

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ СУБМИКРОННЫХ СТРУКТУР «КРЕМНИЙ НА ИЗОЛЯТОРЕ» НА ВОЗДЕЙСТВИЕ НИЗКОИНТЕНСИВНЫХ ПРОНИКАЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С УЧЕТОМ РАЗБРОСА ИХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

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

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород

Развитие твердотельной электроники, связанное с уменьшением размеров активной области полупроводниковых приборов [1, 2], открывает новые перспективы перед современной радиоэлектронной аппаратурой. Вместе с тем во многих практических случаях применения к данной аппаратуре и электронной компонентной базе, входящей в ее состав, предъявляются повышенные эксплуатационные требования, в частности по устойчивости к воздействиям низкоинтенсивных проникающих излучений.

В настоящее время накоплен обширный теоретический и экспериментальный материал по вопросам воздействия ионизирующих излучений различной природы на полупроводниковые приборы с характерными размерами рабочих областей свыше 180 нм. Однако исследования функционирования транзисторных структур с характерными размерами менее 180 нм при радиационном воздействии только начинаются [3]. Уменьшение рабочих областей полупроводниковых приборов до размеров порядка длины релаксации энергии приводит к принципиальному изменению физических процессов движения носителей заряда в коротких структурах. В субмикронных полевых транзисторах движение электронов становится практически безстолкновительным, то есть реализуются условия квазибаллистического режима переноса носителей заряда [4].

Решению этих вопросов, а именно, разработке и апробации компактной модели структуры «кремний на изоляторе» (КНИ), учитывающей короткоканальные эффекты и воздействие низкоинтенсивных проникающих излучений, а также прогнозированию радиационной стойкости существующих структур КНИ посвящена данная работа.

Радиотехнический подход основан на замене исследуемого полупроводникового прибора его компактной моделью. Хотя такой метод дает меньшую точность, его возможно использовать для радиотехнического моделирования. В литературе представлены работы по моделированию с помощью радиотехнического подхода, однако, существующие на данный момент компактные модели [5–7] 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.

Цель работы

Разработка и апробация компактной модели короткоканальной структуры «кремний на изоляторе» с учетом накопления заряда в диэлектрических слоях при воздействии низкоинтенсивных проникающих излучений.

Решаемые задачи

1. Разработка аналитической модели статических вольтамперных характеристик короткоканальной структуры «кремний на изоляторе» с учетом накопления заряда в диэлектрических слоях при воздействии низкоинтенсивных проникающих излучений.

2. Расчет зависимости напряжения смещения на подложке от дозы ионизирующего излучения.

3. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными.

Одним из методов, реализующих защиту от постепенной деградации, является схема автокомпенсации напряжения подложки [8]. При воздействии ионизирующего излучения происходит постепенное накопление заряда в диэлектрике, что приводит к нарушению условий эквипотенциальности и нарушению работы схемы [9, 10]. При накоплении заряда на ловушках, генерируемых в объеме оксида и на поверхности раздела кремний-диэлектрик происходит постепенное смещение рабочей точки транзистора, что приводит к тому, что через канал начинает протекать паразитный ток. Если рассматривать одну конкретную цепочку, то такой процесс не приводит к функциональному отказу схемы, смещение рабочей точки недостаточно для случайного переключения состояний транзистора. При этом, через цепочку начинает протекать ток, что приводит к незначительному увеличению токопотребления одной конкретной ячейки. Однако за счет того, что в микросхеме находятся миллионы таких ячеек, происходит резкое возрастание токопотребления микросхемы,

что приводит к перегреву и температурному выгоранию микросхемы. Блок автосмещения отслеживает эти изменения и компенсирует их, изменяя напряжение на подложке.

В связи с тем, что подобные сложные схемы возможно моделировать только в рамках схемотехнического анализа, возникает необходимость в разработке компактных моделей структур КНИ, учитывающих воздействие ионизирующего излучения. Стоит отметить, что проблема необходимости моделирования подобными методами остро стоит и в других областях электроники, в частности, СВЧ диапазона [11, 12].

