить на точечные (вакансия и атом в междоузлии), комплексы дефектов (например, вакансия – атом примеси) и кластеры радиационных дефектов, то есть скопления точечных дефектов и их комплексов, образующиеся при воздействии быстрых нейтронов, космических протонов и тяжелых заряженных частиц. Взаимодействие быстрых нейтронов (с энергией в диапазоне 0,1...1000 МэВ) с полупроводниковыми структурами приводит к тому, что частица выбивает из кристаллической решетки один из атомов вещества, называемый первичным атомом отдачи. Этот атом с достаточно высокой энергией (до сотен кэВ), двигаясь в среде, сталкивается с атомами вещества, в свою очередь, выбивая их из занимаемого положения в узлах кристаллической решетки, и в результате каскад разветвляется наподобие дерева [5].

Характерное время движения первичного атома отдачи, формирующего каскад смещений и скопления точечных дефектов, лежит в пределах 10...100 фс. Затем в течение 1...1000 пс происходит стабилизация каскада столкновений, сопровождающаяся рекомбинацией существенной доли точечных дефектов. До сих пор динамика процессов формирования каскада столкновений исследовалась лишь с помощью анализа пролета быстрых частиц через тонкие фольги, когда анализируется состав энер-

гетическое и угловое распределение выбитых с противоположной от облучаемой стороны частиц [6, 7]. В преддверии развития радиационно-стойких терагерцовых систем связи и обработки информации необходимо исследовать динамику пикосекундных процессов каскадообразования и разработать экспериментальные методики непосредственно измерения указанных процессов *in situ* [8].

Поглощение радиационного излучения в субмикронных структурах вблизи границ раздела материалов имеет свои особенности [9]. Различия в атомных весах, плотности, сечениях взаимодействия с фотонами и быстрыми частицами порождают неравновесные процессы на границах раздела, приводящие как к усилению радиационного воздействия, так и к его ослаблению. Характерные длины проявления подобных эффектов сравнимы с размерами рабочих областей современных приборов (порядка 30...100 нм), поэтому неоднородности в дефектообразовании и ионизации, разогреве электронного газа и возникновении квантово-размерных структур кластеров радиационных дефектов [10] приводят к качественному изменению процесса протекания тока в активных областях наноприборов. Несмотря на то, что длины рабочих областей современных приборов сравнимы с длиной бесстолкновительного пролета электронов и, казалось бы, радиационные дефекты не должны влиять на функционирование приборов, при некоторых значениях напряженностей электрических полей это влияние вызывает улучшение характеристик субмикронных приборов [11].

Для анализа движения носителей заряда в полупроводниковом материале и моделирования поглощения радиационного излучения в многослойных композициях разработан целый ряд математических моделей, в том числе, основанных на методе частиц (с использованием математической процедуры Монте-Карло) [12]. Но до сих пор при расчетах радиационной стойкости полупроводниковых приборов используются упрощенные методы моделирования, основанные на замене исследуемого прибора эквивалентной схемой. Эта методика оправдана для приборов, имеющих микронные топологические нормы, и не позволяет учесть перечисленные выше физические эффекты, связанные с нанометровыми размерами активных областей приборов и кластеров дефектов.

Предлагаемый для анализа действия радиации на приборы наноэлектроники теоретический подход должен позволять:

- 1) проводить расчет пространственной структуры кластеров дефектов и их распределения в пространстве в многослойных гетеронаноструктурах;
- 2) моделировать бесстолкновительное движение электронов и прерывающие это движение процессы столкновений с радиационными дефектами, рассчитывать функции распределения электронов по энергии и заполнение энергетических долин в диапазоне времен от 0,01 до 1000 пс и более; использовать результаты аналитических расчетов и экспериментальные данные в качестве начальных и граничных условий;
- 3) проводить расчет статических и динамических параметров приборов наноэлектроники и радиотехнических схем в целом.

Предлагаемый для анализа действия радиации на приборы наноэлектроники экспериментальный подход должен позволять:

- 1) исследовать описанные выше процессы с применением комплексного анализа параметров материалов, многослойных гетеронаноструктур и приборов наноэлектроники;
- 2) в рамках одного анализируемого объекта проводить комплекс измерений, позволяющих определить максимальное число параметров как материала, так и прибора;
- 3) благодаря использованию комплекта измерительных диодов-детекторов терагерцового излучения, настроенных на различные частоты, регистрировать фемто- и пикосекундные процессы формирования каскада смещений безосциллографическим методом за счет регистрации амплитуды и длительности набора импульсов тока и сопоставления их параметров в указанном наборе.

Достигнутые результаты

В настоящее время разработана и внедрена в промышленность специальная методика контроля электрофизических параметров полупроводниковых слоев гетеронаноструктур на основе Si/SiGe, GaAs/AlGaAs/InGaAs, GaN/AlGaN, позволяющая получать исходные данные для проведения моделирования с малыми погрешностями, что позволяет проводить процесс многопараметрической оптимизации как слоевого состава и иных характеристик гетеронаноструктур, так и геометрических параметров диодов и транзисторов на их основе.

Впервые обнаружена и исследована зависимость времен релаксации энергии и импульса носителей заряда в объемных Si, GaAs и квантово-размерных структурах на их основе от флюенса нейтронного излучения и дозы гамма-излучения. Теоретически исследованы эффекты всплеска скорости и транспорт электронов в нанометровых структурах сверхбыстродействующих диодов и транзисторов в момент и после радиационного воздействия [13].

Развиты физико-топологические методы моделирования радиационных эффектов в гетеронаноструктурах на основе алгоритма Монте-Карло [12, 14], а также в квази-гидродинамическом и диффузионно-дрейфовом приближениях [15]. Разработаны пакеты прикладных программ, позволяющие проводить компьютерное моделирование радиационных эффектов, в том числе, с использованием суперкомпьютера «Лобачевский» [16-18]. Проведен большой объем экспериментальных исследований радиационной стойкости диодов и транзисторов Шоттки [19], полевых транзисторов с двумерным электронным газом (HEMT) [20-22] и интегральных схем на их основе. Разработаны и внедрены в промышленность методики контроля мощности и частоты выходных сигналов СВЧ генераторов и усилителей в момент воздействия импульса ионизирующих излучений, генерируемых линейными ускорителями и ядерными реакторами.

Работа выполнена в рамках базовой части Государственного задания, проект 0729-2020-0057

[1] Александров П.А., Жук В.И., Литвинов В.Л. // Природа. 2015. Т. 104, № 1. С. 14.

- [2] Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988, 296 с.
- [3] Бутин В.И., Зинченко В.Ф., Романенко А.А. Система радиационных испытаний изделий электронной техники. – Владимир: Изд-во ВГУ, 2002, 190 с.
- [4] Вавилов В.С. Действие излучений на полупроводники. – М.: Физматгиз, 1963, 264 с.
- [5] Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50, № 12. С. 1706.
- [6] Аккерман А.Ф., Никитушев Ю.М., Ботвин В.А. Решение методом Монте-Карло задач переноса быстрых электронов в веществе. – Алта-Ата: Наука, 1972, 163 с.
- [7] Аккерман А.Ф., Грудский М.Я., Смирнов В.В. Вторичное электронное излучение из твердых тел под действием гамма-квантов. – М.: Энергоатомиздат, 1986, 168 с.
- [8] Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А., Волкова Е.В., Павельев Д.Г. // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49, № 12. С. 1585.
- [9] Демарина Н.В., Оболенский С.В. // Физика и химия обработки материалов. 2001. № 1. С. 20.
- [10] Громов В.Т., Китаев М.А., Киселева Е.В., Козлов В.А., Оболенский С.В., Шукайло В.П. // Микроэлектроника. 2005. Т. 34, № 6. С. 424.
- [11] Оболенский С.В. // Микроэлектроника. 2004. Т. 33, № 6. С. 153.
- [12] Демарина Н.В., Оболенский С.В. // Журнал технической физики. 2002. Т. 72, № 1. С. 66.
- [13] Забавичев И.Ю., Оболенская Е.С., Потехин А.А., Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, № 11. С. 1489.
- [14] Пузанов А.С., Оболенский С.В. // Микроэлектроника. 2012. Т. 41, № 4. С. 304.
- [15] Киселев В.К., Оболенский С.В., Пузанов А.С., Скупов А.В. // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 2. С. 10.
- [16] Потехин А.А., Забавичев И.Ю., Рябов А.А., Линев А.В., Чуринов А.Ю., Оболенский С.В., Ротков Л.Ю. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2015. № 2. С. 24.
- [17] Потехин А.А., Линев А.В., Пузанов А.С., Оболенский С.В. // В кн.: Труды международной конференции «Суперкомпьютерные дни в России» (г. Москва, 28-29 сентября 2015 г.). – М.: Изд-во МГУ, 2015. С. 555.
- [18] Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А., Волкова Е.В., Потехин А.А., Забавичев И.Ю. // В кн.: Труды международной конференции «Суперкомпьютерные дни в России» (г. Москва, 28-29 сентября 2015 г.). – М.: Изд-во МГУ, 2015. С. 585.
- [19] Оболенский С.В. // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2002. № 6. С. 31.

- [20] Тарасова Е.А., Хананова А.В., Оболенский С.В., Земляков В.Е., Свешников Ю.Н., Смотрин Д.С., Иванов В.А., Егоркин В.И., Мтдведев Г.В. // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50, № 3. С. 331.
- [21] Тарасова Е.А., Оболенский С.В., Галкин О.Е., Хананова А.В., Макаров А.Б. // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, № 11. С. 1543.
- [22] Тарасова Е.А., Оболенский С.В., Венедиктов М.М., Боженкина А.Д., Елессин В.В., Чуков Г.В., Метелкин И.О., Кревский М.А., Дюков Д.И., Фелелов А.Г. // Физика и техника полупроводников. 2018. Т. 52, № 12. С. 1414.

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛОТНЫХ КЛАСТЕРОВ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

И.Ю. Забавичев, А.А. Потехин, А.С. Пузанов

ННГУ им. Лобачевского

Введение

Уменьшение топологических норм изделий микроэлектроники увеличивает их чувствительность к сбоям и отказам, вызванных воздействием отдельных ядерных частиц [1] и первичных атомов отдачи, что обуславливает актуальность моделирования процессов ионизации и дефектообразования в субмикронных полупроводниковых структурах при воздействии проникающих излучений. Это связано с тем, что размеры разупорядоченной области – кластера радиационных дефектов, образовавшегося в результате воздействия иона, становятся сопоставимы с размерами активной области современных полупроводниковых приборов, которая может достигать всего нескольких десятков нанометров [2]. Каскады атомных смещений обогатены точечными радиационными дефектами: вакансиями и междоузельными атомами, которые приводят к образованию системы глубоких уровней в запрещенной зоне полупроводника, в результате чего увеличивается скорость рекомбинации носителей заряда [3] и снижается их подвижность [4], что приводит к деградации характеристик полупроводниковых приборов. Таким образом, для изделий наноэлектроники даже один кластер радиационных дефектов может эффективно перекрыть канал полевого или базу биполярного транзистора. В результате, поражение наноструктур определяется пространственным распределением радиационных дефектов в области разупорядочения.

Для детального анализа физических процессов, протекающих в субмикронных полупроводниковых приборах наноэлектроники на микроуровне, применяется метод физико-топологического моделирования, заключающийся в численном расчете электрофизических параметров прибора на основе данных о его структуре: химическом составе, профиле легирования примеси и геометрических размерах каждого слоя. Применение данного подхода для оценки изменения электрофизических характеристик прибора во время и после радиационного воздействия требует детальной информации о каскадах атомных смещений: их геометрических размерах и концентрации дефектов. Также необходимо учитывать, что для высокоэнергичных носителей заряда каскад радиационных дефектов распадается на отдельные субкаскады, которые являются рассеивающими центрами горячих электронов [5, 6].

