

УДК 621.382.33

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ НЕМТ
(обзор)**

© 2014 г.

Е.А. Тарасова

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

thelen@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.09.2013

Представлен обзор методов моделирования радиационного воздействия на гетероструктуры и полевые транзисторы с двумерным электронным газом (НЕМТ). Выявлены доминирующие факторы деградации характеристик гетеронаноструктур и транзисторов на их основе.

Ключевые слова: НЕМТ, радиационная стойкость, гетеронаноструктуры InGaAs/InAlAs, GaAlAs/InGaAs, GaN/GaN.

Введение

Развитие полупроводниковой электроники связано с уменьшением размеров активных областей диодов и транзисторов, которые на сегодняшний день достигли значений 0.1 мкм и менее [1, 2]. Полупроводниковые гетероструктуры, используемые в современных СВЧ и КВЧ полевых транзисторах, отличаются своим многообразием – $n-n^+$ Si, $n-n^+$ GaAs, КМОП/КНД, Si/SiGe, InGaAs/InAlAs, GaN/GaN [1, 2, 4]. Это затрудняет выбор оптимальной конструкции прибора для того или иного применения. Компьютерное моделирование физических эффектов позволяет ускорить процесс анализа, а также обработать результаты эксперимента с целью их уточнения и повышения информативности.

Основным физическим процессом при воздействии электронного и гамма-излучения на классические полевые транзисторы с диэлектрической изоляцией затвора является накопление заряда в слоях диэлектрика. На транзисторы с затвором Шоттки (ПТШ) сильнее влияет изменение концентрации и подвижности электронов, происходящее из-за возникновения радиационных дефектов [5–9]. В последнем случае наиболее существенное влияние производят кластеры радиационных дефектов, т.е. целые разупорядоченные области, возникающие при нейтронном облучении [10–14].

В современной микроэлектронике используются транзисторы, содержащие слой двумерного электронного газа, – High Electron Mobility Transistor (НЕМТ). Широкое распространение получили НЕМТ на структурах GaAlAs/InGaAs, InGaAs/InAlAs, GaN/AlGaN. Из-за снижения

толщин слоев в гетероструктурах НЕМТ до размеров, сравнимых с длиной волны электрона, изменяется физика работы транзисторов, в том числе в условиях радиационного облучения. При моделировании работы таких приборов количество оптимизируемых параметров возрастает до 10 и более. В связи с этим требуется разработка новых аналитических и численных моделей, а также их комплексов для проведения быстрой оптимизации параметров структур и транзисторов.

В обзоре рассмотрены статьи и труды конференций как отечественных, так и зарубежных авторов, посвященные проблемам моделирования эффектов при воздействии гамма-нейтронного излучения на GaN и GaAs ПТШ и НЕМТ, предназначенные для работы в СВЧ и КВЧ диапазонах.

Методы моделирования полупроводниковых структур и транзисторов

Для анализа движения носителей заряда в нанометровых (~ 30...200 нм) активных областях СВЧ и КВЧ полевых транзисторов в последние годы разработан целый ряд математических моделей [12, 13, 15–40]. В [12, 14, 27, 28, 34, 36–38] рассмотрены особенности моделирования процессов дефектообразования при воздействии нейтронного излучения на многослойные структуры транзисторов. Как показано в данных работах, для анализа процессов в субмикронных приборах требуется сочетание физико-топологического моделирования в квазигидродинамическом приближении с привлечением метода частиц на основе процедуры Монте-Карло. Наиболее важным преимуществом

является возможность комплексного анализа процессов ионизации, дефектообразования и электронного транспорта в активной области транзисторов.

При сокращении длины рабочей области субмикронных полупроводниковых приборов до 30...300 нм существенными становятся эффекты баллистического и квазibalлистического движения электронов в сильно неодородных электрических полях [15, 16, 31, 39]. В условиях радиационного воздействия уменьшение размеров структур приводит к принципиальным изменениям физики работы приборов, связанным с тем, что 1) характерные пространственные масштабы изменения электрического поля сопоставимы с длинами релаксации энергии и импульса электронов и длиной свободного пробега электронов; 2) характерные размеры рабочих областей приборов сравнимы с расстоянием между кластерами радиационных дефектов; 3) характерные размеры рабочих областей приборов сопоставимы с размерами кластера радиационных дефектов [13, 14].

В этом случае анализ радиационной стойкости предполагает использование двумерного приближения и учет ряда новых эффектов, связанных с разогревом электронного газа при радиационном воздействии и рассеянием носителей на радиационных дефектах. Для анализа радиационного воздействия на субмикронные полупроводниковые приборы был использован квазигидродинамический метод описания движения носителей заряда, система уравнений которого в обобщенном виде приведена ниже [17, 40]:

$$\begin{aligned}
 \Delta V &= \frac{q}{\epsilon_s} (n(F_n) - N_+(F_n) + N_-(F_n)); \\
 \mathbf{j}_t &= \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \quad \mathbf{E} = -\nabla V, \\
 \frac{dm(W)\mathbf{v}(F_n)}{dt} &= -q\mathbf{E} - \frac{m(W)}{\tau_p(F_n)}\mathbf{v}(F_n); \\
 \frac{\partial n(F_n)}{\partial t} &= \frac{1}{q}(\nabla, \mathbf{j}) + G - R; \\
 \frac{\partial (Wn(F_n))}{\partial t} &= (\nabla, \mathbf{j}_W) + (\mathbf{j}_n, \mathbf{E}) + \\
 &+ GW_e - \frac{n(F_n)(W - W_0)}{\tau_W(F_n)}; \\
 \frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi_i}{dz^2} + (W_i - V(z))\psi_i &= 0; \\
 \mathbf{j}_n &= -qn\mathbf{v}(F_n) + q\nabla(D(F_n)n(F_n)); \\
 \mathbf{j}_W &= -n(F_n)W\mathbf{v}(F_n) + \nabla(D(F_n)n(F_n)W).
 \end{aligned} \tag{1}$$

В (1) V – потенциал; n – концентрация электронов; N_+ , N_- – концентрации положительно и отрицательно заряженных ионов (доноров, акцепторов, радиационных дефектов); \mathbf{j}_n , \mathbf{j}_t – плотность электронного и полного тока; \mathbf{j}_W – плотность потока энергии электронов; W , W_0 – неравновесная и равновесная энергия электрона соответственно; τ_W – время релаксации энергии; τ_p – время релаксации импульса; m – эффективная масса электрона; D – коэффициент диффузии электронов; \mathbf{v} – дрейфовая скорость электронов; \mathbf{E} – напряженность электрического поля; ϵ_s – диэлектрическая проницаемость; F_n – флюенс нейтронов; q – абсолютная величина заряда электрона; G – коэффициент генерации носителей заряда при воздействии излучения (учитывается только в момент действия ИИ); R – коэффициент рекомбинации (учитывается только в момент и непосредственно после действия ИИ); W_e – средняя энергия генерируемого электрона.

Для моделирования процессов в транзисторах использовались граничные условия смешанного типа – на границах контактов задавались значения потенциала, концентрации и энергии носителей. При этом значение потенциала могло быть как фиксированным, так и изменяться в произвольных пределах при моделировании процессов в транзисторе в условиях «большого» сигнала. На контактах значение концентрации задавалось равным концентрации в контактном слое GaAs, а температура электронного газа – равной комнатной. На остальных поверхностях расчетной области поддерживались нулевыми градиенты потенциала, концентрации и энергии электронов так, что нулевыми были значения плотностей тока электронов и потока энергии электронного газа [40].

Для определения изменения времён релаксации энергии и импульса, средней энергии и дрейфовой скорости электронов, других параметров полупроводникового материала при радиационном воздействии использовался метод Монте-Карло. Для учета точечных дефектов вводился дополнительный механизм малоуглового рассеяния на основе потенциала взаимодействия Брукса–Херринга [40]. Взаимодействие носителей заряда с кластерами дефектов рассматривалось как упругое рассеяние на включениях, окруженных областью пространственного заряда, с рандомизирующим угловым распределением. Размер блокирующей поток электронов области зависел от энергии налетающего электрона [10, 12, 13, 31]. Результаты расчета зависимости дрейфовой скорости и времени релаксации энергии и импульса до и

после радиационного облучения приведены в работе [40].

В [1, 5, 6] исследовалось влияние нейтронного облучения на электрофизические характеристики *n*-GaAs с различной концентрацией легирующей примеси: 10^{15} и 10^{17} см⁻³, что соответствует уровням легирования буферного слоя и канала полевого транзистора. Были рассчитаны и экспериментально измерены зависимости подвижности и скорости в GaAs от напряженности электрического поля, а также зависимости времен релаксации энергии и импульса от энергии электронов в необлученных и облученных нейтронами образцах [40].

Для физико-топологического моделирования НЕМТ требуется корректное определение исходных данных. Поскольку электрические поля, в которых разгоняются электроны, определяются распределением ионов легирующей примеси и/или встроенными пьезоэлектрическими полями, то особенно важно определение профилей легирования, концентрации и подвижности электронов в слоях наноструктур. Например, при ошибке в измерении профилей, равной 4 нм по координате и 10% по значению максимума, результаты расчетов вольт-амперных характеристик НЕМТ-транзистора имеют погрешность 30–40%, что неприемлемо для проектирования данного вида приборов [41].

Экспериментальное определение параметров структур и транзисторов с двумерным электронным газом

Для проведения корректных численных расчетов необходимо иметь исходные экспериментальные данные, измеренные с высокой точностью. Наиболее важными параметрами полупроводниковых структур транзисторов являются толщины и уровни легирования слоев, концентрация и подвижность электронов [41, 42]. Основными методами анализа указанных параметров являются: вторичная ионная масс-спектрометрия (ВИМС), метод Холла, вольт-фарадное профилирование. Последнее может проводиться с использованием ртутного зонда, контактов, изготавливаемых литографическим способом, и электрохимического профилирования [43].

Важной особенностью процедуры измерения параметров слоев, использующихся затем при проведении физико-топологического моделирования, является требование повышенной точности результатов измерений. Это объясняется тем, что указанные модели весьма требовательны к вычислительным ресурсам из-за использо-

вания двумерных и трехмерных сеточных методов решения систем дифференциальных уравнений квазигидродинамики. Поэтому на проведение оптимизации параметров структур диодов и транзисторов, в том числе и с точки зрения повышения радиационной стойкости, обычно затрачивается значительное время. Если исходные данные о параметрах структуры имеют низкую точность, количество итераций при проведении оптимизации многократно возрастает, что зачастую неприемлемо для практического использования.