За основу модели было взято приближение ультраквасигидродинамического электронного транспорта [2]. Исходная модель не имеет радиационно-чувствительных параметров. Результирующие преобразования с учетом соотношений локального потенциала и превышения затворного напряжения [13] над порогом дают следующее выражение для зависимости тока насыщения:

$$I \approx \frac{C_{\mu} W}{2 L} (V_g - V_t)^2 \sqrt{35 \phi_T}. \quad (1)$$

Здесь C_{μ} – удельная емкость оксида, W – ширина канала, V_g – напряжение на затворе, V_t – пороговое напряжение, ϕ_T – тепловой потенциал.

Радиационно-чувствительным параметром модели являлось пороговое напряжение, изменение которого обусловлено накоплением положительного заряда дырок в захороненном оксиде. И емкость подзатворного диэлектрика, изменение которой обусловлено накоплением заряда на границе раздела полупроводник-диэлектрик, знак которого зависит от типа транзистора – отрицательного для n -канального и положительного для p -канального.

При воздействии ионизирующего излучения на КНИ транзистор накапливается заряд на границе раздела кремний-диэлектрик [14, 15]. Тем самым изменяется пространственное распределение электрического поля, управляющего транзистором. Межэлектродная емкость вычисляется как производная от заряда соответствующего электрода по напряжению между интересующими электродами. Важно отметить, что емкость, как и подвижность, входит в качестве множителя в выражение (1), что обуславливает эквивалентность предлагаемого подхода с традиционным подходом со схемотехнической точки зрения. Однако, с позиций физического моделирования, предлагаемая модель обладает преимуществом по сравнению с традиционным подходом, так как в настоящее время существуют хорошо разработанные теоретические представления накопления заряда [16, 18, 19] и изменения емкости в МОП структурах.

Особо стоит отметить, что накопление заряда на границе раздела полупроводник-диэлектрик, знак которого зависит от типа транзистора – отрицатель-

ного для n -канального и положительного для p -канального, обуславливает немонотонный характер зависимости порогового напряжения для n -канальных транзисторов: при низких дозах облучения доминирует процесс накопления положительного заряда в толще оксида, что приводит к уменьшению порогового напряжения; при высоких дозах облучения доминирует отрицательный заряд на границе раздела полупроводник-диэлектрик, что приводит к увеличению порогового напряжения. Точка минимума порогового напряжения обычно лежит в диапазоне 0,1...1,0 кДж/кг. Зависимость порогового напряжения от дозы облучения для p -канальных транзисторов является монотонно убывающей [20].

Для определения начальных условий, которые необходимо заложить в модель, было проведено измерение напряжения смещения на подложке до облучения микросхем. Всего было измерено 30 микросхем, по результатам измерения была проведена оценка распределения начальных условий.

Из-за значительного разброса начальных условий было построено распределение вероятности, рис. 1. В качестве граничных отклонений был взят разброс на полуширине 2 сигма (что обеспечивает попадание 95 % образцов).

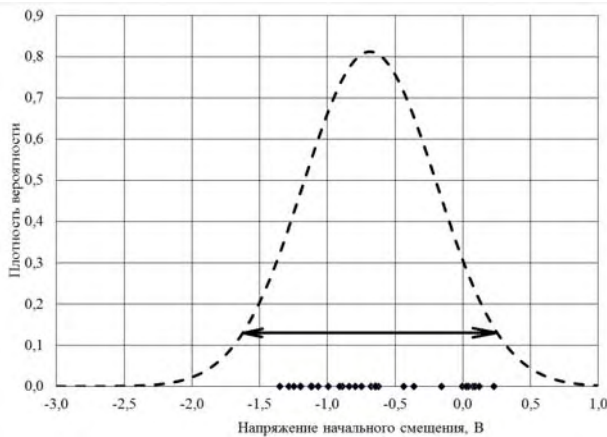
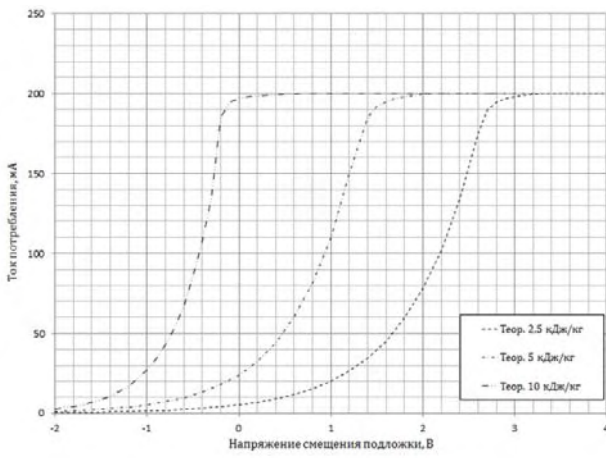
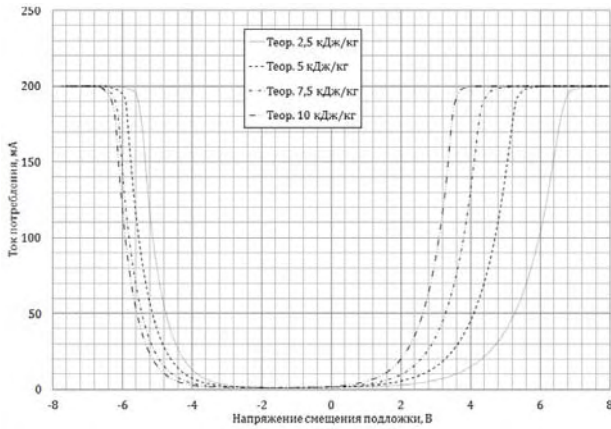