В зависимости от энергии заряженной частицы, каскады атомных смещений подразделяют на разреженные, в которых длина пробега движущихся частиц существенно больше межатомного расстояния и плотные, которые характеризуются малой длиной пробега частиц [7]. Реальные кластеры радиационных дефектов сочетают в себе признаки как разреженных, так и плотных каскадов, поэтому разные стадии развития разупорядоченной области требуют численной оценки её размеров с различными временными и пространственными масштабами.

Целью данной работы являлось моделирование формирования одиночного кластера радиационных дефектов в кремнии, образующегося при воздействии потока

мгновенных нейтронов спектра деления. Решение поставленной задачи проводилось при помощи метода молекулярной динамики на суперкомпьютере «Лобачевский».

Математическая модель

В настоящее время рассмотрение процесса формирования разупорядоченной области радиационных дефектов возможно только с привлечением численного моделирования. Основными методами, описывающими образование дефектов в твердом теле при радиационном взаимодействии, являются метод молекулярной динамики [8] и метод Монте-Карло (метод парных взаимодействий) [5].

Метод молекулярной динамики основан на использовании II закона Ньютона для каждого атома вещества:

$$m_i \ddot{\mathbf{r}}_i = -\nabla_{\mathbf{r}_i} U(\mathbf{r}) + F_{\text{внеш}}, \quad (1)$$

где $U(\mathbf{r})$ – межатомный потенциал взаимодействия, m_i – масса i -го атома, \mathbf{r}_i – положение в пространстве i -го атома, $F_{\text{внеш}}$ – внешняя сила. В общем виде потенциал межатомного взаимодействия представляет собой следующее выражение:

$$U(\mathbf{r}) = \sum_i \sum_{j>i} U_2(\mathbf{r}_{ij}) + \sum_i \sum_{j>i} \sum_{k>j} U_3(\mathbf{r}_{ij}, \mathbf{r}_{ik}, \theta_{ijk}) + \dots, \quad (2)$$

где $U_2(\mathbf{r})$ описывает зависимость потенциальной энергии от расстояния между каждой парой атомов системы, а потенциал тройного взаимодействия $U_3(\mathbf{r})$ а также потенциалы более высоких порядков описывают взаимодействие атомов системы в зависимости от их взаимного расположения. На сегодняшний день на основе обширных экспериментальных исследований создано большое количество различных моделей, описывающих потенциалы межатомного взаимодействия различных порядков. В итоге, для конечного набора атомов получается система уравнений, решением которой в каждый момент времени являются координаты и вектор скорости каждого атома.

В качестве межатомного потенциала рассеяния был выбран потенциал Стиллера-Вибера [9], который является потенциалом третьего порядка и описывается следующим выражением:

$$U_2(r_{ij}) = \begin{cases} A_{ij} \varepsilon_{ij} \left[B_{ij} \left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}} \right)^{p_{ij}} - \left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}} \right)^{q_{ij}} \right] \cdot \exp\left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij} - a_{ij} \sigma_{ij}} \right), & r_{ij} \leq a_{ij} \sigma_{ij}, \\ 0, & r_{ij} \geq a_{ij} \sigma_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

$$U_3(r_{ij}, r_{ik}, \theta_{ijk}) = \lambda_{ijk} \varepsilon_{ijk} [\cos(\theta_{ijk}) + \cos(\theta_{0ijk})]^2 \exp\left(\frac{\gamma_{ij} \sigma_{ij}}{r_{ij} - a_{ij} \sigma_{ij}} \right) \exp\left(\frac{\gamma_{ik} \sigma_{ik}}{r_{ik} - a_{ik} \sigma_{ik}} \right),$$

где A , B , p , q , a , λ и γ – безразмерные параметры модели; $a\sigma$ – расстояние отсечки, ε – размерный коэффициент.

Результаты расчетов и их обсуждение

Для моделирования процесса формирования кластера радиационных дефектов в кремнии под действием потока быстрых нейтронов мгновенного спектра деления использовался пакет прикладных программ LAMMPS [10]. В качестве объекта исследований была выбрана кремниевая структура с размерами $400 \times 400 \times 400$ А (4096000 атомов), в которой моделировалась эволюция разупорядоченной области атомных

смещений в течение 100 пикосекунд, образованной первичным атомом отдачи кремния с кинетической энергией 3 кэВ. Данное значение энергии было выбрано из расчета, что каскад смещений не будет распадаться на отдельные субкаскады, то есть является плотным. Вдоль трех ортогональных направлений использовались периодические граничные условия, тем самым, моделируя поведение атомов в объемном материале. Для определения местоположения дефектов в моделируемой системе использовался метод, основанный на построении ячеек Вигнера-Зейтца.

На рисунке представлена динамика изменения общего числа дефектов и объема кластера радиационных дефектов в течение всего времени моделирования. Разупорядоченная область аппроксимировалась эллипсоидом вращения с помощью алгоритма, представленного в работе [11].

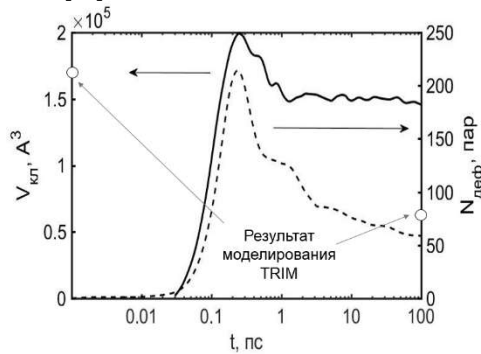


Рис.

Как следует из рисунка, в процессе формирования кластера радиационных дефектов можно выделить 4 характерные стадии: баллистический участок (до 0,04 пс), в течение которого первичный атом отдачи движется практически без столкновений; участок термического расширения (от 0,04 до 0,2 пс), на протяжении которого число дефектов в кластере стремительно нарастает; стадия первичной стабилизации (от 0,2 до 0,5 пс), которая характеризуется резким уменьшением числа дефектов за счет рекомбинации близких пар Френкеля, и стадия быстрого отжига (от 0,5 пс), которая может длиться несколько наносекунд, сопровождаясь при этом плавным по сравнению со стадией первичной стабилизации уменьшением числа дефектов за счет отжига. Медленный темп рекомбинации дефектов на последней стадии объясняется термостимулированной диффузией дефектов в остывающем объеме полупроводника, поэтому для адекватного описания последующего отжига необходим больший промежуток времени физического моделирования (от единиц секунд до нескольких часов). Стоит отметить, что объем кластера радиационных дефектов на стадии быстрого отжига практически не меняется, в то время как число дефектов в нем медленно уменьшается, что связано с рекомбинацией пар дефектов, расположенных в центре, а не на периферии разупорядоченной области.

Заключение

Подводя итоги, необходимо отметить, что в настоящее время получение детальной информации об этапах формирования каскадов атомных смещений вплоть до стадии быстрого отжига радиационных дефектов за приемлемое время возможно только при помощи метода классической молекулярной динамики. Время расчета одной реализации формирования каскада смещений на одном сегменте суперкомпьютера «Лобачевский» при его 10% загрузке составило около 6 часов.

Представленный в настоящей работе подход можно распространить на случай моделирования каскадов атомных столкновений в перспективных полупроводниковых материалах. Результаты моделирования, полученные с помощью метода Монте-Карло, в этом случае можно использовать в качестве проверки при выборе межатомного потенциала взаимодействия для расчетов методом молекулярной динамики. Для моделирования отжига радиационных дефектов на больших временных масштабах целесообразнее применять континуальные методы тепломассопереноса в виду их меньшей вычислительной сложности, несмотря на уменьшение точности получаемых результатов.

- [1] Чумаков А.И. Действие космической радиации на ИС. – М.: Радио и связь, 2004, 319 с.
- [2] Забавичев И.Ю., Потехин А.А., Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, № 11. С. 1520.
- [3] Srour J. R., Curtis Jr. O. L. // Journal of Applied Physics. 1969. Vol. 40, № 10. P. 4082.
- [4] Stein H. J. // Journal of Applied Physics. 1960. Vol. 31, № 8. P. 1309.
- [5] Киселева Е.В., Оболенский С.В. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2004. № 1-2. С. 46.
- [6] Забавичев И.Ю., Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2020. Т. 54, № 9. С. 945.
- [7] Калинин Б.А. и др. Физическое материаловедение. Том 4. Физические основы прочности. Радиационная физика твердого тела. Компьютерное моделирование. – М.: МИФИ, 2008, 696 с.
- [8] Забавичев И.Ю., Потехин А.А., Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53, № 9. С. 1279.
- [9] Stillinger F.H., Weber T.A. // Physical Review B. 1985. Vol. 31, № 8. P. 5262.
- [10] Plimton S. // Journal Computational Physics. 1995. Vol. 117, № 1. P. 1.
- [11] Khachiyan L.G. // Mathematics of Operations Research. 1996. Vol. 21, № 2. P. 307.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЕДИНИЧНЫХ КЛАСТЕРОВ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

И.Ю. Забавичев, А.А. Потехин, А.С. Пузанов

ННГУ им. Лобачевского

Введение

В современных приборах нанoeлектроники характерное время пролета носителей заряда через активную область сопоставимо с временами формирования кластера радиационных дефектов, которые составляют величину ~ 100 фемтосекунд [1]. Это позволяет проводить уникальные исследования, направленные на изучение физики формирования разупорядоченных областей при воздействии потока частиц [2]. Также размеры активных областей современных полупроводниковых приборов становятся сопоставимы с размерами даже единичных кластеров радиационных дефектов.

В таблице представлены результаты сравнения пространственных и временных характеристик процесса образования кластера радиационных дефектов с характерными размерами и временными параметрами современных приборов нанoeлектроники – диодных гетероструктур, планарных диодов Ганна и полевых транзисторов, изготовленных по технологии «кремний на изоляторе».

Табл.

Характеристика	Временной масштаб	Пространственный масштаб
Кластер радиационных дефектов [3]	Время формирования – 1 пс	Диаметр ядра – 5 нм
Диодная гетероструктура со сверхрешеткой [4]	Предельная частота умножения – 8 ТГц, период колебаний – 0.125 пс	Период сверхрешетки – 6.22 нм
Планарный диод Ганна с δ -легированными слоями [5]	Предельная частота работы – 100 ГГц, период колебаний – 10 пс	Толщина рабочей области – 50 нм
Полевой транзистор, изготовленный по технологии «кремний на изоляторе» [6]	Время переключения – 30 пс	Длина затвора – 65 нм

Из представленной выше информации следует, что оценка влияния единичных кластеров радиационных дефектов на работоспособность перспективных полупроводниковых приборов микро- и нанoeлектроники является актуальной задачей.

Математическая модель

Для количественных расчетов вероятности отказа гетеронаноструктур при воздействии потока нейтронов спектра деления использовались исходные данные работы [7] для топологии полевых транзисторов, изготовленных по технологии «кремний на

изоляторе». Вероятность взаимодействия P интегрального потока нейтронов F_n в объеме V полупроводника с атомами, имеющими концентрацию $N_{ат}$ в простейшем случае может быть оценена по формуле [8-10].

$$P = 1 - \exp(-\sigma F_n V N_{ат}), \quad (1)$$

где σ – усредненное по энергетическому спектру сечение рассеяния нейтронов, которое для большинства полупроводников лежит в пределах нескольких барн [11]. Характеристики кластера радиационных дефектов подставлялись в оригинальный программный комплекс, решающий задачи переноса носителей заряда при радиационном воздействии в диффузионно-дрейфовом [12] и квазигидродинамическом [13] приближениях, а также при помощи алгоритма Монте-Карло [14].