Одним из широко применяемых на практике методов измерения является CVG-метод, основанный на измерении зависимостей емкости и проводимости специальных тестовых диодов Шоттки с повышенной площадью контактов, изготовленных на исследуемых структурах [44]. Наличие качественного металлического контакта известной площади дает существенное преимущество – позволяет измерять характеристики структур с высокой повторяемостью результатов, а также проводить расчет профилей легирования и подвижности носителей заряда с низкой погрешностью [44]. Кроме того, вольт-фарадная характеристика, измеряемая на тестовых диодах Шоттки, обычно коррелирует с аналогичными характеристиками приборов, изготавливаемых на тех же структурах. Последнее важно для обоснования качества изготавливаемых структур, а также для оптимизации параметров приборов.

В качестве контактов Шоттки обычно используют аксиально-симметричные контакты двух типов: 1) кольцевой контакт с наружным диаметром ~ 1 мм и вложенным в него круговым контактом (рисунок 1а); 2) кольцевые внешний и внутренний контакты. При этом внутреннее кольцо и круг делают одинаковой площади так, чтобы измеряемая емкость составляла 20...200 пФ (рис. 1б, в).

Профили распределения концентрации $n(d)$ и подвижности μ по глубине определялись с помощью следующих выражений [2]:

$$n(d) = -\frac{C_a^3}{e\epsilon\epsilon_0(\pi r_a^2)^2} \left(\frac{dC_a}{dU} \right)^{-1}, \quad (2)$$

$$\mu(d) = \frac{r_a^2}{8C_a} \frac{dR_a^{-1}}{dU}, \quad d = \frac{\epsilon\epsilon_0}{C_a} \pi r_a^2,$$

где d – координата, относящаяся к измеренному значению.

В работах [42, 44, 45] не указано, можно ли проводить измерения профилей подвижности электронов в полуизолирующем слое подложки, а также на границе проводящего и полуизоли-

рующего слоев. Для определения погрешности измерения подвижности на указанной границе был предложен способ, основанный на измерении вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик специального тестового транзистора Шоттки (рис. 2). Длина затвора составила 100 мкм [42, 44].

Профили концентрации и подвижности в данном транзисторе определялись двумя спосо-

бами. Первый способ основан на дифференцировании зависимостей емкости и проводимости затвора от напряжения затвор – исток согласно выражениям, приведенным ранее (2). Второй базируется на определении проводимости канала транзистора в зависимости от напряжения затвора, исходя из вольт-амперной характеристики транзистора с использованием его аналитической модели [41], и последующем опреде-

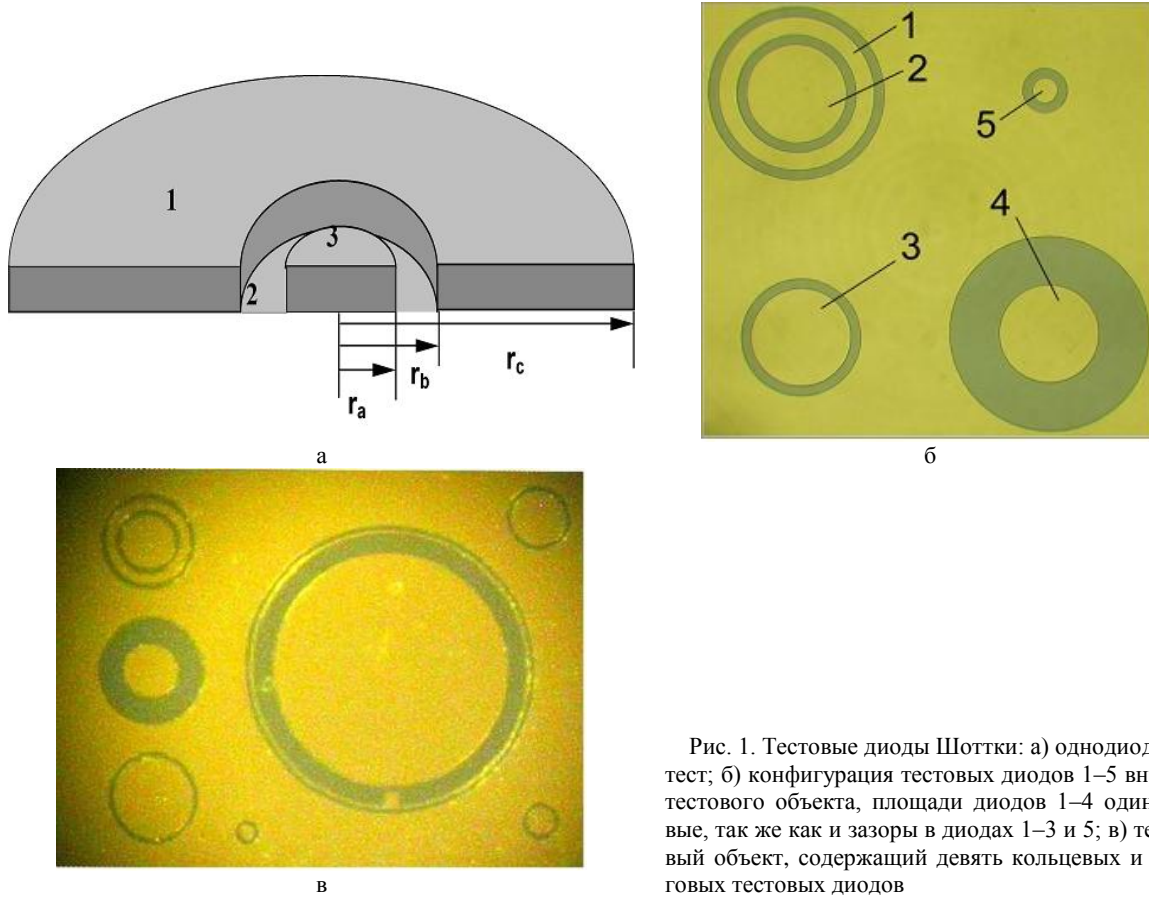


Рис. 1. Тестовые диоды Шоттки: а) однодиодный тест; б) конфигурация тестовых диодов 1–5 внутри тестового объекта, площади диодов 1–4 одинаковые, так же как и зазоры в диодах 1–3 и 5; в) тестовый объект, содержащий девять кольцевых и круговых тестовых диодов

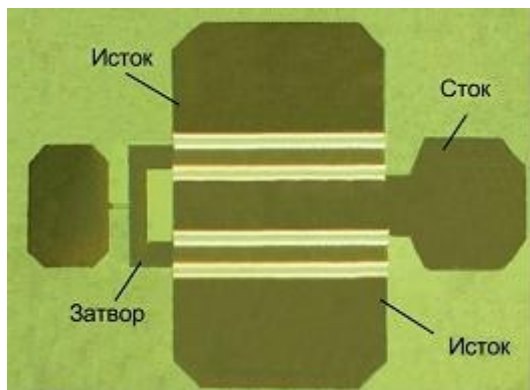


Рис. 2. Микрофотография тестового GaAs-транзистора Шоттки. Длина затвора 100 мкм

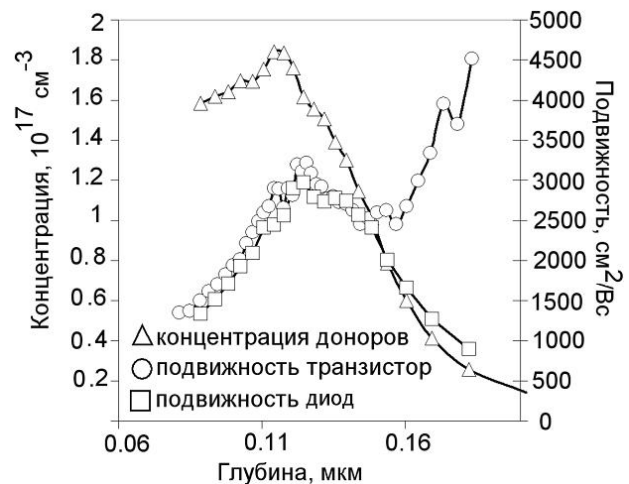


Рис. 3. Сравнение профилей подвижности, полученных из измерений параметров тестового транзистора в «диодном» (т.е. первым способом) и «транзисторном» (т.е. вторым способом) включении

лении профиля подвижности с использованием известного профиля концентрации электронов, полученного первым способом. Полученные первым и вторым способом профили подвижности сравнивались, и определялась погрешность первого способа.

Сопоставление профилей подвижности, полученных двумя методами, показано на рис. 3. Метод измерения подвижности «диодным» способом менее точен и позволяет определять подвижность только в проводящих слоях структуры.

Анализ параметров GaN/AlGaN-структур

В современной микроэлектронике широкое распространение получили полевые транзисторы на основе гетероструктуры GaN/AlGaN [46–60, 67], в которых двумерный электронный газ формируется на границе раздела слоя AlGaN и слоя GaN [46]. Важной особенностью указанных НЕМТ является отсутствие легирующей примеси в полупроводниковой структуре транзисторов. В отличие от традиционных приборов в GaN-НЕМТ проводимость возникает за счет встроенного пьезоэлектрического заряда, играющего роль ионов доноров [46, 47, 58]. Из-за другого механизма возникновения проводимости слоя квантовой ямы в GaN/AlGaN-транзисторах необходимо проведение экспериментальных исследований и моделирования процессов изменения указанных параметров при радиационном воздействии [18, 19].

В этой связи важным является определение скоростей изменения концентрации и подвижности электронов полупроводниковых структур таких приборов при радиационном воздействии. В обычных приборах малая концентрация легирующей примеси (до 10^{19} см⁻³) по сравнению с концентрацией атомов полупроводника ($\sim 10^{22}$ см⁻³) ограничивает уровень радиационного воздействия, при которой транзистор еще остается работоспособным. Дело в том, что при возникновении радиационных дефектов с концентрацией порядка концентрации примеси возникают комплексы точечных дефектов. Такой комплекс захватывает электрон и одновременно является рассеивающим центром. Это ведет к уменьшению как концентрации свободных электронов, так и их подвижности [18]. Проводимость канала уменьшается, и при критическом уровне облучения транзистор закрывается. В GaN-НЕМТ пьезоэлектрический заряд создают атомы самого полупроводника, концентрация которых на три порядка больше, чем ионов легирующей примеси в GaAs-НЕМТ, по-

этому уровень радиационной стойкости таких структур и транзисторов может быть значительно выше. Требовалось определить его значение.