Рис. 1. Оценка разброса начальных условий: • результаты изменения начального напряжения смещения для микросхем из разных партий; - - - оценка распределения напряжения смещения до облучения

В рамках предложенного подхода было осуществлено моделирование процессов изменения статических вольтамперных характеристик при различных внешних условиях (дозах ионизирующего излучения) [17]. В качестве начальных условий выступали пространственные распределения дырок и электронов, технологические параметры транзисторов, а также начальные смещения напряжения подложки, полученные на предыдущем этапе. На рис. 2 представлены примеры статических характеристик, полученных в ходе моделирования.



а



б

Рис. 2. Теоретические статические вольт-амперные характеристики при различных дозах облучения: а – *p*-канальные транзисторы, б – КМОП-ячейки

Из полученных графиков видно, что с увеличением дозы ионизирующего излучения происходит постепенное снижение динамики изменения характеристик [21]. Результаты расчетов статических вольт-амперных характеристик совпадают с экспериментальными данными с погрешностью в 3–9 %, что сопоставимо с дозиметрической погрешностью.

Далее, в рамках схмотехнического анализа, с учетом особенностей работы блоков автосмещения и воздействия ионизирующего излучения было смоделировано поведение микросхемы с нулевым начальным автосмещением. Из графика хорошо заметен локальный максимум при небольших дозах облучения.

Это связано с тем, что накопление заряда на границе раздела полупроводник-диэлектрик, знак которого зависит от типа транзистора – отрицательного для *n*-канального и положительного для *p*-канального, обуславливает немонотонный характер зависимости порогового напряжения для *n*-канальных транзисторов. При низких дозах облучения доминирует процесс накопления положитель-

ного заряда в толще оксида, что приводит к уменьшению порогового напряжения. При высоких дозах облучения доминирует отрицательный заряд на границе раздела полупроводник-диэлектрик, что приводит к увеличению порогового напряжения.

Расчет проводился для микросхем с топологическими нормами 350 нм (рис. 3).

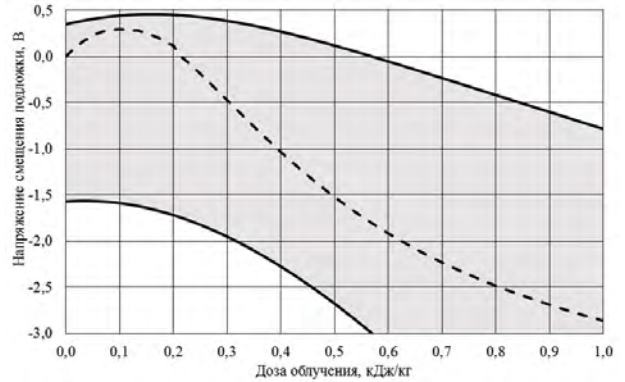


Рис. 3. Зависимость напряжения смещения на подложке от дозы облучения: — результаты расчета граничных отклонений для микросхем; - - - расчет изменения напряжения автосмещения (усредненное значение)

Также были проведены расчеты для микросхем с топологическими нормами 180 нм., рис. 4. Здесь расчет проводился не только в рамках предложенной, но и в рамках уже существующей модели. Это позволяет оценить точность обоих методов на топологиях, где проявляются короткоканальные эффекты.