Результаты расчетов и их обсуждение

Результаты расчетов деградации вольтамперных характеристик полевых транзисторов, изготовленных по технологии «кремний на изоляторе», усреднялись по пространственной структуре дефектов в кластере, в результате чего вычислялась вероятность отказа транзистора при заданном уровне нейтронного воздействия, представленная на рисунке. Отдельно рассчитаны вероятности отказа п-канального (—) и р-канального (- - -) полевого транзистора, изготовленного по технологии «кремний на изоляторе», в зависимости от интегрального потока мгновенных нейтронов спектра деления для различных топологических норм: 1 – 0,5 мкм; 2 – 0,35 мкм; 3 – 0,25 мкм; 4 – 0,1 мкм

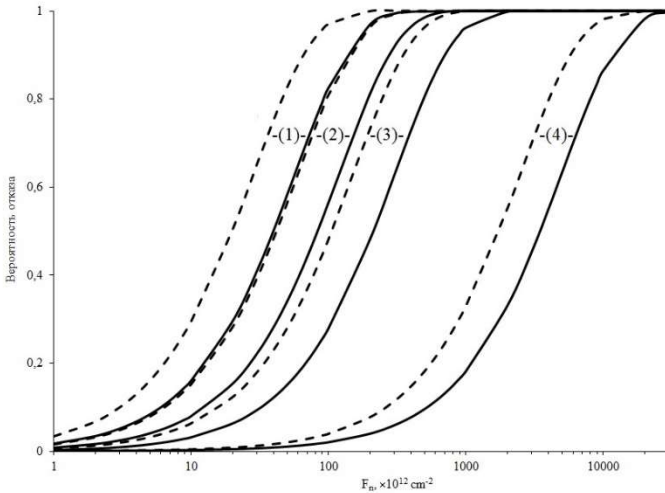


Рис.

Результаты моделирования хорошо совпадают с экспериментальными данными, показывающими экстремально высокую стойкость полевых транзисторов, изготовленных по технологии «кремний на изоляторе», к нейтронному облучению.

- [1] Jay A., Raine M., Richard N., Mousseau N., Goiffon V., et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2017. Vol. 64, N. 1. P. 141.
- [2] Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А., Волкова Е.В., Павельев Д.Г. // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49, № 12. С. 1585.
- [3] Забавичев И.Ю., Оболенская Е.С., Потехин А.А., Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, № 11. С. 1489.
- [4] Павельев Д.Г., Васильев А.П., Козлов В.А., Кошуринов Ю.И., Оболенская Е.С., Оболенский С.В., Устинов В.М. // Журнал радиоэлектроники. 2016. № 1. С. 1.
- [5] Оболенская Е.С., Чурин А.Ю., Оболенский С.В., Мурель А.В., Шашкин В.И. // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49, № 11. С. 1507.
- [6] Стенин В.Я., Степанов П.В. // Микроэлектроника. 2012. Т. 41, № 4. С. 253.
- [7] Петросянц К.О., Харитонов И.А., Орехов Е.В., Самбурский Л.М., Ятманов А.П., Воеводин А.В. // В кн.: Сборник трудов 5-й Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2012» – М.: ИППМ РАН, 2012, с. 413.
- [8] Забавичев И.Ю., Потехин А.А. // Вестник Нижегородского университета. Серия: физика твердого тела. 2014. № 1-2. С. 64.
- [9] Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // В кн.: Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2016» – М.: НИЯУ МИФИ, 2016, с.69-70.
- [10] Пузанов А.С., Оболенский С.В. // В кн. Физические и физико-химические основы ионной имплантации: Тезисы докладов VI всероссийской конференции (Нижний Новгород, 24-27 октября 2016 г.) – Нижний Новгород, 2016 г., с.89.
- [11] Ладыгин Е.А. и др. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. – М.: Советское радио, 1980, 224 с.
- [12] Киселев В.К., Оболенский С.В., Пузанов А.С., Скупов А.В. // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 2. С. 10.
- [13] Demarina N.V., Obolensky S.V. // Microelectronics Reliability. 1999. Vol. 39. № 8. P. 1247.
- [14] Демарина Н.В., Оболенский С.В. // Журнал технической физики. 2002. Т. 72, № 1. С. 66.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В СУБМИКРОННЫХ ДИОДНЫХ И ТРАНЗИСТОРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

**В.А. Козлов¹⁾, Е.С. Оболенская²⁾, С.В. Оболенский²⁾, Д.Г. Павельев²⁾,
А.С. Пузанов²⁾, Е.А. Тарасова²⁾**

¹⁾ Институт физики микроструктур РАН

²⁾ ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Известно, что радиационное воздействие негативно влияет на электронные устройства. Математическое моделирование реакции элементов на радиационное воздействие позволяет уменьшить число циклов макетирования для достижения заданных эксплуатационных характеристик, что, в конечном счете, сокращает сроки и снижает общую стоимость разработки. Однако аналитические и простые численные модели, основанные на линейной суперпозиции радиационных эффектов, зачастую «не работают» для современных сверхвысокочастотных полупроводниковых приборов с нанометровыми рабочими областями, динамика физических процессов в которых носит сложный комплексный нелинейный характер. В работе рассмотрены особенности физико-топологических моделей переноса носителей заряда при радиационном воздействии: самосогласованного решения кинетического уравнения Больцмана и уравнения Пуассона, квазигидродинамического и диффузионно-дрейфового приближений [1], в том числе, в локально-неравновесной постановке задачи [2] и с учетом уравнения Шредингера.

В первой части работы рассмотрены источники проникающих излучений и радиационные эффекты, вызываемые ими в полупроводниковых приборах [3, 4] с указанием особенностей протекания данных процессов в субмикронных диодных и транзисторных гетероструктурах миллиметрового диапазона длин волн. Известно, что действие радиации приводит к образованию дефектов кристаллической структуры и ионизации полупроводника [5]. Радиационные дефекты условно можно разделить на точечные (вакансия и атом в междоузлии), образующиеся при воздействии гамма- и электронного излучений, и кластеры радиационных дефектов, то есть скопления точечных дефектов, образующиеся при воздействии нейтронов, протонов и тяжелых заряженных частиц. Уменьшение размеров структур приводит к тому, что: во-первых, характерные пространственные масштабы изменения электрического поля становятся сопоставимы с длинами релаксации энергии и импульса носителей заряда [6, 7]. В результате, ионизирующее излучение разогревает электронный газ, который не успевает остывать за времена пролета рабочей области субмикронных приборов [8-11]. Во-вторых, характерные размеры рабочих областей полупроводниковых приборов становятся сравнимы с расстоянием между кластерами радиационных дефектов и размерами одиночного кластера радиационных дефектов, что может препятствовать протеканию тока в структуре. При этом носители заряда, разогнанные до энергий порядка ширины запрещенной зоны сильными электрическими полями (свыше 100 кВ/см) в субмикронных приборах, могут проникать между субкластерами внутри кластера радиационных дефектов [12-15].

Вышеизложенные особенности принципиально меняют подход к расчетной оценке реакции субмикронных структур на радиационное воздействие. Во второй части

работы приведен исторический экскурс по моделям переноса носителей заряда в полупроводниковых приборах при радиационном воздействии. Первые математические модели такого рода возникли в 60-е годы XX века [16], что было обусловлено, во-первых, необходимостью применения полупроводниковых приборов в военных и космических системах; во-вторых, накоплением требуемого объема экспериментальных данных по деградации электрофизических характеристик полупроводников (времени жизни неосновных носителей заряда, подвижности и концентрации основных носителей заряда) при облучении; в-третьих, возросшими к тому времени вычислительными ресурсами, что позволило реализовать численную модель диодов и транзисторов в диффузионно-дрейфовом приближении. Уменьшение размеров элементов и связанные с этим физические эффекты привели к необходимости моделирования реакции субмикронных полупроводниковых структур на радиационное воздействие на основе квазигидродинамического описания и самосогласованного решения кинетического уравнения Больцмана и уравнения Пуассона, что было выполнено в 90-е годы XX века [17]. Активное применение квантово-размерных гетероанструктур привело к появлению моделей с включением уравнения Шредингера.

В третьей части работы на примере конкретных структур диодов, биполярных и полевых транзисторов, рассмотрено применение физико-топологических моделей, а также дана оценка погрешностей расчетов путем сравнения с экспериментальными данными, в том числе, оригинальными [18].

В заключительной части работы проведен анализ существующих тенденций в области моделирования реакции перспективной элементной базы радиотехники, связи и микроэлектронных систем на радиационное воздействие в контексте общего направления развития твердотельной электроники.

Работа выполнена в рамках базовой части Государственного задания, проект 0729-2020-0057

- [1] Киселев В.К., Оболенский С.В., Пузанов А.С., Скупов А.В. // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 2. С. 10.
- [2] Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2018. Т. 52, № 11. С. 1295.
- [3] Ладыгин Е.А. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. – М.: Советское радио, 1980, 224 с.
- [4] Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988, 296 с.
- [5] Вавилов В.С. Действие излучений на полупроводники. – М.: Физматгиз, 1963, 264 с.
- [6] Пожела Ю. Физика быстродействующих транзисторов. – Вильнюс: Мокслас, 264 с.
- [7] Шур М. Современные приборы на основе арсенид галлия. – М.: Мир, 1991, 632 с.
- [8] Пузанов А.С., Оболенский С.В. // Микроэлектроника. 2009. Т. 38, № 1. С. 64.

- [9] Пузанов А.С., Оболенский С.В. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2010. № 3. С. 46.
- [10] Пузанов А.С., Оболенский С.В., Петров С.Г. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2011. № 2. С. 10.
- [11] Пузанов А.С., Оболенский С.В. // Микроэлектроника. 2012. Т. 41, № 4. С. 304.
- [12] Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49, № 1. С. 71.
- [13] Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50, № 12. С. 1706.
- [14] Забавичев И.Ю., Оболенская Е.С., Потехин А.А., Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, № 11. С. 1489.
- [15] Забавичев И.Ю., Потехин А.А., Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, № 11. С. 1520.
- [16] Gwyn C.W., Scharfetter D.L., Wirth G.L. // IEEE Transactions on nuclear science. 1967. Vol. NS-14, № 6. P. 153.
- [17] Demarina N.V., Obolensky S.V. // Microelectronics reliability. 1999. Vol. 39. P. 1247.
- [18] Потехин А.А., Забавичев И.Ю., Оболенская Е.С., Васин А.А., Тарасова Е.А., Хананова А.А., Линев А.В., Иванов А.Б., Пузанов А.С., Оболенский С.В. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2018. № 4. С. 10.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ КАСКАДА АТОМНЫХ СМЕЩЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА СУПЕРКОМПЬЮТЕРЕ «ЛОБАЧЕВСКИЙ»

А.А. Корягин, И.Ю. Забавичев

ННГУ им. Лобачевского

Введение

Отличительной особенностью современных методов обработки информации является то, что их можно эффективно использовать для быстрой обработки больших массивов данных. Зачастую в результате численного моделирования или измерений параметров физических процессов с помощью современных экспериментальных установок генерируются текстовые или бинарные файлы больших размеров, содержащие информацию об интересующих величинах. Поэтому быстрая обработка таких данных для дальнейшего анализа является актуальной задачей.

Моделирование процесса формирования разупорядоченной области в полупроводниковом материале, образующейся при воздействии потока мгновенных нейтронов спектра деления, является необходимым для корректной теоретической оценки реакции полупроводниковых приборов на радиационное воздействие. В настоящее время существует широкий спектр методов моделирования развития каскадов атомных столкновений в веществе [1], которые можно разделить на 4 класса: квантово-механические методы «из первых принципов», методы классической молекулярной динамики, стохастические методы (алгоритмы Монте-Карло) и континуальные методы, основанные на законах тепломассопереноса в сплошной среде. Представленные алгоритмы имеют различную вычислительную сложность, которая определяется пространственным и временным разрешением при сохранении требуемой точности решения. Для оценки результатов радиационного воздействия на полупроводниковые приборы часто используют метод Монте-Карло, реализованный в рамках таких программных пакетов как SRIM [2] и MARLOWE [3]. В этом случае используется приближение парных столкновений, хотя экспериментальные исследования показывают, что дефектная структура каскадной области повреждения оказывается более сложной [1].