Для экспериментов использовался GaN-НЕМТ на основе гетероструктуры AlGaN/GaN производства компании Cree (США) [18]. Мощность транзистора 10 Вт, рабочая частота 0...6 ГГц. Параметры зонной структуры, профили легирования и подвижности электронов определяли из экспериментальных вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарадных характеристик (ВФХ) транзистора с помощью квазигидродинамической модели [17]. Привлекались данные о конструкции транзисторов из [46]. Пьезоэлектрическая поляризация полупроводниковой структуры транзистора учитывалась в модели путем введения зарядов на границах раздела слоев согласно данным [46]. Радиационное воздействие моделировалось путем изменения электрофизических параметров структуры, как в работе [17].

Облучение проводили на изотопном источнике ГАММАТОК-100М и импульсном ядерном реакторе ЭБР-Л [19]. Средняя энергия гамма-квантов и нейтронов ~ 1 МэВ. Флюенс нейтронов составлял $1 \cdot 10^{14}$ см⁻², мощность экспозиционной дозы в максимуме импульса до $3 \cdot 10^8$ Р/с, экспозиционная доза – 25 кР.

Дифференциальный анализ вольт-фарадных характеристик позволил получить концентрацию электронов в канале транзистора. Оказалось, что после облучения концентрация уменьшилась на величину около 5%. Причиной такого изменения являются радиационные дефекты, захватывающие электроны канала так, как это происходит в СВЧ GaAs-транзисторах с затвором Шоттки [10–12, 31, 32, 37]. Это отчасти объясняет уменьшение порогового напряжения после облучения (рис. 4). Вместе с тем указанного изменения недостаточно для объяснения экспериментально обнаруженного сдвига порогового напряжения затвора транзистора на 0.2 В [18].

Результаты расчетов показали, что сдвиг сток-затворной характеристики обусловлен перезарядкой поверхностных состояний на границах раздела барьерный слой/канал, канал/буферный слой и накоплением положительного заряда в барьерном слое AlGaN [18]. Такой характер изменения ВАХ и ВФХ свойственен скорее кремниевым МДП-транзисторам [8, 9, 62], а не СВЧ GaAs-транзисторам со встроенным каналом на основе двумерного газа электронов, которые значительно ближе по своей конструкции к исследуемым GaN-транзисторам.

Вместе с тем изменение концентрации электронов в канале (рис. 5) определяет снижение тока транзистора и обуславливает его выход из строя, т.е. более сильно влияет на характеристики транзистора [17, 18].

В результате моделирования [18] получена следующая информация об изменении работы полупроводниковой структуры: 1) сдвиг порогового напряжения обусловлен положительным зарядом, захваченным на ловушках в барьерном слое; 2) насыщение зависимости порогового напряжения от мощности дозы гамма-излучения обусловлено насыщением ловушечных уровней; 3) необратимые изменения параметров структур транзистора при облучении нейтронами до уровня 10^{14} см^{-2} не выявлены; 4) расчетный уровень отказа транзистора составляет величину $\approx 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

GaAlAs / InGaAs и InAlAs/InGaAs НЕМТ-структура

Классическими полупроводниковыми структурами для мощных СВЧ НЕМТ являются структуры GaAlAs/GaInAs и InAlAs/InGaAs. В указанных структурах часто используют дельта-легированные слои, т.е. сверхтонкие ($\sim 1 \text{ нм}$) слои с концентрацией доноров более 10^{12} см^{-2} , а также слои узкозонных материалов, в которых формируется квантовая яма, содержащая двумерный электронный газ с высокой подвижностью электронов [1, 44, 45, 63–65].

В [17] моделировались InAlAs/InGaAs-транзистор с каналом толщиной 15 нм и затвором длиной 100 нм, а также AlGaAs/InGaAs-транзистор с каналом толщиной 14 нм и затвором длиной 250 нм. В первом случае в структуре транзистора использовался δ -слой, во втором –

градиентное легирование в слое AlGaAs.

Экспериментальная часть работы состояла в определении вольт-амперной и вольт-фарадной характеристик специальных тестовых диодов Шоттки большой площади и транзисторов с затвором Шоттки КВЧ-диапазона. Для измерений использовались приборы Е7-20 и Л2-56. Применялось компьютерное управление приборами, позволяющее провести статистическое усреднение измерений. Это позволило добиться погрешности измерений емкости затвора $\pm 5 \text{ фФ}$ [17, 44].

Найденные с помощью аналитической обработки вольт-фарадной характеристики приближенные профили легирования и подвижности, с учетом данных изготовителей GaAlAs/GaInAs-структуры, использовались в качестве исходных данных при моделировании. Вычислялись вольт-амперная и вольт-фарадная характеристики тестовых элементов и НЕМТ. Невязка вычисленных и измеренных характеристик минимизировалась путем варьирования профиля легирования. Подобранный профиль считался соответствующим профилю в образцах [17].

Радиационное воздействие моделировалось с помощью введения зависимостей концентрации легирующей примеси и подвижности электронов от флюенса облучения [26, 40]. Указанная выше методика использовалась для анализа изменения вольт-амперной и вольт-фарадной характеристик тестовых диодов Шоттки и НЕМТ. Рассчитаны пороговые значения флюенса, при которых изменения параметров структур проявляются на указанных характеристиках. Показано, что форма зависимости тока от флюенса воздействия отличается от аналогичной зависимости для полевого транзистора с каналом, не содержащим двумерный электронный газ. Про-

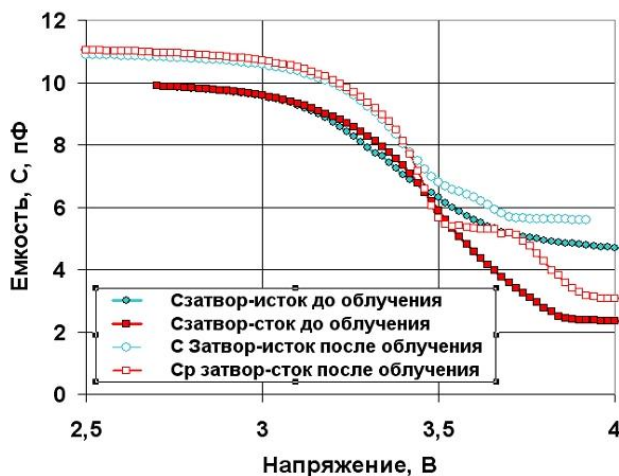


Рис. 4. Экспериментальные зависимости емкости затвора GaN-транзистора до и после гамма-нейтронного облучения. Частота измерительного сигнала 1 МГц

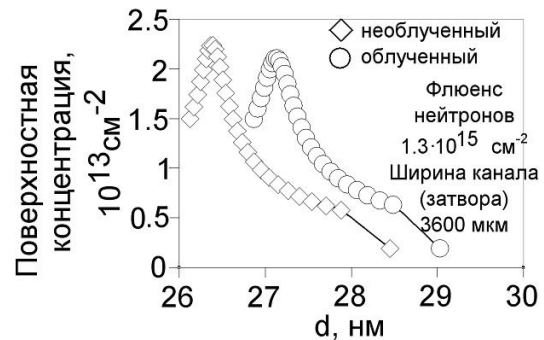


Рис. 5. Результат расчета профиля концентрации электронов в GaN/GaAlN-структуре

демонстрировано, что радиационно-стимулированные изменения вольт-фарадной и вольт-амперной характеристик НЕМТ происходят с разными скоростями – быстрее изменяется вольт-амперная характеристика [17].

Также были проведены измерения вольт-фарадных характеристик для транзисторной структуры до и после радиационного облучения. На рис. 6 приведены измерения вольт-фарадных характеристик и профилей легирования.

В GaN-транзисторах наблюдается сдвиг вольт-фарадной характеристики [18]. Это может быть связано с изменением пространственных зарядов в слоях, прилегающих к слою двумерного газа.

Моделирование тепловых полей и параметров транзистора

Как показано в [63], для расчета величины электрического тока в НЕМТ требуется, во-первых, рассчитать зонную диаграмму структу-

ры, позволяющую определить эффективную толщину канала и концентрацию электронов в нем, во-вторых – определить продольную скорость электронов в канале. Произведение указанных параметров с учетом площади поперечного сечения канала дает ток прибора [2]. Аналогичные вычисления, проведенные для различных напряжений на затворе и стоке прибора, дают вольт-амперную характеристику.

На рис. 7 представлены результаты оригинальных численных расчетов зонной диаграммы и распределения электронов в области канала InAlAs/GaInAs-транзистора под затвором в квантовом приближении из работ [17, 21], а также результаты расчетов из [63]. Видно, что используемая в работе [17] квазигидродинамическая модель адекватно описывает распределение электронов в транзисторе, так как результаты расчета совпадают с данными, полученными в [63] более точным методом Монте-Карло.