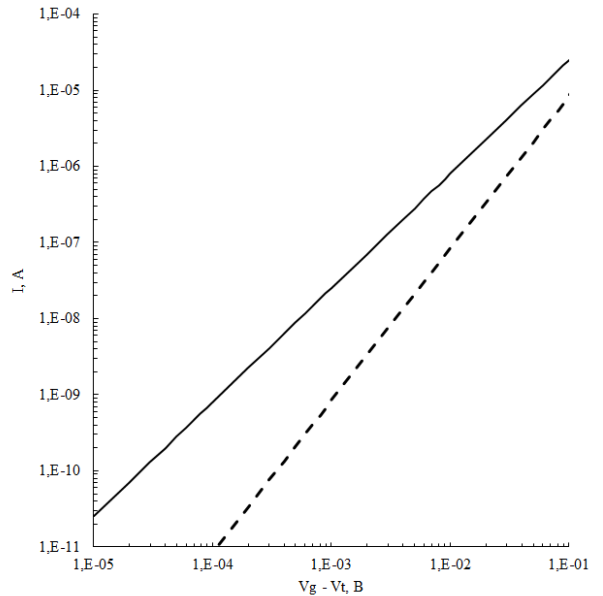
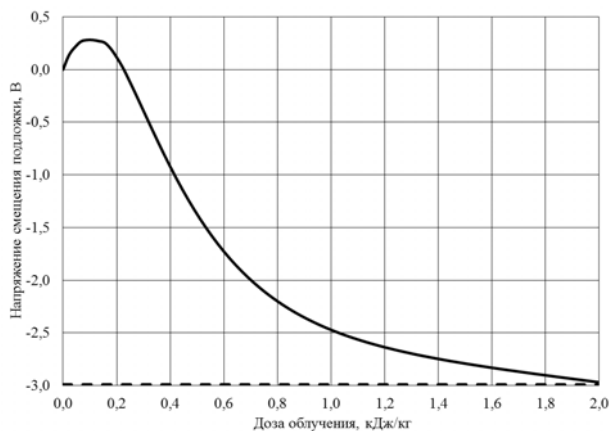


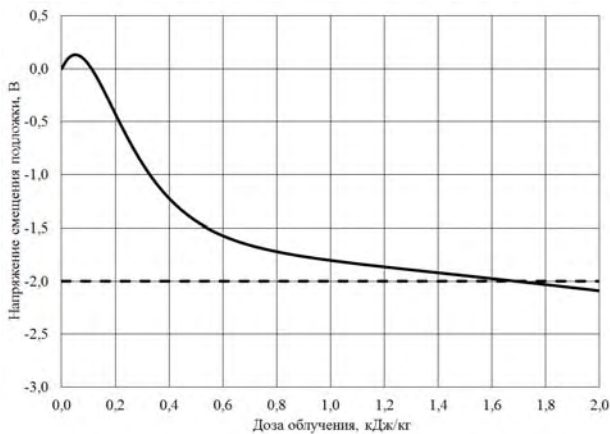
Рис. 4. Зависимость тока насыщения от разности между напряжением на затворе и пороговым напряжением: — предложенная модель; - - - стандартная модель

Были проведены расчеты для микросхем с топологическими нормами 180, 90 и 45 нм. В расчетах также учитывалась, уменьшение управляющего

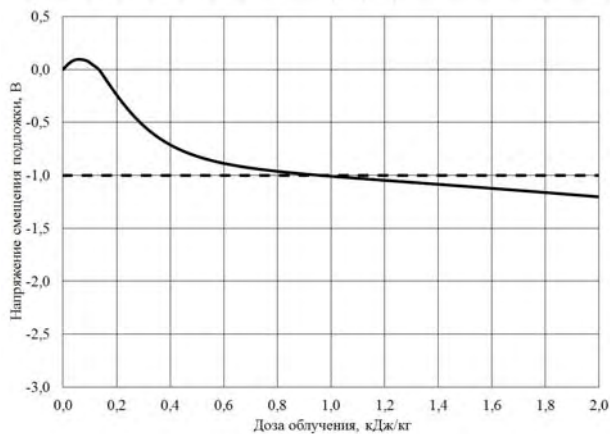
напряжения микросхем, что приводит к изменению уровня параметрического отказа автосмещения. Результаты расчетов представлены на графиках, рис. 5.