Более подробную информацию о структуре и динамике формирования каскада атомных смещений можно получить с помощью метода молекулярной динамики, основанного на использовании II закона Ньютона для каждого атома моделируемой системы. Данный метод реализован в пакете прикладных программ LAMMPS [4], отличительной особенностью которого является поддержка таких технологий параллельных вычислений как MPI и OpenMP, что позволяет эффективно задействовать для расчетов мощности вычислительного кластера «Лобачевский» [5].

Исходные данные для моделирования

В работе исследовалась следующая конфигурация. Размер расчетной области составил $400 \times 400 \times 400$ А (4096000 атомов), в которой моделировалась эволюция разупорядоченной области атомных смещений в течении 100 пикосекунд, образованной

первичным атомом отдачи кремния с кинетической энергией 3 кэВ. Вдоль трех ортогональных направлений использовались периодические граничные условия, тем самым, моделируя поведение атомов в объемном материале. Для определения местоположения дефектов в моделируемой системе использовался метод, основанный на построении ячеек Вигнера-Зейтца. В качестве межатомного потенциала взаимодействия был выбран потенциал третьего порядка Стиллера-Вибера [6].

Для анализа внутренней структуры кластера использовалось распределение попарных расстояний между точечными дефектами. Оно представляет собой функцию $N(r)$, где N – отношение числа дефектов, расстояние между которыми находится в интервале $(r, r+\Delta r)$, к общему числу дефектов в кластере. Такое распределение имеет характерные максимумы, положение которых определяет области скопления точечных дефектов.

Результатом работы программы является текстовый файл, в котором для каждого момента времени записаны координаты и скорости движения атомов моделируемой кристаллической решетки. Размер одной временной выборки равен 500 Мбайт, а размер всего файла достигает около 100 Гбайт. Для анализа пространственного распределения попарных расстояний между точечными дефектами был создан программный пакет, написанный на языке Python с использованием библиотеки Pandas.

Результаты расчетов и их обсуждение

На рисунках 1-6 представлены функции распределения попарных расстояний между точечными дефектами в различные моменты времени, построенные отдельно для вакансий и межузельных атомов, а также трехмерные топологии разупорядоченных областей. Данные моменты времени соответствуют различным стадиям процесса формирования каскада атомных смещений.

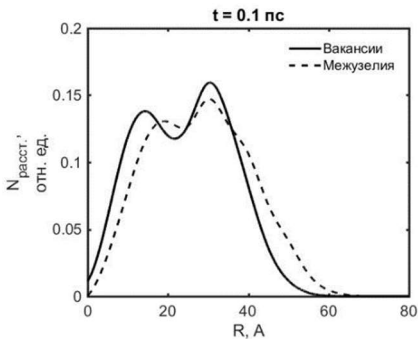


Рис. 1

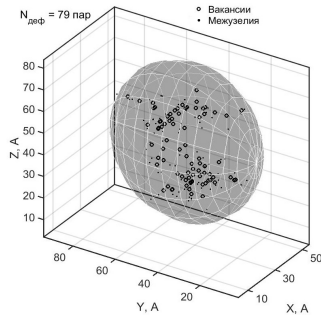


Рис. 2

Из представленных выше графиков следует, что до середины участка термического расширения (рис. 1 и рис. 2) формирование точечных дефектов происходит в основном вследствие взаимодействия первичного атома отдачи с атомами вещества,

что приводит к появлению близкорасположенных максимумов в распределении парных расстояний.

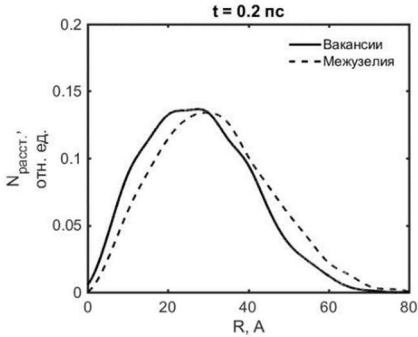


Рис. 3

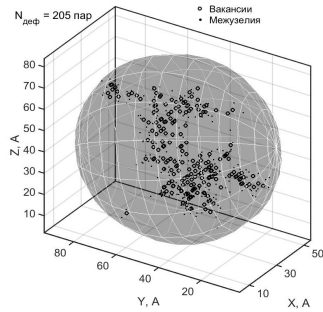


Рис. 4

В конце стадии термического расширения (рис. 3 и рис. 4) распределения парных расстояний как вакансий, так и межузельных атомов внутри кластера близки к нормальным, что свидетельствует об однородной структуре каскада атомных смещений.

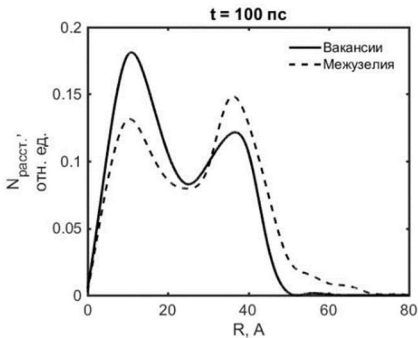


Рис. 5

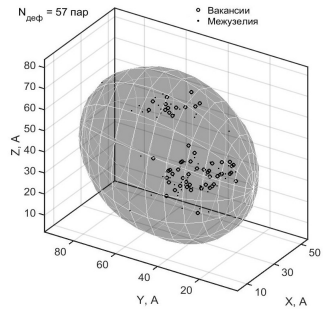


Рис. 6

После стадий стабилизации и быстрого отжига (рис. 5 и рис. 6) происходит перераспределение дефектов: вакансии собираются в центре кластера, в то время как межузельные атомы расположены в основном на его периферии.

Использование созданного пакета программ для обработки результатов моделирования позволило оценить временную динамику процесса формирования кластера радиационных дефектов с точки зрения распределения парных расстояний между точечными дефектами. Данная информация необходима для определения размеров разупорядоченной области и концентрации точечных дефектов, которые применяются

в качестве параметров для физико-топологического моделирования полупроводниковых приборов [7, 8].

- [1] Калин Б.А. и др. Физическое материаловедение. Том 4. Физические основы прочности. Радиационная физика твердого тела. Компьютерное моделирование. – М.: МИФИ, 200, 696 с.
- [2] Киселева Е.В., Оболенский С.В. // Вестник Нижегородского университета. Серия: физика твердого тела. 2003. № 1. С. 20.
- [3] Fleming R.M., Seager C. H., Lang D. V., Cooper P. J., Bielejec E. and Campbell J. M. // Journal of Applied Physics. 2007. Vol. 102, № 4. P. 1.
- [4] Plimton S. // Journal Computational Physics. 1995. Vol. 117, № 1. P. 1.
- [5] Забавичев И.Ю., Потехин А.А., Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53, № 9. С. 1279.
- [6] Stillinger F.H., Weber T.A. // Physical Review B. 1985. Vol. 31, № 8. P. 5262.
- [7] Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50, № 12. С. 1706.
- [8] Забавичев И.Ю., Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2020. Т. 54, № 9. С. 945.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА

В.А. Луковкина, И.Ю. Забавичев

ННГУ им. Лобачевского

Введение

Компьютеры, объединенные в единую локально вычислительную сеть, могут решать различные задачи. С помощью одних, состоящих в вычислительном кластере, проводится численное моделирование физических процессов, другие контролируют процесс измерения. При этом компьютеры могут разделять общие ресурсы, например, оборудование с сетевым доступом или сервера для хранения информации, поэтому дополнительно необходимо корректно настроить разграничение доступа, руководствуясь в том числе принципами обеспечения информационной безопасности [1].

Одним из многочисленных измерительных стендов, расположенных в локально-вычислительной сети кафедры квантовой радиофизики и электроники радиофизического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского является атомно-силовой микроскоп. Зондовая микроскопия позволяет исследовать рельеф поверхности с большим пространственным разрешением, поэтому атомно-силовые микроскопы удаётся успешно применять в физике наноструктур.

Атомно-силовой микроскоп применяется для оценки радиационного поражения полупроводниковых структур. Процедура заключается в следующем: в произвольных точках структуры снимаются несколько разномасштабных изображений, которые в дальнейшем анализируются с помощью Фурье преобразования. На основе известных соотношений между параметрами облучения и размерами кластеров и субкластеров радиационных дефектов [2-4] можно сделать вывод о степени поражения из спектров изображений.

Атомно-силовой микроскоп – это, прежде всего, информационная система, которая может быть подвержена различным угрозам, например, утечка или несанкционированное изменение данных. Требования по информационной безопасности необходимы из-за длительного процесса проведения измерений, так как для повышения точности измерений приходится уменьшать скорость сканирования образца. Таким образом, обеспечение информационной безопасности процесса измерений поверхности полупроводниковых структур с помощью атомно-силового микроскопа является актуальной задачей.

Описание измерительной установки

Обеспечение мер информационной безопасности рассмотрено на примере микроскопа СЗМ Solver-Pro фирмы NT-MDT.

Процедура снятия изображения поверхности в контактной моде включает в себя следующие шаги:

- 1) Провести юстировку оптической системы микроскопа для контактной моды.
- 2) Включить систему обратной связи и задать необходимую величину Set Point;

- 3) Подвести с помощью шагового двигателя исследуемую поверхность к зонду, пока не будет достигнуто значение Set Point;
- 4) Задать необходимые параметры измерений: скорость сканирования, количество сканирований и измеряемые параметры и т.д.;
- 5) Выбрать участок на поверхности образца: минимальный размер – 10×10 нм, максимальный размер – 9×9 мкм;
- 6) Запустить сканирование образца.

Процедура сканирования поверхности образца с помощью атомно-силового микроскопа в контактном режиме с точки зрения обмена информацией выглядит следующим образом: параметры измерений, установленные управляющей программой, с помощью соответствующих ЦАП преобразуются в управляющие сигналы с последующим усилением. Сигналы измерительной системы, несущие информацию о рельефе поверхности исследуемого образца, с помощью АЦП преобразуются в значение, которое записывается в файл изображения.

Меры информационной безопасности

Анализ угроз информационной безопасности выявил следующие особенности работы атомно-силового микроскопа. Подключение атомно-силового микроскопа к управляющему компьютеру осуществляется через специальную плату, которая имеет совместимость с ограниченным числом процессоров семейства Pentium и операционной системой Windows 98. Данная операционная система больше не поддерживается Microsoft, к ней не выпускаются обновлений, в том числе исправляющих критические уязвимости. Поэтому необходимо максимально изолировать управляющий компьютер от остальных вычислительных машин сети, разрешив передавать данные только на сервер, на котором хранятся результаты измерений. Реализовать данные меры можно с помощью технологии «access list», позволяющей разграничить потоки данных внутри сети и между её подсетями.

Таким образом, предложенные меры обеспечат информационную безопасность не только процесса, но и результатов измерений поверхности полупроводниковых структур.

- [1] Потехин А.А., Забавичев И.Ю., Рябов А.А., Линев А.В., Чуринов А.Ю., Оболенский С.В., Ротков Л.Ю. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2015. № 2. С. 24.
- [2] Забавичев И.Ю., Оболенская Е.С., Потехин А.А., Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, № 11. С. 1489.
- [3] Киселева Е.В., Оболенский С.В. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2004. №. 1–2. С. 46.
- [4] Забавичев И.Ю. // В кн. Труды XXIII научной конференции по радиофизике – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2019 г., с. 103.

ОСОБЕННОСТИ ПРОТЕКАНИЯ ПРОЦЕССОВ В МОП-СТРУКТУРАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПРОНИКАЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

К.А. Насеткин¹, А.С. Пузанов¹, А.Д. Кустарева², А.Д. Боженкина¹,
М.С. Муравьев¹, Г.М. Алимирзоев¹

¹) ННГУ им. Н.И. Лобачевского

²) Университет ИТМО

Структуры МОП КНИ имеют существенные функциональные преимущества перед транзисторами обычных объемных технологий с неизолированной подложкой. За счет захороненного диэлектрического слоя такие структуры имеют большее быстродействие, меньшие паразитные емкости, меньшее энергопотребление, большая плотность интеграции, а также высокую устойчивость к импульсному ионизационному воздействию, что обуславливает дополнительную перспективность технологии для специализированных применений.