Проведенное в [17] сопоставление результатов численных расчетов в квазиклассическом,

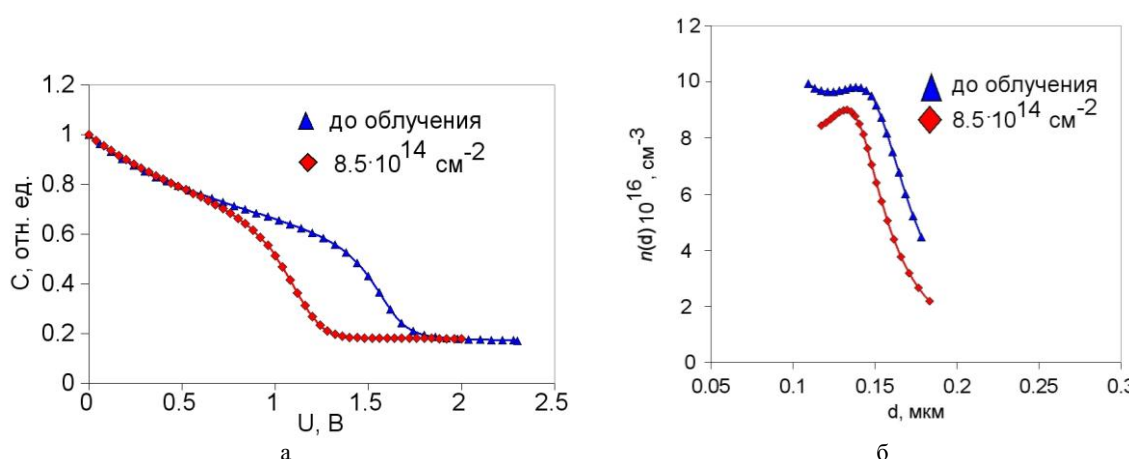


Рис. 6. а) Результаты вольт-фарадных измерений GaAs транзисторной структуры до и после радиационного облучения; б) результаты расчета профиля распределения электронов в транзисторной структуре до и после радиационного облучения

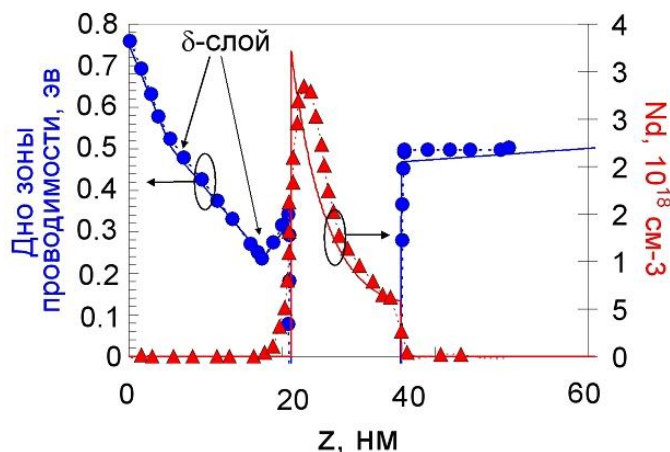


Рис. 7. Зонная диаграмма и распределение концентрации электронов под затвором InAlAs/GaInAs-транзистора: — оригинальный расчет, -о- и -Δ- – данные из [64]

т.е. без учета уравнения Шредингера, и в квантовом приближении показало, что достаточно большая ширина квантовой ямы обусловила наличие не менее 4 энергетических уровней для электронов при рабочих напряжениях питания транзистора (рис. 8). В связи с этим учет квантовых эффектов дает относительно небольшую поправку к результатам вычислений распределения концентрации электронов в квазиклассическом приближении. Величина поправки составляет 10...30% в зависимости от напряжения на затворе как для GaAlAs/GaInAs-, так и для InAlAs/GaInAs-транзисторов.

В [22] предложено вольт-амперные характеристики определять по следующим аналитическим формулам:

$$I = k \cdot W \cdot (a - dg) \cdot N_d \cdot V, \\ dg = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(V_g + V_b)}{eN_d}}, \\ V = \frac{\mu E}{1 + \mu E / V_{нас}}; \quad (3)$$

где W – ширина затвора, N_d – концентрация доноров, μ – подвижность носителей заряда, ϵ – диэлектрическая проницаемость, V_b – контактная разность потенциалов затвора, V_g – напряжение затвора, $V_{нас}$ – скорость насыщения, k – тепловой коэффициент.

Результаты расчета электрофизических параметров по данным аналитическим формулам дают погрешность не более 20%. Использование аналитических выражений (3) дает выигрыш по времени оптимизации до 5 раз [21].

В [17] продемонстрировано, что кратковременная (~ 100 нс) ионизация квантами высоких энергий может приводить к 35-кратному увеличению амплитуды тока в структуре транзистора GaAlAs/GaInAs, что вызывает локальный разогрев канала прибора дополнительно на 120°C. Сопоставление расчетной чувствительности

GaAlAs/GaInAs- и InAlAs/GaInAs-транзисторов к воздействию квантового излучения показало, что амплитуда ионизационных токов и величина разогрева слоя канала отличаются не более чем на 20%.

У современных СВЧ НЕМТ диапазона частот 0.1...0.3 ТГц мощность, рассеиваемая активной частью транзистора, доходит до 1 Вт [2], что обуславливает их сильный нагрев. Обычно мощные транзисторы являются многосекционными, т.е. их активная область, включая канал и электрод затвора, разбита на секции, соединенные параллельно друг с другом. В связи с тем, что секции расположены близко, центральная часть транзистора нагревается до 150–200°C, а его периферия на 10...30°C холоднее [2].

Схема секционного СВЧ-транзистора, рассматриваемого в работах [17, 21, 42], представлена на рис. 9. На рис. 10 представлены результаты моделирования распределения тепловых полей в кристалле транзистора.

В работах [2, 55, 57, 66] приведены описания моделей и результаты аналитических и численных расчетов температуры кристаллов транзисторов. Из-за использования двумерного приближения и других упрощающих приближений погрешность расчета максимальной температуры транзистора данными методами может достигать 60% [21].

Например, в [66] получена следующая аналитическая формула:

$$\Theta[(c \cdot \text{мм})/\text{Вт}] = (\pi k)^{-1} \ln[8c / (\pi d)], \quad (4)$$

где c – толщина кристалла, d – ширина транзистора, k – коэффициент теплопроводности кристалла. Недостатком этой формулы является отсутствие учета расстояния между секциями, сами расчеты проводились для одной секции. Считалось, что количество секций бесконечно. Эта модель «хороша» только для количества секций более десяти [66]. В конструкции КВЧ-транзисторов обычно используют 3–5 секций,

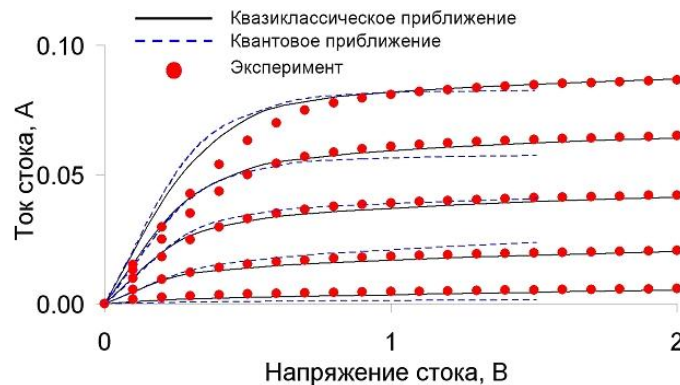


Рис. 8. Вольт-амперные характеристики GaAlAs/GaInAs-транзистора

причем у каждой секции своя температура. Таким образом, формула (4) имеет высокую погрешность. Это важно в случае прецизионного расчета тока транзистора с учетом различия в температуре секций.

В [21, 42] предложено проводить моделирование тепловых полей в кристалле транзистора в два этапа. На первом проводился численный расчет тепловых полей в транзисторах с различной геометрией, на втором синтезировалась аналитическая формула и определялась ее погрешность.

Алгебраическая формула для приближенного расчета максимальной температуры кристалла выглядит следующим образом [21, 42]:

$$T = \frac{P \cdot L_z}{B_1 \cdot d_1 \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{B_1}{d_1}\right)^k \cdot \left(\frac{B_1 \cdot d_1}{L_z^2}\right)^n \times (m + T_{осн}), \quad (5)$$

$$B_1 = b + L_z = b \cdot N + e_1(N-1) + L_z, \quad (6)$$

$$d_1 = d + L_z,$$

где $T_{осн}$ – температура основания кристалла, b и d – длина и ширина секционного транзистора

соответственно, N – количество секций, e_1 – расстояние между секциями, L_z – высота кристалла транзистора, d_1 – ширина поперечного сечения, B_1 – длина поперечного сечения на полувысоте пирамиды (см. рис. 9), P – рассеиваемая мощность, λ – теплопроводность.

В [21, 42], путем сравнения с результатами численных расчетов, были подобраны коэффициенты к формулам (5) и (6): $k = 0.184$, $n = -0.294$, $m = 3.135$. Погрешность расчета по формуле (5) составляет 0.8–2% для величин b и d , сравнимых между собой, 4–8% для $b \leq d \leq 2b$ и 10–15% для $d \ll b$. Такая погрешность позволяет проводить оптимизацию конструкции транзистора в практических условиях.

Выводы

1. Стандартным методом анализа состава и радиационной чувствительности параметров полупроводниковых структур является физикотопологическое моделирование. Анализ процедуры обработки результатов вольт-фарядных

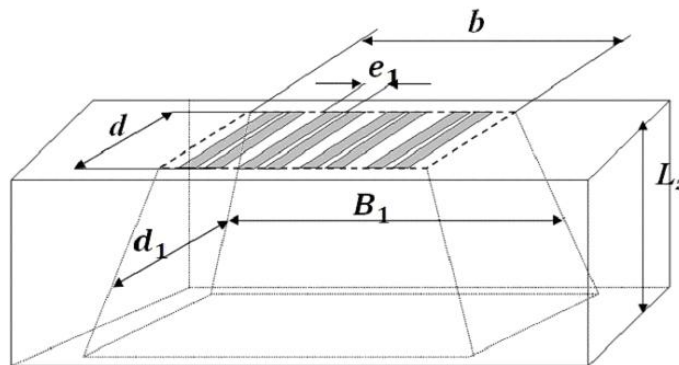


Рис. 9. Геометрическая модель для расчета тепловых полей в кристалле секционного транзистора: d – ширина секции, b – длина секции, e_1 – расстояние между секциями, N – количество секций, L_z – толщина кристалла, d_1 – ширина поперечного сечения, B_1 – длина поперечного сечения на полувысоте пирамиды

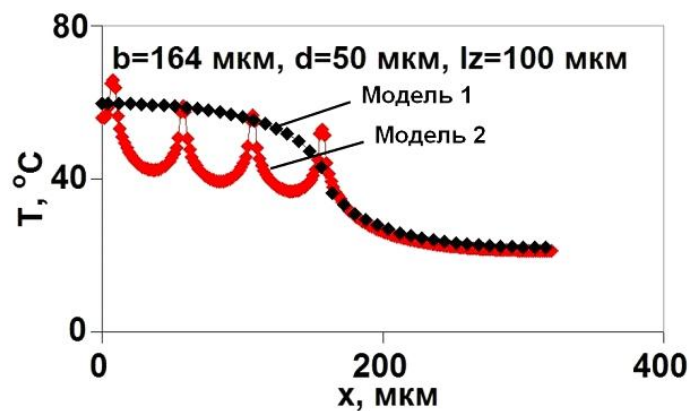


Рис. 10. Расчет распределения тепла в секционном транзисторе. Модель 2 учитывает разогрев поверхности кристалла от каждой секции в отдельности, модель 1 оперирует одной секцией в виде прямоугольника, ширина и длина которого равнялись внешним размерам контактов многосекционного транзистора

измерений структур показывает, что следует принимать во внимание величину погрешности измерительных методов и выбирать комплекс измерительных методик с минимальной погрешностью.