а



б



в

Рис. 5. Результаты моделирования зависимости напряжения смещения на подложке от дозы облучения для различных топологических норм: а – 180 нм; б – 90 нм; в – 45 нм; — изменения напряжения автосмещения; - - - уровень параметрического отказа блока автосмещения

Из результатов моделирования, рис. 5, следует, что при уменьшении топологических происходит уменьшение влияния дозовых эффектов [22–24], что хорошо согласуется с известными на данный момент данными и представлениями. Однако, одновременно с этим, уменьшается максимальное напряжение, которое возможно прикладывать к подложке. Тем самым происходит уменьшение уровня, при котором происходит параметрический отказ блока автосмещения [25].

Таким образом, в работе предложена компактная модель короткоканальной структуры «кремний на изоляторе» с учетом накопления заряда в диэлектрических слоях при воздействии низкоинтенсивных проникающих излучений. Разработанная модель эквивалентна традиционной схеме на схемотехническом уровне, однако имеет ряд преимуществ с точки зрения физического моделирования радиационных эффектов. В частности, за счет короткоканальных эффектов отвечают параметры подвижности носителей заряда в канале транзистора и степенной показатель в вольтамперной характеристике. Воздействие низкоинтенсивных проникающих излучений учитывается через изменение порогового напряжения и емкостей структуры. Традиционная модель учитывает только изменение подвижности и порогового напряжения.

В рамках работы было проведено моделирование деградации статических вольтамперных характеристик при воздействии низкоинтенсивных проникающих излучений. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показало адекватность предложенного подхода. Погрешность расчетов составила не более 9 %.

Результаты расчетов зависимости напряжения смещения на подложке совпадают с экспериментальными данными с погрешностью не более 19 %.

Это сопоставимо с дозиметрическими данными, и позволяет использовать предложенную компактную модель для оценки влияния низкоинтенсивных проникающих излучений на цифровые микросхемы с высокой степенью интеграции с различными топологическими нормами, в том числе на стадии технологического проектирования.

Предложенную компактную модель можно использовать для неразрушающей отбраковки готовых цифровых микросхем высокой степени интеграции, оценивая уровень, при котором будет происходить параметрический отказ при воздействии низкоинтенсивных проникающих излучений.

Литература

1. Макушин М. А., Мартынов В. С. Новые аспекты развития современной микроэлектроники // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. № 3 (00153) 2016. С. 110–123.
2. Трофимов Н. А. Особенности долгосрочного развития микроэлектронной промышленности // Наука за рубежом. 2012. № 14. С. 4–17.

3. Добровольский Н. А. Объемные FinFET-транзисторы: конструирование на 14 нм узле и ключевые характеристики // Молодой ученый. 2016. № 11. С. 335–344.
4. Гергель В. А., Мокеров В. Г., Тимофеев М. В., Федоров Ю. В. Ультраквазигидродинамический электронный транспорт в субмикронных полевых МДП-транзисторах и гетеротранзисторах // Физика и техника полупроводников, 2000, Т. 34, № 2. С. 239.
5. Петросянц К. О., Самбурский Л. М., Харитонов И. А. Компактная макромоделль КНИ/КНС МОП-транзистора, учитывающая радиационные эффекты // Известия ВУЗов. Электроника. 2011. № 1(87). С. 20–28.
6. Харитонов И. А. Модификация модели BSIMSOI для учёта эффектов суммарной поглощённой дозы в КНИ КМОП транзисторах // «Электроника, микро- и нанoeлектроника». Сб. науч. трудов. М.: МИФИ, 2006. С. 242–245.
7. Петросянц К. О., Кожухов М. В., Попов Д. А., Орехов Е. В. Математические модели, встроенные в систему TCAD, для учета влияния гамма- и нейтронного излучения на полупроводниковые приборы // Известия ЮФУ. Технические науки 2012. № 6(131). С. 77–82.
8. Лушников А. С., Мещанов В. Д., Рыбалко Е. С., Шепелин Н. А. КМОП КНИ интегральная микросхема с повышенной радиационной стойкостью / Патент РФ 2545325 кл. H01L27/10.
9. Зебрев Г. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. С. 148.
10. Никифоров А. Ю. Моделирование эффектов воздействия импульсного ионизирующего излучения в интегральных преобразователях информации на кремниевых и карбидкремниевых структурах // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Москва: МИФИ, 2003. С. 369.
11. Алимурзоев Г. М., Муравьев М. С., Насеткин К. А., Пузанов А. С., Литовский Д. А. Моделирование утроителя частоты на гетеробарьерном варакторе в 3 мм диапазоне длин волн // Научно-технический вестник Поволжья, 2019. № 7. С. 79–82.
12. Муравьев М. С., Алимурзоев Г. М., Насеткин К. А., Пузанов А. С., Литовский Д. А. Конструирование и расчет СВЧ детектора на базе бескорпусного смесительно-детекторного диода с балочными выводами // Научно-технический вестник Поволжья, 2019. № 7. С. 123–126.
13. Насеткин К. А., Забавичев И. Ю., Потехин А. А., Пузанов А. С. и др. Моделирование реакции субмикронных структур «кремний на изоляторе» на воздействие низкоинтенсивных проникающих излучений // XXIII Международный симпозиум (Нижний Новгород, 11–14 марта 2019 г). Сборник трудов. Н. Новгород, 2019. С. 774–775.
14. Новиков Л. С. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов: учебное пособие. М.: Университетская книга, 2010. С. 192.
15. Вавилов В. С., Кекелидзе Н. П., Смирнов Л. С. Действие излучений на полупроводники. М.: Наука, 1988. С. 192.
16. Аскеров Б. М. Электронные явления переноса в полупроводниках. М.: Наука, 1985. С. 320.
17. Бутин В. И., Зинченко В. Ф., Романенко А. А. Система радиационных испытаний изделий электронной техники. – Владимир: Владимирский государственный университет, 2003. С. 185.
18. Пузанов А. С., Волкова Е. В., Оболенский С. В., Петров С. Г. Применение квазигидродинамической модели для анализа электронного транспорта в полевых и биполярных транзисторах в условиях импульсного ионизирующего излучения с учетом повышенных температур / Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем: Сб. науч. тр. // Под общ. ред. А. Л. Стемковского. М.: ИППМ РАН, 2008. С. 286–291.
19. Пузанов А. С., Оболенский С. В. Особенности переноса электронов в биполярных транзисторных структурах с тонкой базой при воздействии потока квантов высоких энергий // Микроэлектроника. 2012. Т. 4, № 4. С. 304.
20. Насеткин К. А., Пузанов А. С. Реакция микросхем с цепью автокомпенсации токов утечки на воздействие низкоинтенсивных проникающих излучений // XXII научная конференция по радиофизике (г. Нижний Новгород, 15–29 мая 2018 г.). Сборник трудов. Н. Новгород, 2018. С. 66–68.
21. Насеткин К. А., Муравьев М. С., Алимурзоев Г. М., Пузанов А. С. и др. Моделирование характеристик субмикронных структур «кремний на изоляторе» с учетом радиационных эффектов // Научно-технический вестник Поволжья, 2019. № 7. С. 127–130.
22. Забавичев И. Ю., Насеткин К. А., Потехин А. А. и др. Моделирование процесса формирования разупорядоченной области радиационных дефектов в кремнии // XXIII Международный симпозиум (Н. Новгород, 11–14 марта 2019). Сборник трудов. Н. Новгород, 2019. С. 690–691.
23. Киселев В. К., Оболенский С. В., Пузанов А. С. Аналитическая модель деградации характеристик кремниевых биполярных транзисторов с тонкой базой при воздействии дефектообразующих излучений // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2013. № 2–1. С. 56–59.
24. Пузанов А. С., Оболенский С. В. Аналитическая модель переходных ионизационных процессов в кремниевых биполярных транзисторах с тонкой базой при воздействии фотонного импульсного излучения // ВАНТ. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2012. № 4. С. 5–8.
25. Насеткин К. А., Пузанов А. С. Учет воздействия низкоинтенсивных проникающих излучений в структурах «кремний на изоляторе» с цепью автокомпенсации // XXIV Нижегородская сессия молодых ученых. Сборник материалов. Н. Новгород, 2019. С. 203–205.