На данный момент существуют компактные модели, позволяющие оценивать квазистационарные процессы деградации КНИ структур, основанные на различных подходах. Компактная модель [1] являются чисто феноменологическими, существенным образом зависящими от топологии структуры и требующими большого объема дорогостоящих калибровочных облучательных экспериментов при измерении технологического процесса. Также подобные модели не учитывают короткоканальные эффекты, что, вместе с вышеперечисленным, делает невозможным предсказание на их основе реакции полупроводниковых структур на воздействие проникающих излучений. Модель [2, 3] эквивалентна традиционным на схемотехническом уровне, однако имеет ряд преимуществ с точки зрения физического моделирования радиационных эффектов. В частности, за учет короткоканальных эффектов отвечают параметры подвижности носителей заряда в канале транзистора и степенной показатель в вольт-амперной характеристике. Воздействие низкоинтенсивных проникающих излучений учитывается через изменение порогового напряжения и емкостей структуры. Традиционная модель учитывает только изменение подвижности и порогового напряжения. Также эта модель обладает предсказательной силой.

Сокращение размеров активной области ведет к тому, что, во-первых, становится необходимо учитывать короткоканальные эффекты, а, во-вторых, влияние шероховатости границ, которые вносят все больший вклад в характеристики транзистора. И тут становится необходимым изучение особенностей протекания процессов на границе МОП-структур, а также их сравнение с другими полупроводниковыми структурами.

В работе [4] исследуются МОП структуры, изготовленные на n- и p- кремниевых пластинах. Структуры подвергались воздействию постоянного напряжения разных полярностей в течение разных периодов времени. С помощью методики высокочастотных вольт-фарадных характеристик определялось изменение напряжения плоских зон. По смещению оценивалось изменение величины эффективного заряда, захваченного ловушками на границе с диэлектриком. Результатом стал вывод о возникновении краевых эффектов, проявляющихся в увеличении высокочастотной емкости при некотором пороговом напряжении. Экспериментальные данные также свидетельствуют о захвате дырок из полупроводника при отрицательной полярности на затворе. После окончания воздействия постоянного напряжения на МОП-структуры происходят

восстановления ВФХ за время, характерное для обратного дрейфа ионов и выброса носителей с медленных ловушек за счет туннелирования. Таким образом, в работе показано, что низкоинтенсивное проникающее излучение приводит к изменению емкостных параметров активной зоны.

Стоит отметить, что методика оценки вольт-фарадных характеристик эффективно используется в изучении воздействия проникающих излучений на НЕМТ-транзисторы. Так, в статье [5] исследуется профиль концентрации электронов, который определяется путем дифференцирования ВФХ с использованием процедуры сглаживания исходных данных. Сопоставление профилей и распределения электронов, полученных для каждой измеренной ВФХ, позволяло оценить концентрацию дефектов по величине изменения концентрации электронов. Таким образом, видно, что, как и в МОП-структурах, при воздействии проникающих излучений происходит изменение емкостных характеристик.

В работе [6] изучаются полевые датчики Холла на основе тонких КНИ-структур. Рассматриваются датчики различных конфигураций и проводятся эксперименты с различными интенсивностями излучений. Наглядно показано, что определяющей характеристикой становится неоднородность поверхности и плотность заряженных поверхностных состояний.

В результате анализа перечисленных работ видно, что при уменьшении активной зоны наиболее важной характеристикой становится шероховатость границ. Соответственно, становится необходимым внесение в компактные модели, применяющиеся для субмикронных транзисторов, параметров, учитывающих шероховатость границ.

- [1] Петросянц К.О., Самбурский Л.М., Харитонов И.А. Компактная макромодель КНИ/КНС МОП-транзистора, учитывающая радиационные эффекты // Известия ВУЗов. Электроника. 2011. №1(87). С. 20.
- [2] Насеткин К.А., Муравьев М.С., Алимурзоев Г.М., Пузанов А.С., Забавичев И.Ю., Потехин А.А. Моделирование характеристик субмикронных структур «кремний на изоляторе» с учетом радиационных эффектов // Научно-технический вестник Поволжья, 2019, №7, С. 127.
- [3] Насеткин К.А., Пузанов А.С. Реакция микросхем с цепью автокомпенсации токов утечки на воздействие низкоинтенсивных проникающих излучений // В кн.: Труды XXII научной конференции по радиофизике (г. Нижний Новгород, 15-29 мая 2018 г.). – Нижний Новгород, 2018. С. 66.
- [4] Боброва Е.А., Омеляновская Н.М. Особенности вольт-фарадных характеристик МОП структур, обусловленные зарядом в окисле. // Физика и техника полупроводников. 2008. Т. 42, вып. 11. С. 1380.
- [5] Тарасова Е.А., Оболенская Е.С., Хананова А.В., Оболенский С.В., и др. Теоретические и экспериментальные исследования вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик НЕМТ структур и полевых транзисторов // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 42, вып. 50. С. 1599.
- [6] Мокрушин А.Д., Мордкович В.Н., Омеляновская Н.М., Филатов М.М. Температурно-радиационные эффекты в полевом датчике Холла // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 5. С. 123.

ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ РЕАКЦИИ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ НА РАДИАЦИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРИ ПОМОЩИ ПЕРЕДВИЖНОГО АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА С УЧЕТОМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕР ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

С.В. Овчинников, А.А. Потехин, И.Ю. Забавичев, А.С. Пузанов

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Введение

Современные условия требуют все большей интенсификации производства полупроводниковой аппаратуры, в том числе снижения времени, необходимого для проектирования компонентов аппаратуры - полупроводниковых элементов. Для решения подобной задачи традиционно необходимы серии испытаний на подтверждение характеристик готовых образцов компонентов аппаратуры заданным требованиям. Однако, для проведения исследований полупроводниковых приборов на радиационную стойкость типичной является проблема невозможности экспресс-тестирования функциональных параметров для определения предельных уровней стойкости к функциональным и катастрофическим отказам. С целью решения этой проблемы на кафедре электроники радиофизического факультета ННГУ была начата разработка многоцелевого программно-аппаратного подвижного комплекса для экспериментального анализа и компьютерного моделирования физических процессов в полупроводниковых приборах экспресс-методами, в том числе с целью определения уровня их радиационной стойкости.

При создании комплекса пришлось пересмотреть концепции измерений и, соответственно, изменить приборную компоненту комплекса. Особое внимание уделялось созданию измерительных стендов для проведения экспресс-измерений с заданным уровнем погрешности.

Так как информация, обрабатываемая в системах данного назначения, является конфиденциальной, то, в соответствии с законодательством РФ в области информационной безопасности, ее необходимо защищать. Поэтому было необходимо предусмотреть ряд аппаратных, программных и организационных мер, позволяющих реализовать указанное требование. Для реализации комплекса отработка мер по обеспечению информационной безопасности необходимо начинать с первого этапа проектирования – это удешевляет стоимость работ и уменьшает время, необходимое для реализации системы обеспечения информационной безопасности.

Анализ современного состояния исследований

В настоящее время разработано множество различных моделей для теоретико-экспериментальной оценки стойкости полупроводниковых приборов к радиационному воздействию. Однако они имеют достаточно большую погрешность, ввиду несовершенства оснастки для измерения реакции полупроводниковых структур на ионизирующие излучения (ИИ). Предлагаемый авторами подход позволяет сочетать в себе низкую погрешность измерения электрофизических параметров полупроводниковых приборов с методами экспресс-обработки результатов измерений, которые позволяют прогнозировать поведение данных структур различных уровнях воздействия ИИ, а

также предсказывать максимальный уровень стойкости на основе заданных параметров отказа полупроводникового прибора. Ранее, был разработан уникальный аппаратно-программный продукт, позволяющий проводить восстановление профилей легирования полупроводниковых структур на основе измерения вольт-фарадных характеристик с заданной точностью, а также комплекс измерения вольт-амперных характеристик с в импульсном и статическом режимах. Оба комплекса прошли экспериментальную отработку в рамках созданной в ННГУ лаборатории на базе локальной вычислительной сети кафедры квантовой радиофизики и электроники [1].

Для структур с топологическими нормами 180 нм и менее при сохранении методик измерения параметров, необходим радикально другой подход к моделированию их реакции на радиационное воздействие, ввиду малых топологических размеров [2]. Это обусловлено тем, что размер характерного радиационного дефекта становится сравним с размерами рабочей области элементарного полупроводникового прибора. Поэтому, в отличие от полупроводниковых приборов с большими топологическими нормами, где деградация характеристик с увеличением уровней радиационного воздействия происходит плавно, для низкоразмерных структур катастрофический отказ может наступать при малых уровнях воздействия. На кафедре квантовой радиофизики и электроники разрабатывается пакет прикладных программ, позволяющий проводить анализ радиационной стойкости полупроводниковых приборов с баллистическим пролетом носителей заряда [3].

Предлагаемый для реализации аппаратно-программный мобильный комплекс должен позволять:

- 1) проводить измерение характеристик полупроводниковых приборов с заданной точностью;
- 2) используя данные о дозах облучения, комплекс должен позволять проводить оценку максимальных значений уровня радиационного нагружения, не приводящих к параметрическим или катастрофическим отказам, в том числе и для приборов с топологическими нормами 120 нм и менее;
- 3) проводить расчет статических и динамических параметров приборов нанoeлектроники и радиотехнических схем в целом с заданной погрешностью, определяемой исходными данными;
- 4) проводить функциональную отбраковку изделий микро- и нанoeлектроники как в корпусном, так и в бескорпусном исполнениях;
- 5) обеспечивать конфиденциальность полученной информации и невозможность несанкционированного доступа к результатам измерений и моделирования.

Основные угрозы информационной безопасности и меры борьбы с ними

При оценке защищенности мобильного аппаратно-программного комплекса необходимо учитывать специфику его применения [4-6]. Все измерительные стенды связаны локальной вычислительной сетью с основным сервером, на котором производится моделирование и экстракция необходимых для этого параметров. При этом, с точки зрения несанкционированного доступа, наиболее уязвимым звеном является именно сервер, поэтому для физической защиты от несанкционированного доступа необходимо использовать системы доверенной загрузки с двухфакторной аутентификацией (ключ-токен и пара логин-пароль) при загрузке системы. Это обеспечит не-

возможность доступа к данным даже при физической краже токена. Также необходимо предусмотреть возможность аппаратной и программной (на уровне операционной системы) верификации обмена информацией с внешними устройствами (подтверждение пользователем с ролью не ниже администратора).

С точки зрения защиты от порчи, изменения и утери информации необходимо осуществить ряд мероприятий. Работа с внешними, относительно комплекса, файлами будет возможна только в режиме песочницы. Он подразумевает блокировку системой доступа из этой среды к критически важным элементам системы и обращение даже с вредоносными файлами в таком случае становится безопасным. На базе сервера необходимо установить git-систему, которая позволит сохранять результаты каждого моделирования в фоновом для пользователя режиме с двойным резервированием файлов непосредственно в репозиториях git-системы. Это позволит восстановить данные моделирования даже в случае их злонамеренного уничтожения пользователем. Доступ к данной системе должен иметь только специалист с ролью не ниже суперпользователя.

Для защиты программных пакетов от вредоносного программного обеспечения, предлагается его модификация с использованием методов контроля контрольных сумм исполняемых файлов и библиотек. Основной особенностью предлагаемых решений является невозможность подмены файлов библиотек либо исполняемых файлов без изменения проверяемых контрольных сумм. При запуске специализированных программных пакетов автоматически запускается исполняемый скрипт безопасности, при помощи которого происходит проверка контрольных сумм исполняемых файлов, а также целостность используемых библиотек.

Предложенные меры не требуют наличия повышенных вычислительных мощностей и реализуются (кроме токен-доступа) стандартными средствами операционных систем и программным обеспечением с открытой лицензией.