2. Ранее использовались методы измерения вольт-фарадных характеристик, дающие погрешность расчета в 30–40%. В работах [18, 19, 44] разработан и апробирован измерительный стенд, позволяющий проводить измерения с малой погрешностью вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик полупроводниковых гетероструктур и транзисторов до и после радиационного облучения. Погрешность измерений составила не более 3% по концентрации и подвижности. По результатам измерений профили легирования и подвижности электронов определялись с погрешностью не более 10%.

3. В работах [2, 55, 57, 67] были предложены аналитические и численные модели расчета электрических параметров транзистора с учетом разогрева транзистора. Полученные данные имеют погрешность около 50% для аналитических моделей. Численные расчеты проводились с учетом уравнения Шредингера, что увеличивает время расчетов в 5–10 раз. В работах [18, 22, 43] разработана аналитическая модель для расчета тепловых полей и электрофизических параметров в кристалле транзистора. Проведен расчет параметров структур и транзисторов. Результаты расчетов тепловых полей по разработанной аналитической модели получены с погрешностью не более 15%. В работах [18, 19] предложена численная модель, позволяющая рассчитывать электрофизические параметры транзисторов до и после радиационного облучения с учетом квантовых эффектов, что позволило добиться результатов с погрешностью 5%. Использование квазигидродинамической модели для обработки результатов эксперимента позволяет снизить погрешность получаемых данных.

4. В работах [46, 47, 58] были рассмотрены основные физические процессы в GaN-транзисторах. В работе [19] у GaN/GaN-структур выявлен доминирующий эффект – после радиационного облучения изменение концентрации носителей заряда в канале транзистора происходит вследствие накопления заряда на границе раздела в полупроводниковых слоях. Объемный заряд, захваченный ловушками в барьерном слое, обеспечивает сдвиг порогового напряжения. Необратимых изменений характеристик GaN-транзистора до уровня $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ выявлено не было. При уровне облучения $1.3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ зафиксирован уход порогового значения напряжения на 0.2 В в меньшую сторону. Воз-

можная причина указанного отклонения – накопление отрицательно заряженных дефектов в активной области транзистора.

Список литературы

1. Пожела Ю. Физика быстродействующих транзисторов. Вильнюс: Мокслас, 1989. 264 с.
2. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия. М.: Мир, 1991. 632 с.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1. М.: Мир, 1984. 456 с.
4. Demarina N.V., Obolensky S.V. Modeling of ionizing irradiation influence on Schottky-gate field-effect transistor // *Microelectronics Reliability*. 1999. V. 39, № 8. P. 1247–1263.
5. Кулаков В.М., Ладыгин Е.А., Шаховцов В.И. и др. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / Под ред. Е.А. Ладыгина. М.: Сов. радио, 1980. 224 с.
6. Зулиг Р. Радиационные эффекты в ИС на GaAs // Арсенид галлия в микроэлектронике / Под ред. Н. Айнспрука, У. Уиссмана. М.: Мир, 1988. С. 501–547.
7. Агаханян Т.М., Аствацатурьян Е.Р., Скоробогатов П.К. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.
8. Першенков В.С., Попов В.А., Шальнов А.В. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем. М.: Энергоатомиздат, 1988. 256 с.
9. Мырова Л.О., Чепиженко А.В. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. М.: Радио и связь, 1988. 296 с.
10. Киселева Е.В., Оболенский С.В. Структура кластеров радиационных дефектов в полевых транзисторах Шоттки при нейтронном облучении // *Микроэлектроника*. 2006. Т. 35, № 5. С. 371–373.
11. Киселева Е.В., Оболенский С.В., Китаев М.А., Трофимов В.Т. Радиационная стойкость квазибаллистических полевых транзисторов Шоттки с различными конструкциями буферного слоя // *Письма в ЖТФ*. 2005. № 20. С. 58–64.
12. Киселева Е.В., Оболенский С.В. Топология кластеров радиационных дефектов в GaAs полевых транзисторах Шоттки // *Микроэлектроника*. 2006. Т. 35, № 5. С. 374–381.
13. Киселева Е.В., Оболенский С.В. Внутренняя структура кластера радиационных дефектов при нейтронном облучении GaAs // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Физика твердого тела*. 2003. № 1. С. 20–25.
14. Оболенский С.В. Сравнение структуры кластеров радиационных дефектов в полупроводниковых материалах // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2003. № 7. С. 53–56.
15. Киселев В.К., Оболенский С.В., Пузанов А.С. Аналитическая модель деградации характеристик кремниевых биполярных транзисторов с тонкой базой при воздействии дефектообразующих излучений // *Вестник ННГУ*. 2013. № 2 (1). С. 55–59.

16. 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. 41, № 4. С. 304.
17. Тарасова Е.А., Демидова Д.С., Оболенский С.В. и др. InAlAs/InGaAs НЕМТ при облучении квантами высоких энергий // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46, № 12. С. 1587–1592.
18. Басаргина Н.В., Ворожцова И.В., Дубровских С.М. и др. Влияние гамма-нейтронного излучения на GAN-транзисторы с двумерным электронным газом // Вестник ННГУ. 2013. № 3 (1). С. 61–65.
19. Шукайло В.П., Оболенский С.В., Басаргина Н.В. и др. Исследование спектров электролюминесценции светодиодов на основе GaN-структур при нейтронном облучении // Вестник ННГУ. 2012. № 6 (1). С. 51–55.
20. Пузанов А.С., Оболенский С.В. Аналитическая модель переходных ионизационных процессов в кремниевых биполярных транзисторах с тонкой базой при воздействии фотонного импульсного излучения // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2012. № 4. С. 5–8.
21. Тарасова Е.А., Оболенский С.В. Моделирование тепловых полей в мощных InAlAs/InGaAs полевых транзисторах 0.1...0.3 ТГц диапазона частот // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 5 (3). С. 348–353.
22. Пузанов А.С., Оболенский С.В. Применение квазигидродинамического приближения для решения задачи переноса заряда в кремниевых наноструктурах при повышенных температурах // Вестник ННГУ. 2011. № 2 (1). С. 62–70.
23. Shmandin V.B., Kudryavtsev K.E., Kozlov V.A. et al. Electrical and luminescence properties of silicon-based tunnel transit-time light-emitting diodes p+/n+/n-Si:Er // Semiconductors. 2010. V. 44. № 11. P. 1486–1491.
24. Пузанов А.С., Оболенский С.В. Особенности стимулированного излучением пробоя *p-n*-перехода с неоднородным легированием // Микроэлектроника. 2009. Т. 38. № 1. С. 64–74.
25. Оболенский С.В., Демарина Н.В., Волкова Е.В. Основы физики полупроводников. Транспорт носителей заряда в электрических полях: Учебное пособие. Нижний Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2007.
26. Моряшин А.В., Оболенский С.В., Перов М.Ю., Якимов А.В. Проявление естественного старения субмикронных полевых транзисторов на основе GaAs с затвором Шоттки в вольт-амперной характеристике и спектре $1/f$ -шума // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2007. Т. 50. № 2. С. 147–158.
27. Скупов А.В., Оболенский С.В. Особенности моделирования диффузионных процессов в гетерокомпозициях «кремний на сапфире» // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2007. № 4. С. 45–49.
28. Скупов А.В., Оболенский С.В. Моделирование процесса ионно-лучевого легирования гетерокомпозиции «кремний на сапфире» методом Монте-Карло с учетом влияния дислокационной структуры // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2007. № 4. С. 37–42.
29. Скупов А.В., Скупов В.Д., Оболенский С.В. Особенности моделирования методом Монте-Карло профилей пространственного распределения внедряемых ионов и радиационных дефектов в гетерокомпозициях кремний на сапфире // Физика и химия обработки материалов. 2006. № 4. С. 5–11.
30. Kitaev M.A., Kiseleva E.V., Obolenskii S.V. et al. Quantum-aperture formation in a quasi-ballistic MESFET by neutron irradiation // Russian Microelectronics. 2005. V. 34, № 6. P. 359–364.
31. Громов В.Т., Китаев М.А., Киселева Е.В. и др. Формирование квантовых отверстий при нейтронном облучении квазибаллистического полевого транзистора // Микроэлектроника. 2005. Т. 34, № 6. С. 424–430.
32. Киселева Е.В., Китаев М.А., Оболенский С.В. и др. Радиационная стойкость перспективных арсенид-галлиевых полевых транзисторов Шоттки // Журнал технической физики. 2005. Т. 75, № 4. С. 136–138.
33. Kiseleva E.V., Obolensky S.V., Kitaev M.A. et al. Stability of quasi-ballistic MESFETs with various buffer layer structures under irradiation with neutrons possessing different energy spectra // Technical Physics Letters. 2005. V. 31, № 10. P. 881–884.
34. Kiseleva E.V., Kitaev M.A., Obolensky S.V. et al. Radiation resistance of advanced GaAs MESFETs // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. 2005. V. 50, № 4. P. 528–530.
35. Obolenskii S.V. Effect of radiation-induced defect clusters on current flow through a quasi-ballistic GaAs MESFETs // Russian Microelectronics. 2004. V. 33, № 2. P. 116–119.
36. Оболенский С.В. Исследование процессов дальнего действия генерирования при ионном и лазерном облучении транзисторных структур // Микроэлектроника. 2004. Т. 33, № 2. С. 148–152.
37. Оболенский С.В., Феллов А.Г., Киселева Е.В., Мурель А.В. Исследование характеристик встречно-штыревых GaAs-структур при комбинированном протонном, гамма- и нейтронном облучении // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Физика твердого тела. 2003. № 1. С. 96–104.
38. Obolenskii S.V., Skupov V.D. Long-range action effect in irradiation of semiconductor structures with internal interfaces // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2001. V. 16, № 5. P. 833–840.
39. Козлов В.А., Оболенский С.В., Китаев М.А., Демарина Н.В. Воздействие оптического излучения на баллистический полевой транзистор с нанометровым затвором // Нано- и микросистемная техника. 2001. № 4. С. 5.
40. Оболенский С.В. Физико-топологическое моделирование характеристик субмикронных полевых

транзисторов на арсениде галлия с учетом радиационных эффектов: Дис. ... д-ра техн. наук. Н. Новгород, 2002.

41. Алешкин В.Я., Бекин Н.А., Буянова М.Н., Звонков Б.Н., Мурель А.В. Определение плотности состояний квантовых ям в ансамблях квантовых точек вольт-фарадным методом // Физика и техника полупроводников. 1999. Т. 3. Вып. 10. С. 1246–1252.

42. Тарасова Е.А., Оболенская Е.С., Оболенский С.В. Тепловая модель мощных полевых транзисторов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2012. № 4. С. 12–14.

43. Брунков П.Н., Гуткин А.А., Рудинский М.Э. и др. Электрохимическое вольт-емкостное профилирование концентрации свободных носителей заряда в HEMT-гетероструктурах на основе соединений InGaAs/AlGaAs/GaAs // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45, вып. 6. С. 829–835.

44. Оболенская Е.С., Тарасова Е.А., Оболенский С.В. Особенности анализа вольт-фарадных характеристик транзисторов Шоттки при оценке уровня радиационной стойкости // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2012. № 4. С. 9–11.

45. Зубков В.И. Диагностика гетероструктур с квантовыми ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{x-1}\text{As}/\text{GaAs}$ методом вольт-фарадных характеристик: разрывы зон, уровни квантования, волновые функции // Физика и техника полупроводников. 2007. Т. 41, вып. 3. С. 331–337.

46. Федоров Ю.В. Широкозонные гетероструктуры (Al, Ga, In)N и приборы на их основе для миллиметрового диапазона волн // Электроника. 2011. № 2. С. 92–107.

47. Матвеев Ю.А., Федоров Ю.В. Влияние радиации на характеристики элементов на нитриде галлия // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 5. С. 39–48.

48. Громов Д.В., Матвеев Ю.А., Назарова Г.Н. Исследование влияния ионизирующих излучений на характеристики гетероструктурных полевых транзисторов на нитриде галлия // Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС)». Сборник трудов. 2012. № 1. С. 598–603.

49. Pavlidis D., Valizadeh P., Hsu S.H. AlGaIn High Electron Mobility Transistor (HEMT) reliability // 13th GaAs Symposium. Paris, 2005. P. 265–268.

50. Aktas O., Kuliev A., Kumar V. et al. Co-gamma radiation effects on DC, RF, and pulsed I–V characteristics of AlGaIn/GaN HEMT // Solid-State Electronics. 2004. V. 48. P. 471–475.

51. Gu Wenping, Chen Chi, Duan Huantao et al. Co-rays irradiation effect in DC performance of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors // Journal of Semiconductors. 2009. V. 30, № 4. P. 044002-1–044002-5.

52. Vitanov S., Palankovski V., Maroldt S., Quay R. High-temperature modeling of AlGaIn/GaN HEMTs // Solid-State Electronics. 2010. V. 54. P. 1105–1112.

53. Zhang Ming-Lan, Wang Xiao-Liang, Xiao Hong-Ling et al. Neutron irradiation effect in two-dimensional

electron gas of AlGaIn/GaN heterostructures // Chin. Phys. Lett. 2008. V. 25, № 3. P. 1045–1048.

54. Luo B., Allums J.K., Johnson W. et al. Effect of proton radiation on DC and RF performance of AlGaIn/GaN HEMTs // Applied Physics Letters. 2001. V. 79, Issue 14. P. 2196.

55. Chattopadhyay M.K., Tokekar S. Thermal model for DC characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs including self-heating effect and non-linear polarization // Microelectronics Journal. 2008. V. 39. P. 1181–1188.

56. Lenka T.R., Panda A.K. Role of nanoscale AlN and InN for the microwave characteristics of AlGaIn/(Al,In)N/GaN-based HEMT // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45, вып. 9. С. 1258–1265.

57. Danqiong Hou, Bilbro G.L., Trew R.J. Analytic model for conduction current in AlGaIn/GaN HFETs/HEMTs // Active and Passive Electronic Components. 2012. V. 2012. ID 806253.

58. Мокеров В. Г., Кузнецов А.Л., Федоров Ю.В. и др. AlGaIn/GaN – СВЧ HEMT-транзисторы с пробивным напряжением выше 100 В и с предельной частотой усиления по мощности f_{max} до 100 ГГц // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43, вып. 4. С. 561–567.

59. Paccagnella A., Del Papa C., Chitussi P. et al. Radiation induced degradation of electrical characteristics of III-V devices // Gallium Arsenide Applications Symposium, GaAs. 1994, 28-30 April, Turin, Italy. P. 165–168.

60. Yue Hao, Lin-An Yang, Jin-Cheng Zhang. GaN-based semiconductor devices for terahertz technology // Terahertz Science and Technology. 2009. Vol. 1, No. 2. P. 51–64.

61. Киргизова А.В., Скоробогатов П.К., Никифоров А.Ю. и др. Моделирование ионизационной реакции элементов КМОП КНС микросхем при импульсном ионизирующем воздействии // Микроэлектроника. 2008. Т. 38, № 1. С. 28–44.

62. Nikiforov A.Y., Poljakov I.V. Test CMOS/SOS ram for transient radiation upset comparative research and failure analysis // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1995. V. 42, № 6 pt. 1. P. 2138–2142.

63. Moran D.A.J., Kalna K., Boyd E., et al. Self-aligned 0.12 μm T-gate $\text{In}_{53}\text{Ga}_{47}\text{As}/\text{In}_{52}\text{Al}_{48}\text{As}$ HEMT technology utilizing a non-annealed ohmic contact strategy / Department of Electronics Engineering, Glasgow. European Solid-State Device Research, 2003. 16–18 Sept. P. 315–318.

64. Gromov D.V., Elesin V.V., Plevich S.A. et al. Ionizing-radiation response of the GaAs/(Al, Ga)As PHEMT: a comparison of gamma- and x-ray results // Russian Microelectronics. 2004. V. 33, № 2. P. 111–115.

65. Васильевский И.С., Галиев Г.Б., Климов Е.А. и др. Подвижность и дрейфовая скорость электронов в селективно-легированных гетероструктурах InAlAs/InGaAs/InAlAs // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45, вып. 9. С. 1214–1218.

66. Ди Лоренцо Д.В. Канделуола Д.Д. Полевые транзисторы на арсениде галлия. М.: Радио и связь, 1988.

67. Gromov D.V. Radiation effects in microwave devices based on Gallium Nitrid // Crimico-2010. 20th international Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology. Conference Proceedings. 2010. P. 930–933.
68. Zebrev G.I., Pershenkov V.S., Pavlov D.Y. et al. Radiation response of bipolar transistors at various irradiation temperatures and electric biases: modeling and experiment // Proceedings of the European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems. Radecs, 2005.
69. Бойченко Д.В., Кессаринский Л.Н., Соковишин М.А. Влияние режима работы мощных биполярных транзисторов на радиационное поведение // «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2011»: Тез. докл. Росс. научн.-техн. конф., Лыткарино. М.: СПЭЛС-НИИП, 2011. С. 101–102.
70. Корулин А.В., Бойко В.М., Веревкин С.С. и др. Дegradация свойств эпитаксиальных слоев нитрида галлия, облученных реакторными нейтронами // «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2010»: Тез. докл. Росс. научн.-техн. конф., Лыткарино. М.: СПЭЛС-НИИП, 2010. С. 121–122.
71. Вагуев А.С., Анашин В.С., Гульбекян Г.Г. и др. Отработка методики испытаний мощных полевых транзисторов с изолированным затвором на воздействие отдельных тяжелых заряженных частиц // «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2010»: Тез. докл. Росс. научн.-техн. конф., Лыткарино. М.: СПЭЛС-НИИП, 2010. С. 171–172.
72. Вологдин Э.Н., Смирнов Д.С. Расчетно-экспериментальный метод оценки изменения коэффициента передачи тока биполярного транзистора при гамма-нейтронном облучении // «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2010»: Тез. докл. Росс. научн.-техн. конф., Лыткарино. М.: СПЭЛС-НИИП, 2010. С. 81–82.
73. Шестаков А.К., Журавлев К.С. Влияние профиля легирования на характеристики ионно-легированного полевого GaAs транзистора с затвором Шоттки // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45, вып. 12. С. 1652–1161.
74. Kyung-ah Son, Anna Liao, Gerald Lung et al. GaN-based high temperature and radiation-hard electronics for harsh environments // Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications II. 2010.
75. Радиационная стойкость материалов радиотехнических конструкций (справочник) / Под ред. Н.Н. Сидорова, В.К. Князева. М.: Сов. радио, 1976. 568 с.
76. Гусев Н.Г., Машкович В.П., Суворов А.П. Защита от ионизирующих излучений. Том 1. Физические основы защиты от излучений. М.: Атомиздат, 1980. 461 с.
77. Громов Д.В., Полевич С.А., Шифман Р.Г., Шутов К.К. Исследование влияния ионизирующих излучений на характеристики твердотельного модуля СВЧ // «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2007»: Тез. докл. Росс. научн.-техн. конф., Лыткарино. М.: СПЭЛС-НИИП, 2007. С. 39–40.

SIMULATION OF HEMT RADIATION HARDNESS (a review)

Е.А. Tarasova

The article presents an overview of simulation and modeling of radiation effects on heterostructures and field-effect transistors with a two-dimensional electron gas (HEMT). Dominant factors that degrade the characteristics of heterostructures and transistors based on them are identified.

Keywords: HEMT, radiation hardness, heteronanostructures InGaAs/InAlAs, GaAlAs/InGaAs, GaN/GaN.

References

1. Pozhela Ju. Fizika bystrodejstvujushih tranzistorov. Vil'njus: Mokslas, 1989. 264 s.
2. Shur M. Sovremennye pribory na osnove arsenida gallija. M.: Mir, 1991. 632 s.
3. Zi S. Fizika poluprovodnikovyh priborov. T. 1. M.: Mir, 1984. 456 s.
4. Demarina N.V. Obolensky S.V. Modeling of ionizing irradiation influence on Schottky-gate field-effect transistor // Microelectronics Reliability. 1999. V. 39, № 8. P. 1247–1263.
5. Kulakov V.M., Ladygin E.A., Shahovcov V.I. i dr. Dejstvie pronikajushhej radiacii na izdelija jelektronnoj tehniky / Pod red. E.A. Ladygina. M.: Sov. radio, 1980. 224 s.
6. Zulig R. Radiacionnye jeffekty v IC na GaAs // Arsenid gallija v mikrojelektronike / Pod red. N. Ajnspruka, U. Uissmena. M.: Mir, 1988. S. 501–547.
7. Agahanjan T.M., Astvacatur'jan E.R., Skorobogatov P.K. Radiacionnye jeffekty v integral'nyh mikroshemah. M.: Jenergoatomizdat, 1989. 256 s.
8. Pershenkov V.S., Popov V.A., Shal'nov A.V. Poverhnostnye radiacionnye jeffekty v jelementah integral'nyh mikroshem. M.: Jenergoatomizdat, 1988. 256 s.
9. Myrova L.O., Chepizhenko A.V. Obespechenie stojkosti apparatury svjazi k ionizirujushhim i jelektromagnitnym izluchenijam. M.: Radio i svjaz', 1988. 296 s.
10. Kiseleva E.V., Obolenskij S.V. Struktura klasterov radiacionnyh defektov v polevyh tranzistorah Shottki pri nejtronnom obluchenii // Mikrojelektronika. 2006. T. 35, № 5. S. 371–373.

11. Kiseleva E.V., Obolenskij S.V., Kitaev M.A., Trofimov V.T. Radiacionnaja stojkost' kvaziballisticheskikh polevyh tranzistorov Shottki s razlichnymi konstrukcijami bufernogo sloja // *Pis'ma v ZhTF*. 2005. № 20. S. 58–64.
12. Kiseleva E.V., Obolenskij S.V. Topologija klasterov radiacionnyh defektov v GaAs polevyh tranzistorah Shottki // *Mikroelektronika*. 2006. T. 35, № 5. S. 374–381.
13. Kiseleva E.V., Obolenskij S.V. Vnutrennjaja struktura klastera radiacionnyh defektov pri nejtronnom obluchenii GaAs // *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. Serija: Fizika tverdogo tela*. 2003. № 1. S. 20–25.
14. Obolenskij S.V. Sravnenie struktury klasterov radiacionnyh defektov v poluprovodnikovyh materialah // *Poverhnost'. Rentgenovskie, sinhrotronnye i nejtronnye issledovanija*. 2003. № 7. S. 53–56.
15. Kiselev V.K., Obolenskij S.V., Puzanov A.S. Analiticheskaja model' degradacii karakteristik kremnievyh bipoljarnyh tranzistorov s tonkoj bazoj pri vozdeystvii defektoobrazujushhih izluchenij // *Vestnik NNGU*. 2013. № 2 (1). S. 55–59.
16. Puzanov A.S., Obolenskij S.V. Osobennosti perenosa jelektronov v bipoljarnyh tranzistornyh strukturah s tonkoj bazoj pri vozdeystvii potoka kvantov vysokih jenergij // *Mikroelektronika*. 2012. T. 41, № 4. S. 304.
17. Tarasova E.A., Demidova D.S., Obolenskij S.V. i dr. InAlAs/InGaAs HEMT pri obluchenii kvantami vysokih jenergij // *Fizika i tehnika poluprovodnikov*. 2012. T. 46, № 12. S. 1587–1592.
18. Basargina N.V., Vorozhova I.V., Dubrovskih S.M. i dr. Vlijanie gamma-nejtronno izluchenija na GAN-tranzistory s dvumernym jelektronnym gazom // *Vestnik NNGU*. 2013. № 3 (1). S. 61–65.
19. Shukajlo V.P., Obolenskij S.V., Basargina N.V. i dr. Issledovanie spektrov jelektroljuminescencii svetodiodov na osnove GaN-struktur pri nejtronnom obluchenii // *Vestnik NNGU*. 2012. № 6 (1). S. 51–55.
20. Puzanov A.S., Obolenskij S.V. Analiticheskaja model' perehodnyh ionizacionnyh processov v kremnievyh bipoljarnyh tranzistorah s tonkoj bazoj pri vozdeystvii fotonno impul'snogo izluchenija // *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Serija: Fizika radiacionnogo vozdeystvija na radiojelektronnuju apparaturu*. 2012. № 4. S. 5–8.
21. Tarasova E.A., Obolenskij S.V. Modelirovanie teplovyh polej v moshnyh InAlAs/InGaAs polevyh tranzistorah 0.1...0.3 TgC diapazona chastot // *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 2011. № 5 (3). S. 348–353.
22. Puzanov A.S., Obolenskij S.V. Primenenie kvazigidrodinamicheskogo priblizhenija dlja reshenija zadachi perenosa zarjada v kremnievyh nanostrukturah pri povyshennyh temperaturah // *Vestnik NNGU*. 2011. № 2 (1). S. 62–70.
23. Shmandin V.B., Kudryavtsev K.E., Kozlov V.A. et al. Electrical and luminescence properties of silicon-based tunnel transit-time light-emitting diodes p+/n+/n-Si:Er // *Semiconductors*. 2010. V. 44. № 11. P. 1486–1491.
24. Puzanov A.S., Obolenskij S.V. Osobennosti stimulirovannogo izlucheniem probuja p-n-perehoda s neodnorodnym legirovaniem // *Mikroelektronika*. 2009. T. 38. № 1. S. 64–74.
25. Obolenskij S.V., Demarina N.V., Volkova E.V. Osnovy fiziki poluprovodnikov. Transport nositelej zarjada v jelektricheskikh poljah: Uchebnoe posobie. Nizhnij Novgorod: NNGU im. N.I. Lobachevskogo, 2007.
26. Morjashin A.V., Obolenskij S.V., Perov M.Ju., Jakimov A.V. Projavlenie estestvennogo starenija submikronnyh polevyh tranzistorov na osnove GaAs s zatvorom Shottki v vol't-ampernoj karakteristike i spektre 1/f-shuma // *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Radiofizika*. 2007. T. 50. № 2. S. 147–158.
27. Skupov A.V., Obolenskij S.V. Osobennosti modelirovanija diffuzionnyh processov v geterokompozicijah «kremnij na sapfire» // *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Materialy jelektronnoj tehniki*. 2007. № 4. S. 45–49.
28. Skupov A.V., Obolenskij S.V. Modelirovanie processa ionno-luchevogo legirovanija geterokompozicii «kremnij na sapfire» metodom Monte-Karlo s uchetoj vlijanija dislokacionnoj struktury // *Poverhnost'. Rentgenovskie, sinhrotronnye i nejtronnye issledovanija*. 2007. № 4. S. 37–42.
29. Skupov A.V., Skupov V.D., Obolenskij S.V. Osobennosti modelirovanija metodom Monte-Karlo profilej prostranstvennogo raspredelenija vnedrjaemyh ionov i radiacionnyh defektov v geterokompozicijah kremnij na sapfire // *Fizika i himija obrabotki materialov*. 2006. № 4. S. 5–11.
30. Kitaev M.A., Kiseleva E.V., Obolenskij S.V. et al. Quantum-aperture formation in a quasi-ballistic MESFET by neutron irradiation // *Russian Microelectronics*. 2005. V. 34, № 6. P. 359–364.
31. Gromov V.T., Kitaev M.A., Kiseleva E.V. i dr. Formirovanie kvantovyh otverstij pri nejtronnom obluchenii kvaziballisticheskogo polevogo tranzistora // *Mikroelektronika*. 2005. T. 34, № 6. S. 424–430.
32. Kiseleva E.V., Kitaev M.A., Obolenskij S.V. i dr. Radiacionnaja stojkost' perspektivnyh arsenid-gallievych polevyh tranzistorov Shottki // *Zhurnal tehnicheckoj fiziki*. 2005. T. 75, № 4. S. 136–138.
33. Kiseleva E.V., Obolenskij S.V., Kitaev M.A. et al. Stability of quasi-ballistic MESFETs with various buffer layer structures under irradiation with neutrons possessing different energy spectra // *Technical Physics Letters*. 2005. V. 31, № 10. P. 881–884.
34. Kiseleva E.V., Kitaev M.A., Obolenskij S.V. et al. Radiation resistance of advanced GaAs MESFETs // *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*. 2005. V. 50, № 4. P. 528–530.
35. Obolenskij S.V. Effect of radiation-induced defect clusters on current flow through a quasi-ballistic GaAs MESFETs // *Russian Microelectronics*. 2004. V. 33, № 2. P. 116–119.
36. Obolenskij S.V. Issledovanie processov dal'nodejstvujushhego generirovanija pri ionnom i lazernom obluchenii tranzistornyh struktur // *Mikroelektronika*. 2004. T. 33, № 2. S. 148–152.
37. Obolenskij S.V., Fefelov A.G., Kiseleva E.V., Murel' A.V. Issledovanie karakteristik vstrechno-

- shtyrevykh GaAs-struktur pri kombinirovannom protonnom, gamma- i nejtronnom obluchenii // Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. Serija: Fizika tverdogo tela. 2003. № 1. S. 96–104.
38. Obolenskii S.V., Skupov V.D. Long-range action effect in irradiation of semiconductor structures with internal interfaces // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2001. V. 16, № 5. P. 833–840.
39. Kozlov V.A., Obolenskij S.V., Kitaev M.A., Demarina N.V. Vozdejstvie opticheskogo izlucheniya na ballisticheskij polevoj tranzistor s nanometrovym zatvorom // Nano- i mikrosistemnaja tehnika. 2001. № 4. S. 5.
40. Obolenskij S.V. Fiziko-topologicheskoe modelirovanie harakteristik submikronnykh polevykh tranzistorov na arsenide gallija s uchetom radiacionnykh jeffektov: Dis. ... d-ra tehn. nauk. N. Novgorod, 2002.
41. Aleshkin V.Ja., Bekin N.A., Bujanova M.N., Zvonkov B.N., Murel' A.V. Opredelenie plotnosti sostojanij kvantovykh jam v ansambljah kvantovykh toček vol't-faradnym metodom // Fizika i tehnika poluprovodnikov. 1999. T. 3. Vyp. 10. S. 1246–1252.
42. Tarasova E.A., Obolenskaja E.S., Obolenskij S.V. Teplovaja model' moshhnykh polevykh tranzistorov // Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Serija: Fizika radiacionnogo vozdejstviya na radioelektronnuju apparaturu. 2012. № 4. S. 12–14.
43. Brunkov P.N., Gutkin A.A., Rudinskij M.Je. i dr. Jelektrohimičeskoe vol't-emkostnoe profilirovanie koncentracii svobodnykh nositelej zarjada v HEMT-geterostrukturah na osnove soedinenij In-GaAs/AlGaAs/GaAs // Fizika i tehnika poluprovodnikov. 2011. T. 45, vyp. 6. C. 829–835.
44. Obolenskaja E.S., Tarasova E.A., Obolenskij S.V. Osobennosti analiza vol't-faradnykh harakteristik tranzistorov Shottki pri ocenke urovnja radiacionnoj stojkosti // Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Serija: Fizika radiacionnogo vozdejstviya na radioelektronnuju apparaturu. 2012. № 4. S. 9–11.
45. Zubkov V.I. Diagnostika geterostruktur s kvantovymi jamami $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ metodom vol't-faradnykh harakteristik: razryvy zon, urovni kvantovaniya, volnovye funkcii // Fizika i tehnika poluprovodnikov. 2007. T. 41, vyp. 3. S. 331–337.
46. Fedorov Ju.V. Shirokozonnnye geterostruktury (Al, Ga, In)N i pribory na ih osnove dlja millimetrovogo diapazona voln // Jelektronika. 2011. № 2. S. 92–107.
47. Matveev Ju.A., Fedorov Ju.V. Vlijanie radiacii na harakteristiki jelementov na nitride gallija // Nano- i mikrosistemnaja tehnika. 2011. № 5. S. 39–48.
48. Gromov D.V., Matveev Ju.A., Nazarova G.N. Issledovanie vlijaniya ionizirujushhih izluchenij na harakteristiki geterostrukturnykh polevykh tranzistorov na nitride gallija // Vserossijskaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanojelektronnykh sistem (MJeS)». Sbornik trudov. 2012. № 1. S. 598–603.
49. Pavlidis D., Valizadeh P., Hsu S.H. AlGaN High Electron Mobility Transistor (HEMT) reliability // 13th GaAs Symposium. Paris, 2005. P. 265–268.
50. Aktas O., Kuliev A., Kumar V. et al. Co-gamma radiation effects on DC, RF, and pulsed I–V characteristics of AlGaN/GaN HEMT // Solid-State Electronics. 2004. V. 48. P. 471–475.
51. Gu Wenping, Chen Chi, Duan Huantao et al. Co-rays irradiation effect in DC performance of AlGaN/GaN high electron mobility transistors // Journal of Semiconductors. 2009. V. 30, № 4. P. 044002-1–044002-5.
52. Vitanov S., Palankovski V., Maroldt S., Quay R. High-temperature modeling of AlGaN/GaN HEMTs // Solid-State Electronics. 2010. V. 54. P. 1105–1112.
53. Zhang Ming-Lan, Wang Xiao-Liang, Xiao Hong-Ling et al. Neutron irradiation effect in two-dimensional electron gas of AlGaN/GaN heterostructures // Chin. Phys. Lett. 2008. V. 25, № 3. P. 1045–1048.
54. Luo B., Allums J.K., Johnson W. et al. Effect of proton radiation on DC and RF performance of AlGaN/GaN HEMTs // Applied Physics Letters. 2001. V. 79, Issue 14. P. 2196.
55. Chattopadhyay M.K., Tokekar S. Thermal model for DC characteristics of AlGaN/GaN HEMTs including self-heating effect and non-linear polarization // Microelectronics Journal. 2008. V. 39. P. 1181–1188.
56. Lenka T.R., Panda A.K. Role of nanoscale AlN and InN for the microwave characteristics of AlGaN/(Al,In)N/GaN-based HEMT // Физика и техника полупроводников. 2011. T. 45, вып. 9. C. 1258–1265.
57. Danqiong Hou, Bilbro G.L., Trew R.J. Analytic model for conduction current in AlGaN/GaN HFETs/HEMTs // Active and Passive Electronic Components. 2012. V. 2012. ID 806253.
58. Mokerov V. G., Kuznecov A.L., Fedorov Ju.V. i dr. AlGaN/GaN – SVCh HEMT-tranzistory s probivnym napjazheniem vyshe 100 V i s predel'noj chastotoj usilenija po moshhnosti f_{max} do 100 GGc // Fizika i tehnika poluprovodnikov. 2009. T. 43, vyp. 4. C. 561–567.
59. Paccagnella A., Del Papa C., Chitussi P. et al. Radiation induced degradation of electrical characteristics of III-V devices // Gallium Arsenide Applications Symposium, GaAs. 1994, 28-30 April, Turin, Italy. P. 165–168.
60. Yue Hao, Lin-An Yang, Jin-Cheng Zhang. GaN-based semiconductor devices for terahertz technology // Terahertz Science and Technology. 2009. Vol. 1, No. 2. P. 51–64.
61. Kirgizova A.V., Skorobogatov P.K., Nikiforov A.Ju. i dr. Modelirovanie ionizacionnoj reakcii jelementov KMOP KNS mikroschem pri impul'snom ionizirujushhem vozdejstvii // Mikrojelektronika. 2008. T. 38, № 1. S. 28–44.
62. Nikiforov A.Y., Poljakov I.V. Test CMOS/SOS ram for transient radiation upset comparative research and failure analysis // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1995. V. 42, № 6 pt. 1. P. 2138–2142.
63. Moran D.A.J., Kalna K., Boyd E., et al. Self-aligned 0.12 μm T-gate $\text{In}_{.53}\text{Ga}_{.47}\text{As}/\text{In}_{.52}\text{Al}_{.48}\text{As}$ HEMT technology utilizing a non-annealed ohmic contact strategy / Department of Electronics Engineering, Glasgow. European Solid-State Device Research, 2003. 16–18 Sept. P. 315–318.
64. Gromov D.V., Elesin V.V., Polevich S.A. et al. Ionizing-radiation response of the GaAs/(Al, Ga)As PHEMT: a comparison of gamma- and x-ray results // Russian Microelectronics. 2004. V. 33, № 2. P. 111–115.

65. Vasil'evskij I.S., Galiev G.B., Klimov E.A. i dr. Podvizhnost' i drevfovaja skorost' jelektronov v selektivno-legirovannyh geterostrukturah InAlAs/InGaAs/InAlAs // Fizika i tehnika poluprovodnikov. 2011. T. 45, vyp. 9. C. 1214–1218.
66. Di Lorenzo D.V., Kandeluola D.D. Polevye tranzistory na arsenide gallija. M.: Radio i svjaz', 1988.
67. Gromov D.V. Radiation effects in microwave devices based on Gallium Nitrid // Crimico-2010. 20th international Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology. Conference Proceedings. 2010. P. 930–933.
68. Zebrev G.I., Pershenkov V.S., Pavlov D.Y. et al. Radiation response of bipolar transistors at various irradiation temperatures and electric biases: modeling and experiment // Proceedings of the European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems. Radece, 2005.
69. Bojchenko D.V., Kessarinskij L.N., Sokovishin M.A. Vlijanie rezhima raboty moshhnyh bipoljarnyh tranzistorov na radiacionnoe povedenie // «Radiacionnaja stojkost' jelektronnyh sistem – Stojkost'-2011»: Tez. dokl. Ross. nauchn.-tehn. konf., Lytkarino. M.: SPJeLS-NIIP, 2011. S. 101–102.
70. Korulin A.V., Bojko V.M., Verevkin S.S. i dr. Degradacija svojstv jepitaksial'nyh sloev nitrida gallija, obluchennyh reaktornymi nejtronami // «Radiacionnaja stojkost' jelektronnyh sistem – Stojkost'-2010»: Tez. dokl. Ross. nauchn.-tehn. konf., Lytkarino. M.: SPJeLS-NIIP, 2010. S. 121–122.
71. Vatuev A.S., Anashin V.S., Gul'bekjan G.G. i dr. Otrabotka metodiki ispytanj moshhnyh polevyh tranzistorov s izolirovannym zatvorom na vozdejstvie ot del'nyh tjazhelyh razrjazhennyh chastic // «Radiacionnaja stojkost' jelektronnyh sistem – Stojkost'-2010»: Tez. dokl. Ross. nauchn.-tehn. konf., Lytkarino. M.: SPJeLS-NIIP, 2010. S. 171–172.
72. Vologdin Je.N., Smirnov D.S. Raschetno-jeksperimental'nyj metod ocenki izmenenija kojefficienta peredachi toka bipoljarnogo tranzistora pri gamma-nejtronnom obluchenii // «Radiacionnaja stojkost' jelektronnyh sistem – Stojkost'-2010»: Tez. dokl. Ross. nauchn.-tehn. konf., Lytkarino. M.: SPJeLS-NIIP, 2010. S. 81–82.
73. Shestakov A.K., Zhuravlev K.S. Vlijanie profilja legirovanija na harakteristiki ionno-legirovannogo polevogo GaAs tranzistora s zatvorom Shottki // Fizika i tehnika poluprovodnikov. 2011. T. 45, vyp. 12. C. 1652–1161.
74. Kyung-ah Son, Anna Liao, Gerald Lung et al. GaN-based high temperature and radiation-hard electronics for harsh environments // Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications II. 2010.
75. Radiacionnaja stojkost' materialov radiotekhnicheskikh konstrukcij (spravochnik) / Pod red. N.N. Sidorova, V.K. Knjazeva. M.: Sov. radio, 1976. 568 s.
76. Gusev N.G., Mashkovich V.P., Suvorov A.P. Zashhita ot ionizirujushhijh izluchenij. Tom 1. Fizicheskie osnovy zashhity ot izluchenij. M.: Atomizdat, 1980. 461 s.
77. Gromov D.V., Polevich S.A., Shifman R.G., Shutov K.K. Issledovanie vlijanija ionizirujushhijh izluchenij na harakteristiki tverdotel'nogo modulja SVCh // «Radiacionnaja stojkost' jelektronnyh sistem – Stojkost'-2007»: Tez. dokl. Ross. nauchn.-tehn. konf., Lytkarino. M.: SPJeLS-NIIP, 2007. S. 39–40.