Достигнутые результаты

В настоящее время разработана и внедрена эксплуатация методика контроля функциональных параметров полупроводниковых слоев гетеронаноструктур на основе Si/SiGe, GaAs/AlGaAs/InGaAs, GaN/AlGaN, позволяющая проводить экстракцию исходных данных для моделирования полупроводниковых приборов, изготовленных на основе таких структур [7], с заданным уровнем погрешности. Это позволяет проводить оценку стойкости перспективных приборов микро- и наноэлектроники, исходя из малых уровней воздействия, уменьшая количество испытаний.

Разработан пакет прикладных программ на основе алгоритма Монте-Карло [8, 9], а также в квазигидродинамическом и диффузионно-дрейфовом приближениях [10], позволяющий проводить моделирование процессов переноса непосредственно после облучения.

Разработаны специализированные стенды для проведения измерений электрофизических параметров как корпусированных, так и бескорпусных приборов с заданной точностью измерений.

Проведена оценка угроз информационной безопасности при создании данного комплекса, предложены меры по защите результатов измерений и моделирования от несанкционированного доступа, а также непреднамеренной порчи, либо утери.

- [1] Потехин А.А., Забавичев И.Ю., Рябов А.А., Линев А.В., Чурин А.Ю., Оболенский С.В., Ротков Л.Ю. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2015. № 2. С. 24.
- [2] Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50, № 12. С. 1706.
- [3] Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2018. Т. 52, № 11. С. 1295.
- [4] ГОСТ Р 53114-2008 Защита информации. Обеспечение информационной безопасности в организации. Основные термины и определения.
- [5] ГОСТ Р ИСО/МЭК 13335-1-2006 Информационная технология (ИТ). Методы и средства обеспечения безопасности. Часть 1. Концепция и модели менеджмента безопасности информационных и телекоммуникационных технологий.
- [6] ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001-2006 Информационная технология (ИТ). Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Требования.
- [7] Забавичев И.Ю., Потехин А.А. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2014. № 1-2. С. 64.
- [8] Демарина Н.В., Оболенский С.В. // Журнал технической физики. 2002. Т. 72, № 1. С. 66.
- [9] Пузанов А.С., Оболенский С.В. // Микроэлектроника. 2012. Т. 41, № 4. С. 304.
- [10] Киселев В.К., Оболенский С.В., Пузанов А.С., Скупов А.В. // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 2. С. 10.

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕНОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В СУБМИКРОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ СФОРМИРУЮЩИМИСЯ РАДИАЦИОННЫМИ ДЕФЕКТАМИ.

Потехин А.А., Забавичев И.Ю., Насеткин К.А., Пузанов А.С.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Введение

В соответствии с дорожной картой развития приборов и систем, представленной институтом инженеров электротехники и электроники [1], одним из приоритетных направлений развития современной электроники, является уменьшение размеров как рабочих областей составных частей микросхем, так и микросхем с целым. При этом, влияние неоднородностей, возникающих в приборах при воздействии ионизирующих излучений значительно усиливается [2, 3].

Основным трендом развития микроэлектроники, в том числе и радиационно-стойкой, является увеличение плотности размещения транзисторов на кристалле в следствие чего необходимо уменьшение размеров их активной области. Но в случаях практического применения радиационно-стойкой элементной базы (военная аппаратура, космическая аппаратура и т.д.) к аппаратуре предъявляются требования в том числе и по радиационной стойкости.

Известно, что воздействие радиации приводит к образованию различного рода дефектов и ионизации полупроводника. В частности, при нейтронном облучении в результате каскадных смещений атомов помимо точечных дефектов образуются разупорядоченные области – кластеры дефектов, состоящие из более мелких и плотных образований – субкластеров. Такие объекты окружены пространственным зарядом и препятствуют движению электронов. При этом рассеяние холодных носителей происходит на кластерах в целом и точечных дефектах, а горячих – на отдельных субкластерах.

При уменьшении активной области прибора изменяется характер переноса носителей заряда в ней. Ранее, авторами это было показано в работе [4]. При этом, стоит отметить, что существенно меняется и набор факторов, влияющих на подвижность носителей заряда в активной области. При уменьшении же размеров активной области до размеров, характерных для квазибаллистического пролета носителей заряда, уже отдельные реализации субкластеров дефектов могут нарушить функционирование прибора [5].

Расчет электрофизических параметров кластеров радиационных дефектов

Для определения времен релаксации, а как следствие, и подвижности, необходимо нахождение вероятности перехода электрона из одного состояния в другое вследствие рассеяния на дефекте решетки или примеси. Здесь и далее эта задача будет рассматриваться в приближении сферически симметричной долины.

В общем случае задача нахождения вероятности перехода электрона в другое состояние является задачей квантовой теории рассеяния. Она решается на основе метода нестационарной теории возмущения [6]. Гамильтониан для материала представим в виде

$$\hat{H}_T = \hat{H} + \hat{H}', \quad (1)$$

где \hat{H}' описывает взаимодействие электрона с примесями и фононами, а \hat{H} является невозмущенным гамильтонианом и в нашем случае описывается гамильтонианом электрона в идеальной решетке. \hat{H}' считается малым возмущением. Стационарное решение для невозмущенного \hat{H} описывается как

$$\Psi_n(t) = \psi_n \exp(-i\varepsilon_n t/\hbar), \quad (2)$$

где ψ_n и ε_n – собственные функции и собственные числа решения уравнения

$$\hat{H}\psi_n = \varepsilon_n \psi_n. \quad (3)$$

В общем случае, решив уравнение Шредингера для возмущенной задачи и учтя (3), а также то, что рассеивающий центр является заряженным, получим значение матричного элемента гамильтониана, отвечающего за вероятность перехода из невозмущенного состояния в возмущенное:

$$\hat{H}'_{kk'} = \int_0^\infty V(r) \frac{\sin(|k - k'|r)}{|k - k'|} dr. \quad (4)$$

Тогда дифференциальное сечение рассеяния можно определить, как:

$$\sigma(\theta) = \left[\frac{Vm}{2\pi\hbar} \hat{H}'_{kk'} \right]. \quad (5)$$

Рассмотрим уравнение движения носителей заряда в условии пренебрежения тепловым движением:

$$\frac{d}{dt}(mv_d) + \frac{mv_d}{\tau_m} = eE, \quad (6)$$

где t – время, mv_d – импульс носителей заряда, а τ_m – определяется как среднее время релаксации импульса. При этом, второе слагаемое уравнения описывает «трение», испытываемое носителями заряда о кристаллическую решетку при направленном движении под действием внешнего поля. Среднее время релаксации зависит от частоты колебаний кристаллической решетки, и, как следствие, определяет зависимость среднего времени релаксации от температуры. С точки зрения микроскопической теории данное «трение» обусловлено взаимодействием носителей заряда с несовершенствами кристаллической решетки – дефектами, примесями и колебаниями решетки. Подобный тип взаимодействия носителей заряда с решеткой называется рассеянием. Понятие «сечения рассеяния» используется для описания прохождения частиц большой энергии через вещество.

Частота соударений с атомами примеси определяется через концентрацию рассеивающих центров (легирующей примеси) N , их сечением σ_c и скоростью частицы v :

$$\frac{1}{\tau_c} = N\sigma_c v. \quad (7)$$

Сечение рассеяния σ_c определяется из дифференциального сечения рассеяния путем интегрирования по телесному углу $d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta$:

$$\sigma_c = 2\pi \int_0^{\pi} \sigma(\theta) \sin\theta d\theta, \quad (8)$$

где θ – угол отклонения направления движения частицы относительно первоначального направления.

Относительно изменение компоненты скорости частицы равно:

$$\frac{v - v\cos\theta}{v} = 1 - \cos\theta. \quad (9)$$

Эта же величина определяет изменение соответствующей компоненты импульса (в приближении сохранения эффективной массы неизменной при соударении). Отсюда сечение можно посчитать как

$$\sigma_c = 2\pi \int_0^{\pi} \sigma(\theta)(1 - \cos\theta)\sin\theta d\theta. \quad (10)$$

Также время релаксации импульса можно переписать следующим образом:

$$\frac{1}{\tau_c} = N\sigma_c v = Nv2\pi \int_0^{\pi} \sigma(\theta)(1 - \cos\theta)\sin\theta d\theta. \quad (11)$$

Для полученных выше формул в качестве определения одного из вариантов решения трехмерной задачи был выбран потенциал Флеминга [7]. Для этого потенциала был проведен расчет подвижности и времен релаксации импульса для кремния с целью сравнения с результатами эксперимента. Стоит заметить, что сравнение с экспериментом в данном случае не будет являться полностью корректным, ввиду отсутствия данных о значениях подвижности для горячих носителей заряда. В общем случае не существует прямых методов измерения подвижности, что приводит к невозможности разделения на «холодные» и «горячие» носителя заряда. Однако в работе [8] обсуждался вопрос «поглощения» более объемными областями разупорядочивания мелких областей. Это приводит к тому, что оцениваются именно доминирующие области, а как следствие, и кластеры радиационных дефектов. Также представленные в литературе измерения для объемного материала проведены для низких концентраций легирующих примесей. Это приводит к тому, что область обедненной примеси вокруг кластера будет иметь достаточно большой объем и будет в доминирующем числе случаев определять конечные значения подвижности всего исследуемого образца. Исходя из этого, предлагается считать значение подвижности, полученной в ходе экспериментов подвижностью, определяемой доминирующим видом кластеров радиационных дефектов.

На рисунке представлены результаты расчета времени релаксации импульса (рис. 1) и подвижности (рис. 2), рассчитанных для кремния, а также сравнение с экспериментальными данными, полученными для необлученного образца [9]. Расчеты проводились для размеров ядра кластера, равным 5, 10 и 15 нм.

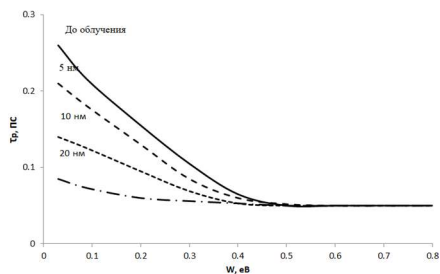


Рис. 1

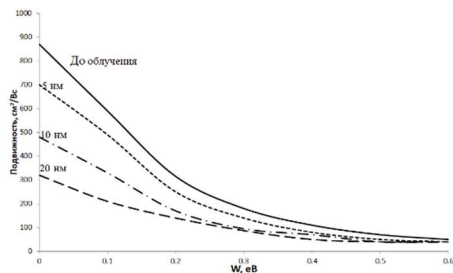


Рис. 2

Основной проблемой при подобной постановке задачи является верификация полученных результатов моделирования, так как данные получаемые при анализе опытных образцов не позволяют в полной мере выделить подвижность, связанную с «горячими» носителями.

Из полученных данных видно, что подвижности падают с увеличением размера ядра кластера. Также данный расчет интегрирован в единую систему определения исходных данных для проведения трехмерного моделирования транспорта носителей при радиационном воздействии [10].

- [1] International roadmap for devices and systems: 2017 edition. More Moore.
- [2] Забавичев И. Ю., Оболенская Е. С., Потехин А. А., Пузанов А. С., Оболенский С. В., Козлов В. А. // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, № 11. С. 1489.
- [3] Забавичев И. Ю., Потехин А. А., Пузанов А. С., Оболенский С. В., Козлов В. А. // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, № 11. С. 1520.
- [4] Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49, № 1. С. 71.
- [5] Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50, № 12. С. 1706.
- [6] Аскеров Б.М. Электронные явления переноса в полупроводниках. – М.: Наука., 1985, 320 с.
- [7] Fleming R. M., Seager C. H., Lang D. V., Cooper P. J., Bielejec E., and Campbell J. M. // Journal of Applied Physics. 2007. № 102. 043711.
- [8] Забавичев И.Ю., Потехин А.А., Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53, № 9. С. 1279.
- [9] Насеткин К.А., Муравьев М.С., Алимурзоев Г.М., Пузанов А.С., Забавичев И.Ю., Потехин А.А. // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 7. С. 127.
- [10] Потехин А.А., Забавичев И.Ю., Оболенская Е.С., Васин А.А., Тарасова Е.А., Хананова А.А., Линев А.В., Иванов А.Б., Пузанов А.С., Оболенский С.В. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2018. № 4. С. 10.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ RLC-ПАРАМЕТРОВ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ ТРАНЗИСТОРОВ НА СБООУСТОЙЧИВОСТЬ ЯЧЕЕК БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ СТАТИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА И ИЗЛУЧЕНИЙ ИХ ИМИТИРУЮЩИХ

А.С. Пузанов, А.А. Потехин, И.Ю. Забавичев, К.А. Насеткин, С.В. Оболенский

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Введение

Основной тенденцией развития цифровой электроники является уменьшение размеров полупроводниковых структур, что приводит к уменьшению энергии и увеличению скорости переключения транзисторов. Это позволяет обеспечивать неуклонный рост числа элементов интегральных схем и дальнейшее увеличение производительности. При этом для обеспечения требуемого быстродействия необходима минимизация задержек распространения и размытия фронтов сигналов, что определяется RCL-параметрами межсоединений транзисторов интегральных схем.

При попадании заряженной частицы в рабочую область транзистора вдоль трека образуется сильноионизованная область [1]. В результате разделения неравновесных носителей заряда электрическим полем образуется импульс тока, который может привести к сбою ячейки статической памяти. При этом оценка стойкости к подобного рода обратимым одиночным эффектам в настоящее время в большинстве работ проводится по величине критического заряда [2], хотя работы ряда авторов [3] показали влияние на сбоестойчивость не только величины собранного заряда, но и формы возникающих импульсов тока.

Очевидно, что переходной ионизационный процесс существенным образом зависит от RCL-параметров контактов транзисторов. В данной работе рассматривается вопрос о влиянии RLC-параметров межсоединений транзисторов на сбоестойчивость ячеек быстродействующей статической памяти при воздействии тяжелых заряженных частиц космического пространства и излучений их имитирующих.

Объект и методика моделирования

В качестве объекта моделирования выступала стандартная 6-транзисторная ячейка статической памяти, изготовленная по 10-нм технологии «кремний на изоляторе» (КНИ). Основные параметры моделируемых транзисторов масштабировались в соответствии с правилами [4] (табл.)

Табл.

Длина затвора, нм	22
Толщина подзатворного диэлектрика, нм	1,1
Толщина активного слоя кремния, нм	45
Толщина скрытого диэлектрика, нм	1,1
Ширина канала n-МОП транзистора, нм	170
Ширина канала p-МОП транзистора, нм	340
Напряжение питания, В	0,75
Сопротивление контакта, Ом/мкм	130
Емкость контакта, аФ/мкм	200

Для теоретического исследования воздействия тяжелых заряженных частиц на ячейки памяти широко используется метод смешанного приборно-схемотехнического моделирования [2]. Переходные процессы в транзисторе, в который попадает частица, рассчитываются при помощи физико-топологических моделей, а остальная часть схемы анализируется в программе схемотехнического моделирования. Традиционно используется комбинация TCAD (Technology Computer Aided Design) и SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), для физико-топологического и схемотехнического моделирования, соответственно. Однако, как было показано в работе [5] комплекс локально-равновесных моделей переноса носителей заряда, применяемый в том числе в TCAD, может давать большую погрешность в расчете ионизационной реакции полупроводниковых структур при длительности возбуждающего воздействия порядка времен релаксации энергии и импульса электронно-дырочной плазмы ($\sim 10^{-13}$ с), что реализуется при воздействии тяжелых заряженных частиц [1]. Поэтому для расчета переходной ионизационной реакции была применена оригинальная локально-неравновесная диффузионно-дрейфовая модель переноса носителей заряда [5], ранее применявшаяся для оценок сбоеустойчивости ячеек статической памяти технологий с различными топологическими нормами в работах [6-8].

Результаты расчетов и их обсуждение

Оценки показывают, что постоянная времени RC-цепи составляет 0,8 фс для n-МОП КНИ и 3,1 фс для p-МОП КНИ. Это существенно больше характерной длительности фронта импульса переходного ионизационного процесса, которая составляет около 420 фс при прохождении первичного атома отдачи с начальной энергией 200 кэВ [8]. Результаты расчетов импульса фототока без учета (- -) и с учетом (—) влияния контактов при помощи локально-равновесной и локально-неравновесной диффузионно-дрейфовой моделей приведены на рис. Видно существенное различие между моделями. При этом влияние контактов влияет на результат незначительно.

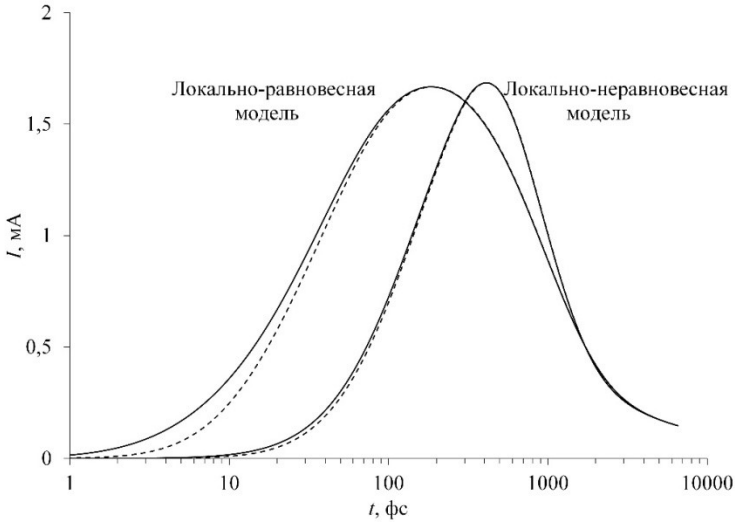


Рис.

Работа выполнена в рамках базовой части Государственного задания, проект 0729-2020-0057

- [1] Таперо К.И., Улимов В.Н., Членов А.М. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2018, 304 с.
- [2] Петросянц К.О., Харитонов И.А., Орехов Е.В., Самбурский Л.М., Ятманов А.П., Воеводин А.В. // В кн.: Сборник трудов 5-й Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2012» – М.: ФГБУ ИППМ РАН, 2012, с. 413.
- [3] DasGupta S. // M.S. thesis, Dept. Elect. Eng. and Comp. Science. Vanderbilt University. Dec. 2007. P. 116.
- [4] International Roadmap for Devices and Systems. 2017 Edition. More Moore. – IEEE Advancing Technology for Humanity. 2018. P. 36.
- [5] Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2018. Т. 52, № 11. С. 1295.
- [6] Пузанов А.С., Венедиктов М.М., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53, № 9. С. 1250.
- [7] Забавичев И.Ю., Потехин А.А., Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53, № 9. С. 1279.
- [8] Пузанов А.С., Оболенский С.В., Козлов В.А. // Физика и техника полупроводников. 2020. Т. 54, № 8. С. 791.

ПРЯМАЯ ЗАДАЧА ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕАКЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР НА РАДИАЦИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ С УЧЕТОМ ДЛИННЫХ ЛИНИЙ

А.Р. Сазонов, А.С. Пузанов

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Введение

Одним из важнейших этапов исследований и испытаний дискретных полупроводниковых приборов, изделий микро- и наноэлектроники является анализ полученных экспериментальных данных и априорной информации, что необходимо для разработки обоснованного заключения по их результатам [1]. К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал, постоянно обновляемый при исследованиях и испытаниях, что дает основу для развития наших представлений о природе радиационных эффектов в полупроводниках, изделиях микро- и наноэлектроники, а также радиоэлектронной аппаратуре на их основе.

Основной проблемой является разнородность имеющихся экспериментальных данных, что обусловлено многими факторами: различными амплитудно-временными и спектрально-энергетическими характеристиками излучений моделирующих установок, условиями проведения облучательных экспериментов, объемом контролируемых параметров и т.д. Принципиальной особенностью проведения радиационных испытаний электронной компонентной базы на моделирующих установках является дистанционный контроль регистрируемых параметров в процессе и после облучения. При этом для обеспечения дистанционного контроля применяются специализированные измерительные линии, учитывающие специфику радиационного воздействия.

Идеальная длинная линия, согласованная с обоих концов, не вносит искажений в передаваемый сигнал. Реальная длинная линия имеет частотно-зависимые коэффициенты затухания и стоячей волны [2]. Импеданс объекта исследований также меняется в процессе облучения, что особенно ярко проявляется при импульсных воздействиях, приводя к многочисленным переотражениям сигнала в коаксиальном кабеле – так называемому «звону» в длинной линии. Таким образом, вышеизложенные факторы вносят существенные искажения в принимаемый осциллографом сигнал переходного ионизационного процесса объекта исследований.

Таким образом, из вышеизложенного следуют постановки прямой и обратной задачи восстановления реакции полупроводниковых структур на радиационное воздействие с учетом длинных линий. В рамках прямой задачи известными считаются все параметры длинной линии и искаженный сигнал переходного ионизационного процесса объекта исследований. Подлежит восстановлению истинная реакция полупроводниковой структуры на радиационное воздействие. В рамках обратной задачи известным считается только искаженный сигнал переходного ионизационного процесса объекта исследований. Подлежит восстановлению истинная реакция полупроводниковой структуры на радиационное воздействие. Параметры длинной линии в этом случае неизвестны и подбираются, исходя из физической «правдоподобности» истинной реакции полупроводниковой структуры на радиационное воздействие. Очевидно, что обратная задача является некорректной.

В данной работе рассмотрено решение прямой задачи восстановления реакции полупроводниковых структур на радиационное воздействие с учетом длинных линий.

Математическая модель

С теоретической точки зрения, истинная форма сигнала переходного ионизационного процесса может быть получена путем решения телеграфных уравнений. В этом случае, однако, существенно затруднена интеграция в модель имеющихся экспериментальных данных зависимостей коэффициента затухания и стоячей волны от частоты. Поэтому в данной работе был развит подход, предложенный в монографии [3], для расчета коэффициента экранирования электромагнитных волн плоским экраном.

Пусть $Z_1(j\omega)$, $Z_2(j\omega)$ и $Z_3(j\omega)$ – характеристическое сопротивление объекта исследований, длинной линии и осциллографа, $\gamma(j\omega)$ – коэффициент распространения. Тогда коэффициент отражения от границы объект исследований – длинная линия $\Gamma_{12}(j\omega)$ и длинная линия – осциллограф $\Gamma_{23}(j\omega)$ определяются по формулам

$$\Gamma_{12}(j\omega) = \frac{Z_2(j\omega) - Z_1(j\omega)}{Z_2(j\omega) + Z_1(j\omega)} \quad (1)$$

$$\Gamma_{23}(j\omega) = \frac{Z_3(j\omega) - Z_2(j\omega)}{Z_3(j\omega) + Z_2(j\omega)}. \quad (2)$$

Можно показать, что амплитудно-частотная характеристика рассогласованной длинной линии определяется по формуле

$$K(j\omega) = \frac{(1 + \Gamma_{12}(j\omega))(1 + \Gamma_{23}(j\omega))e^{-\gamma(j\omega)l}}{1 + \Gamma_{12}(j\omega)\Gamma_{23}(j\omega)e^{-2\gamma(j\omega)l}}, \quad (3)$$

где l – длина длинной линии.

Таким образом, восстановление истинной формы сигнала переходного ионизационного процесса объекта исследований выглядит следующим образом:

- 1) Проводится преобразование Фурье зарегистрированного сигнала $y(t)$ в частотную область $Y(j\omega)$

$$Y(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(t)e^{-j\omega t} dt. \quad (4)$$

- 2) Вычисляется спектр исходного сигнала

$$X(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{K(j\omega)}. \quad (5)$$

- 3) Проводится обратное преобразование Фурье исходного сигнала $X(j\omega)$ во временную область $x(t)$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(j\omega)e^{j\omega t} d\omega. \quad (6)$$

Объект и методика проведения исследований

Для подтверждения адекватности разработанного подхода к восстановлению реакции полупроводниковых структур на радиационное воздействие с учетом длинных линий был проведен ряд облучательных экспериментов на импульсном рентгеновском аппарате «Аргумент». Схема проведения измерений при облучении представлена на рис. 1.



Рис. 1

Объектом исследования являлся кремниевый низкочастотный диод малой мощности 2Д237А. В качестве контрольно-измерительной аппаратуры использовался цифровой осциллограф LECLOY WS-454 с полосой пропускания 500 МГц, который запускался по линии синхронизации одновременно с импульсом ионизирующего излучения. Длина измерительной линии составляла 46 м.

Результаты и их обсуждение

Исходные данные $y(t)$, зафиксированные цифровым осциллографом LECLOY WS-454, и результаты восстановления сигнала переходного ионизационного процесса диода 2Д237А $x(t)$ представлены на рис. 2. Характерный период переколебаний в измерительной линии вследствие ее рассогласования в момент воздействия импульса ионизирующего излучения составляет 460 нс, что соответствует двойному переотражению сигнала от концов измерительной линии. Таким образом, период переколебаний T может рассчитан по формуле

$$T = \frac{2l\sqrt{\epsilon}}{c}, \quad (7)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость распространения сигнала в свободном пространстве, $\epsilon = 2,28$ – диэлектрическая проницаемость полиэтилена. Для длины коаксиального кабеля 46 м период переколебаний составляет 463 нс, что хорошо соответствует экспериментальным данным.

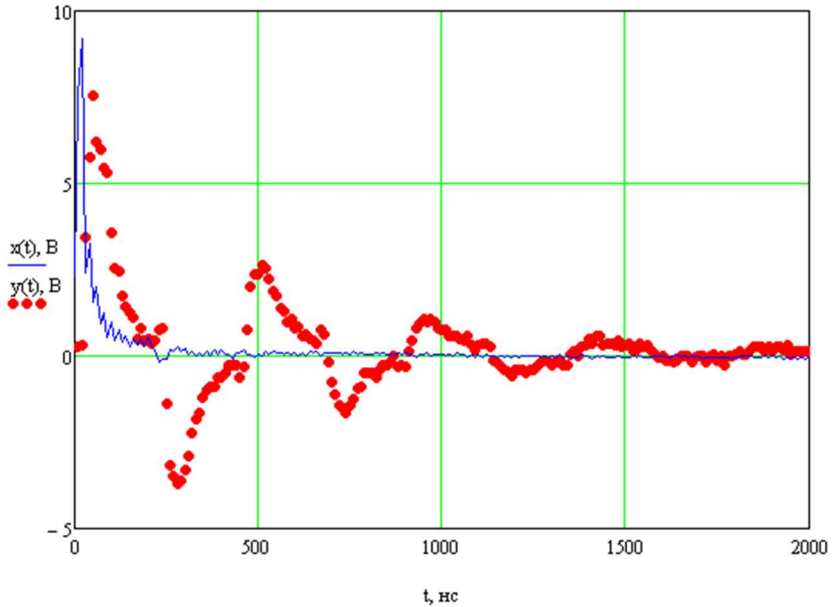


Рис. 2

Таким образом, предложенный подход позволяет восстановить сигнал переходного ионизационного процесса объекта исследований. В ходе дальнейших работ будет рассмотрена обратная задача восстановления реакции полупроводниковых структур на радиационное воздействие с учетом длинных линий. Это потребует разработки математической модели реакции объекта исследований на радиационное воздействие и выработки критериев нахождения наиболее вероятных значений параметров длинной линии.

- [1] Бутин В.И., Зинченко В.Ф., Романенко А.А. Система радиационных испытаний изделий электронной техники. – Владимир: Изд-во ВГУ, 2002, 190 с.
- [2] Белоруссов Н.И., Гроднев И.И. Радиочастотные кабели. – М.: Госэнергоиздат, 1959, 320 с.
- [3] Шапиро Д.Н. Электромагнитное экранирование. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2010. 120 с.

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДОВ РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ СТОК-ЗАТВОРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРОВ С ВЫСОКОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ

**Е.А. Тарасова, С.В. Оболенский, С.В. Хазанова, Н.Н. Григорьева,
О.Л. Голиков, А.С. Пузанов, А.Д. Боженкина**

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Введение

Идея квантово-размерного полевого транзистора с высокой подвижностью электронов в канале (HEMT) возникла на рубеже 70-80 г.г. XX века [1]. Используются как структуры на основе соединений AlGaAs/InGaAs/GaAs, InP/InGaAs/InP, GaAs/AlGaAs, InGaAs/GaAs, так и структуры на основе соединения GaN/AlGaN, в которых квантовая яма формируется за счет возникновения пьезоэлектрической поляризации на границах слоев [2]. Значительное подавление рассеяний носителей заряда в канале HEMT позволяет добиться отличных шумовых и частотных характеристик усилителей на их основе.

Одной из основных характеристик малошумящих усилителей является их коэффициент усиления, то есть способность усиливать слабый входной сигнал в линейном режиме. Нелинейные искажения сигнала в усилителях на основе полевых транзисторов традиционно связывают с нелинейной сток-затворной вольтамперной характеристикой (ВАХ) [3]. В данной работе проводится анализ нелинейности ВАХ полевых транзисторов с затвором Шоттки (ПТШ) на основе объемного GaAs и *p*-HEMT на основе соединений AlGaAs/InGaAs/GaAs и InGaAs/GaAs. В настоящее время подобные соединения наиболее широко используются в производстве СВЧ HEMT. Особенностью транзисторов такого типа является то, что канал может состоять из нескольких слоев различной проводимости. Ранее авторами [4] детально изучались особенности физико-топологического моделирования данных структур, был предложен комплекс аналитических и численных моделей для расчета электрофизических параметров исследуемых приборов с малой погрешностью.

В работе [5] было изучено влияние различных профилей распределения легирующей примеси в канале классических транзисторов с затвором Шоттки (без квантовой ямы) на нелинейность сток-затворных ВАХ. Рассматривалось равномерное распределение примесей в канале ПТШ и ступенчатое легирование, когда нижний слой легировался больше, чем верхний. Показано, что при равномерном распределении примесей, то есть в первом случае, нелинейность сток-затворной ВАХ выше, чем в случае ступенчатого легирования (второй случай).

В современных HEMT, особенно с длинами канала около 100 нм, которые предназначены для работы на частотах 50-150 ГГц и выше, формирование транспорта электронов имеет целый ряд особенностей – квазибаллистический характер движения электронов вдоль канала, модуляция не только толщины, но и длины канала транзистора электрическим полем затвора, сильное влияние особенностей конструкции и технологии изготовления полупроводниковой гетероструктуры на нелинейные искажения усиливаемого сигнала [6]. Данная работа посвящена моделированию указанных процессов и анализу их влияния на линейность сток-затворной характеристики.

Объект исследования и методика расчетов

В качестве основных объектов исследований были выбраны: полевой транзистор с затвором Шоттки, НЕМТ на основе соединений AlGaAs/InGaAs/GaAs и GaAs/InGaAs. Для обеих НЕМТ структур рассматривалось два варианта конструкции – с одним δ -слоем и с двумя, расположенными по обе стороны от квантовой ямы. При рабочих напряжениях в обоих типах транзисторов проводимость в δ -слое отсутствовала.

В работе проводился расчет зонных диаграмм исследуемых структур и профилей распределения электронов путем решения одномерного уравнения Пуассона и совместного решения уравнения Пуассона и Шредингера с помощью оригинального численного метода, реализованного на базе конечно-разностной схемы с учетом напряжения, приложенного в направлении роста структуры [7, 8]. На основе результатов рассчитанных зонных диаграмм и энергетического спектра в работе были получены профили концентрации носителей в канале AlGaAs/InGaAs/GaAs и InGaAs/GaAs НЕМТ при различных напряжениях на затворе в открытом состоянии и вблизи отсечки. По полученным данным проведен аналитический расчет сток-затворных вольт-амперных характеристик, анализировалась крутизна полученных ВАХ.

Достигнутые результаты

На первом этапе работы проводился анализ нелинейности характеристик ПТШ и проводилось сравнение результатов расчетов по предложенному в данной работе подходу с известными ранее данными [3, 5]. Было выявлено, что спад крутизны ВАХ сильнее выражен для транзисторов с однородным легированием. Так же благодаря расчету сток-затворной ВАХ полевого транзистора с затвором Шоттки со ступенчатым, но инвертированным легированием (в случае легирования верхнего слоя канала больше, чем нижнего) было получено, что выходные характеристики подобного типа транзисторов будут иметь максимальную линейность, как с учетом, так и без учета эффекта всплеска скорости носителей заряда в канале.

На втором этапе работы с использованием оригинальной верифицированной методики расчетов был проведен анализ зависимости сток-затворной ВАХ транзисторов на основе соединений AlGaAs/InGaAs и GaAs/InGaAs от толщины спейсерного слоя (расстояние между квантовой ямой и δ -слоем). Получено, что максимальный ток стока I_c и крутизна ВАХ в обоих типах структур будет иметь наибольшее значение при самой малой толщине спейсерного слоя. При этом транзисторы на гетероструктуре AlGaAs/InGaAs/GaAs оказываются более чувствительны к положению δ -слоя относительно квантовой ямы. В работе рассматривались как структуры с одинаковой степенью легирования δ -слоев, так и случай инвертированного легирования, когда слой, находящийся ниже квантовой ямы легирован больше. Данные численных расчетов показывают, что двустороннее δ -легирование приводит к тому, что профиль концентрации носителей проводящего канала с ростом напряжения становится более симметричным по сравнению с односторонним легированием.

По результатам расчетов можно сделать вывод, что инвертированное легирование δ -слоев позволяет получить линейную сток-затворную ВАХ транзистора без учета эффекта всплеска скорости, и уменьшить влияние указанного эффекта на нелинейные искажения, то есть подобное распределение примесей в подзатворной области транзи-

стора может полностью компенсировать нелинейность ВАХ, возникающую из-за влияния всплеска скорости носителей заряда в канале транзистора.

Таким образом, можно заключить, что при проектировании усилителей на основе современных НЕМТ с длинами каналов 100-200 нм необходимо учитывать не только поперечные изменения концентрации носителей заряда в канале, но и продольные, связанные с эффектом всплеска скорости в канале транзистора. Компенсацию всплеска скорости предлагается проводить с помощью увеличения легирования слоя канала, прилегающего к буферу в полевых транзисторах с затвором Шоттки или с помощью добавления второго легирующего δ -слоя в перспективных НЕМТ на основе GaAs.

Работа выполнена в рамках базовой части Государственного задания, проект 0729-2020-0057

- [1] Mimura T. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002. Vol. 50, № 3. P. 780.
- [2] Тарасова Е.А., Оболенский С.В., Галкин О.Е., Хананова А.В., Макаров А.Б. // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, № 11. С. 1543.
- [3] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984.
- [4] Тарасова Е.А., Демидова Д.С., Оболенский С.В. и др. // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46, № 12. С. 1587.
- [5] Williams R.E., Shaw D.W. // IEEE Trans. Electron Devices. 1978. ED-25. P. 600.
- [6] Пожела Ю. Физика быстродействующих транзисторов. – Вильнюс: Мокслас, 1989, 264 с.
- [7] Хазанова С.В., Дегтярев В.Е., Тихов С.В., Байдусь Н.В. // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49, № 1. С. 53.
- [8] Хазанова С.В., Дегтярев В.Е., Григорьева Н.Н., Голиков О.Л. // Физические и физико-химические основы ионной имплантации. РИУ ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 2018. С. 33.

Секция «Электроника»

Заседание секции проводилось 15 мая 2020 г.
Председатель – С.В. Оболенский, секретарь – Е.С. Оболенская.
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского.