

Теоретические и экспериментальные исследования вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик НЕМТ структур и полевых транзисторов

© Е.А. Тарасова⁺, Е.С. Оболенская⁺, А.В. Хананова⁺, С.В. Оболенский⁺, В.Е. Земляков^{*},
В.И. Егоркин^{*}, А.В. Неженцев⁺, А.В. Сахаров[▲], А.Ф. Цацульников[▲],
В.В. Лундин[▲], Е.Е. Заварин[▲], Г.В. Медведев[▼]

⁺ Нижегородский государственный университет Н.И. Лобачевского,
603600 Нижний Новгород, Россия

^{*} Национальный исследовательский университет „Московский институт электронной техники“ (МИЭТ),
124498 Москва, Зеленоград, Россия

[▲] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[▼] ОАО «Научно-производственное предприятие „Салют“»,
603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: obolensk@rf.unn.ru

(Получена 27 апреля 2016 г. Принята к печати 10 мая 2016 г.)

Проведены исследования чувствительности параметров классических n^+/n^- GaAs и AlGaIn/GaN структур с двумерным электронным газом (НЕМТ) и полевых транзисторов на их основе к γ -нейтронному воздействию. Определены уровни их радиационной стойкости. Разработан метод экспериментального исследования структур на основе дифференциального анализа вольт-фарадных характеристик, позволяющий определять слои структуры, в которых накапливаются радиационные дефекты. Впервые предложена методика, позволяющая учесть изменение площади обкладок измеряемой емкости барьерного контакта, связанной с возникновением кластеров радиационных дефектов, формирующих диэлектрические включения в слое двумерного электронного газа.

1. Введение

Для проведения корректного численного физико-топологического моделирования работы полупроводниковых приборов до и после радиационного воздействия необходимо иметь исходные экспериментальные данные, полученные с малой погрешностью. Наиболее важными для проведения моделирования работы транзисторов квазигидродинамическим методом, являются такие параметры как: толщины и уровни легирования слоев, распределение концентрации электронов в этих слоях [1].

При воздействии ионизирующих излучений, таких как γ - и γ -нейтронное излучения спектра деления со средней энергией 1 МэВ, в полупроводниковых структурах образуются точечные дефекты и их скопления — кластеры радиационных дефектов [2–9], что приводит к изменению концентрации и перераспределению электронов в слоях структуры. Указанное распределение экспериментально можно получить путем дифференцирования измеренных вольт-фарадных характеристик [2]. Предлагаемая в статье методика позволяет определить не только профиль концентрации электронов с приемлемой для последующего моделирования погрешностью, но и уточнить месторасположение дефектов в структуре после облучения на основании полученных данных о распределении концентрации электронов в слоях.

2. Объект исследования и методика эксперимента

В [3] было показано, что после радиационного облучения стандартный дифференциальный анализ вольт-фарадных характеристик диодов на AlGaIn/GaN-структурах хоть и позволяет получать данные о характере изменения параметров структуры, но открытым остается вопрос о причинах смещения профилей распределения электронов после облучения. Стандартная обработка экспериментальных данных показывала, что толщина полупроводниковых слоев изменялась после радиационного облучения, что явно было „ложной“ информацией. Поэтому необходима разработка специальной методики измерений параметров структур и транзисторов на их основе как до радиационного воздействия так и после, свободной от указанного недостатка.

Забегая вперед, укажем, что важным преимуществом разработанной методики является возможность анализа влияния дефектов, в том числе и радиационной природы на величину затягивания фронтов импульсов, усиливаемых транзистором. Обычно подобное связывают с перезарядкой глубоких уровней дефектов, обуславливающих указанные процессы в микросекундном диапазоне времен.

В работе проводились измерения вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарадных (ВФХ) характеристик n^+/n^- GaAs и AlGaIn/GaN НЕМТ-структур и транзисторов с барьерами Шоттки. Структуры исследовались

с помощью измерений характеристик круговых и кольцевых тестовых диодов Шоттки [3], предназначенных для более точного анализа параметров структуры и изготавливаемых вместе с транзисторами на одной подложке. Сопоставление поведения изученных ранее GaAs транзисторов и новых AlGaIn/GaN HEMT позволило как проверить разрабатываемую методику, так и корректно объяснить наблюдаемые эффекты.

Исследовались полупроводниковые структуры, имеющие концентрацию электронов в проводящем слое $\sim 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ для GaAs-структур и $\sim 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ для AlGaIn/GaN HEMT-структур. Проводящий слой отстоял от барьерного электрода на расстоянии 10–100 нм, что позволяло проводить анализ его параметров с помощью измерения и последующей обработки вольт-фарядных характеристик указанного электрода. Вольт-амперные характеристики контролировались для определения уровня утечек барьерного контакта, так как они сильно влияют на корректность измерений его емкости. Отдельно исследовалась проводимость слоев структур, измеряемая в одном цикле и измерениями емкости.

Характерные размеры диодов и методика их использования обсуждались в работе [3]. Фотография исследуемых GaN HEMT приведена на рис. 1.

Измерения вольт-фарядных характеристик для каждой структуры проводились 6 раз подряд в течение одного дня в отсутствие фонового освещения в диапазоне значений напряжения смещения U от 0 до -2.5 В с шагом 0.02 В . Для каждого значения U производилось 30 измерений емкости, с дальнейшим усреднением. Длительность одного измерения ВФХ составляла около 30 мин, временной промежуток между измерениями не превышал 5 мин. В ходе каждого измерения из-за наличия напряжения смещения, действующего на исследуемую структуру в процессе измерений, происходила перезарядка дефектов, поэтому вольт-фарядные характеристики незначительно смещались. Повторное

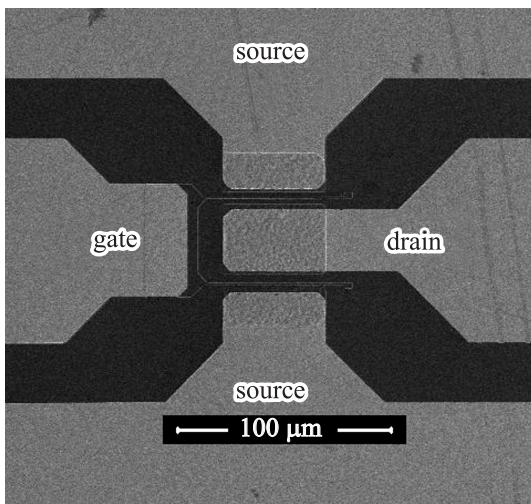


Рис. 1. Фотография исследуемого HEMT на основе гетеро-структуры AlGaIn/GaN.

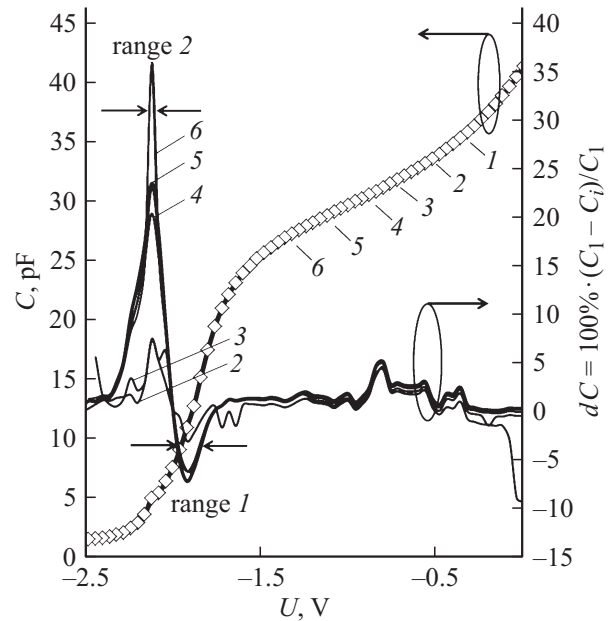


Рис. 2. Вольт-фарядные характеристики GaAs-структур, последовательно облученных γ -излучением со значением экспозиционной дозы 10^7 Р и γ -нейтронным излучением с флюенсом нейтронов $0.8 \cdot 10^{15} \text{ нейтрон/см}^2$, и их повторяемость при проведении последующих измерений. (Цифрами указан номер i -го измерения).

шестикратное измерение характеристик проводилось не ранее чем через сутки после первой серии. Так как визуально ВФХ были неотличимы, отличие первого измерения от последующих строилось по формуле, указанной на рис. 2.

Месторасположение слоя структуры, в котором имеется наибольшее количество электрически активных дефектов, определяли по максимальному значению dC , а затем проводилось вычисление профиля концентрации электронов и дефектов в указанном слое структуры.

Распределение концентрации электронов по глубине структуры определялось путем дифференцирования измеренных ВФХ с использованием процедуры сглаживания исходных данных [3]. Сопоставление профилей распределения электронов, полученных последовательно для каждой измеренной ВФХ, позволяло оценивать концентрацию дефектов по величине изменения концентрации электронов.

Уточнение параметров структур HEMT проводилось следующим образом. Измерения ВФХ и их последующая стандартная дифференциальная обработка позволяли приблизительно определить профиль распределения электронов по глубине структуры с погрешностью $\sim 10\text{--}20\%$ [3]. Подстановка указанного профиля в физико-топологическую модель транзистора [3,4], основанную на квазигидродинамическом приближении [1,4], позволяла рассчитать ВАХ транзистора, которая сравнивалась с экспериментальной. Невязка расчета и эксперимента нивелировалась путем итерационной моди-

фикации параметров структуры так, чтобы они не противоречили результатам вольт-амперных и вольт-фарадных измерений с учетом погрешности. Затем процедура расчета повторялась. В результате нескольких подобных итераций определялся такой профиль легирования, который при подстановке в физико-топологическую модель давал вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики, совпадающие с экспериментальными с погрешностью менее 5–10%.

После этого проводилось сопоставление результатов моделирования и эксперимента с использованием подобранных параметров полупроводниковой структуры. Моделировалось влияние перезарядки технологических и радиационных дефектов в микросекундном диапазоне времен на характерное затягивание фронтов импульсов тока затвора и стока. Сопоставление измеренных импульсных характеристик транзисторов до и после облучения сравнивалось с результатами расчета.

3. Результаты исследований

На первом этапе исследований n^+/n^- GaAs-структур были проведены измерения ВФХ до облучения описанным выше образом. Полученное в результате данных измерений значение dC не превышало 3–4% во всем диапазоне напряжений смещения. Поэтому надежно регистрируемое значение $dC = 10–15\%$ после облучения принимали за свидетельство наличия в исследуемых структурах слоев, содержащих большую, по сравнению с другими слоями, концентрацию дефектов.

На втором этапе исследований структуры подвергались воздействию импульсного γ -излучения со средней энергией квантов 1 МэВ и значением экспозиционной дозы от 10^5 до 10^7 Р. После облучения измерения вольт-фарадных характеристик структур по описанной выше методике повторялись и проводился анализ с целью определения местоположения дефектов в структуре.

Результаты эксперимента показали, что зависимость $dC(U)$ характеризуется наличием минимума в диапазоне напряжений 1.5–1.8 В. Используя данные результаты выявлено, что максимальная концентрация дефектов находится на глубине 100–300 нм на границе раздела слоев „легированный–нелегированный GaAs“ и имеет величину $\sim 10^{14}$ см $^{-3}$. Указанные результаты повторили данные, полученные нами ранее [3].

На третьем этапе исследований было проведено облучение данных структур γ -нейтронным излучением с флюенсом нейтронов $1.2 \cdot 10^{13} - 0.8 \cdot 10^{15}$ н/см 2 . После облучения также была проведена повторная серия измерений ВФХ. Результаты измерения вольт-фарадной характеристики структуры, последовательно облученной γ -излучением со значением экспозиционной дозы 10^7 Р и γ -нейтронным излучением с флюенсом $0.8 \cdot 10^{15}$ н/см 2 , а также зависимость рассчитанной относительной разности dC от напряжения смещения приведены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что по сравнению с результатами второго этапа характер зависимости изменился: зави-

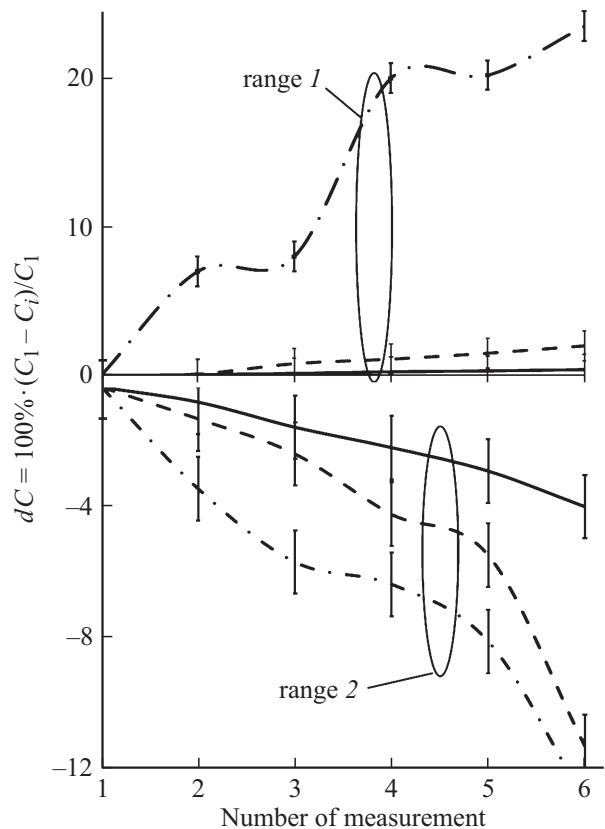


Рис. 3. Повторяемость измерений для n^+/n^- GaAs-структуры для двух диапазонов смещений.

симость dC по-прежнему имеет минимум в диапазоне напряжений смещения U от 1.6 до 2.2 В, что характерно для данной структуры, облученной γ -излучением. Кроме того, указанная зависимость имеет максимум в диапазоне напряжений от 2.2 до 2.5 В, что говорит о возникновении в структуре другого типа дефектов на глубине порядка 1 мкм. Дефектообразование в нелегированном слое на глубине 500–1000 нм может быть связано с сильными механическими напряжениями кристаллической решетки полупроводника на границе эпитаксиальный слой–подложка.

На рис. 3 приведено итоговое сравнение зависимостей значения минимума функции $dC(U)$ от номера проводимого измерения для трех случаев: 1) до облучения, 2) после облучения γ -квантами, 3) после облучения γ -нейтронами. Видно, что отличие характеристик необлученных структур минимально, а влияние облучения приводит к формированию слоев радиационных дефектов, заряженных как положительно, так и отрицательно. Последнее отличает γ -нейтронное воздействие от γ -облучения, где формировались дефекты только одного знака. Указанная информация может использоваться для разработки и совершенствования технологии изготовления структур.

Результаты проделанной работы подтвердили работоспособность предложенной методики анализа, что позво-

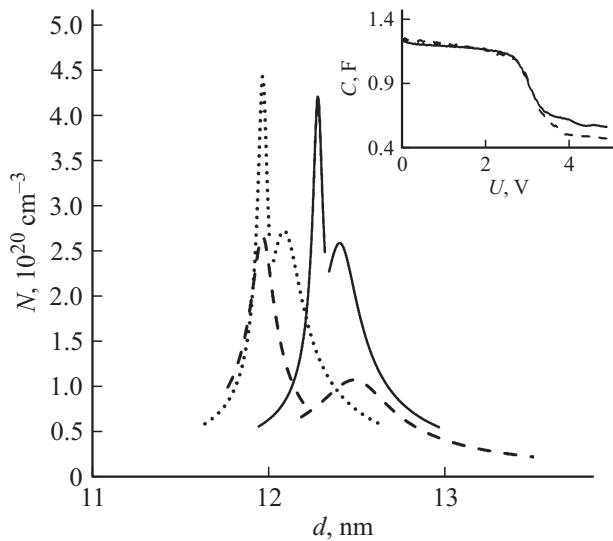


Рис. 4. Профиль распределения электронов в AlGaIn/GaN HEMT до (—) и после (---) облучения нейтронами и аналитический расчет сдвига профиля при уменьшении эффективной площади проводящего канала, связанный с влиянием кластеров дефектов (.....).

лило перейти к исследованиям нового типа структур — AlGaIn/GaN.

Процедура измерения ВФХ и определения профиля распределения концентрации проводилась для каждой из 12 типов исследуемых AlGaIn/GaN гетероструктур с нанесенными круговыми и кольцевыми контактами, а также транзисторов с длиной затвора 0.5 мкм и шириной канала от 200 до 800 нм. Всего было измерено и „обсчитано“ более 500 образцов. Максимальное значение концентрации электронов составило $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ на глубине 15 нм. Был обнаружен дополнительный всплеск на зависимости распределения концентрации электронов на глубине 40 нм. В общем результаты измерений повторяли данные, приведенные в [3].

Далее HEMT на основе AlGaIn/GaN облучался быстрыми нейтронами спектра деления со средней энергией 1 МэВ и флюенсом $0.4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Проводился анализ профиля распределения электронов в канале HEMT как до облучения, так и после. Выявлено смещение указанного профиля после облучения (рис. 4). Подобный сдвиг профиля наблюдался также в [3], но не был объяснен детально. В данной работе выдвигается и обосновывается гипотеза, объясняющая наблюдаемый на опыте эффект.

Как указано в [3], возникновение кластеров радиационных дефектов в полупроводниковых структурах характеризуется формированием области пространственного заряда, препятствующего проникновению внутрь электронов. Мы предположили, что наблюдаемый в эксперименте сдвиг профиля распределения электронов после облучения связан с влиянием уменьшения площади „обкладки“ емкости барьерного контакта, измеряемого при проведении вольт-фарядных исследований. Под об-

кладкой понималась область канала HEMT, заполненная электронами. В [3] этот факт при проведении расчетов во внимание не принимался, а в данной работе он учитывался путем введения коррекции величины площади обкладок измеряемой емкости барьерного контакта. Пунктиром на рис. 4 показан профиль распределения электронов, смещенный относительно исходного за счет уменьшения площади обкладки на 10%. Как видно из рисунка, совпадение результатов эксперимента и расчета стало лучше. Растягивание профиля распределения электронов по глубине структуры после облучения видимо связано с радиационно-стимулированной диффузией, о чем уже сообщалось в [3].

Для окончательного подтверждения данных предположений был проведен расчет распределения КРД в структуре HEMT методом Монте-Карло с помощью программы Trim [4]. Определялись размеры кластеров и субкластеров дефектов и оценивался объем областей, окруженных пространственным зарядом, препятствующим движению электронов. Вычислялась величина изменения площади обкладки емкости барьерного электрода, измеряемой при проведении вольт-фарядных исследований.

Была проведена оценка концентрации кластеров радиационных дефектов в канале HEMT. Из работ [5–7] известно, что сечение поглощения быстрых нейтронов для атомов Ga составляет порядка 4 барн ($4 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$). Постоянная решетки GaN равна 3.19 Å, из чего следует, что на единице площади 1 см^2 располагается $\sim 10^{15}$ атомов. Суммарное сечение поглощения для всех атомов 1 монослоя будет порядка $4 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2$. Расчеты методом Монте-Карло с помощью программы Trim показали, что средняя длина пробега атома Ga с начальной энергией 100 кэВ составляет 90–110 нм. Суммарное сечение поглощения в слое толщиной 100 нм будет составлять $\sim 2 \cdot 10^{-6} \text{ ат/см}^2$, а количество смещенных атомов на единице площади будет $3 \cdot 10^9$. Через слой толщиной 1 см будут проходить $\sqrt{3} \cdot 10^9$ атомов, т.е. $\sim 10^5$ шт. Расстояние между кластерами дефектов, образуемых в GaN, составит около 100 нм. Размеры кластеров дефектов были рассчитаны с помощью программы Trim и составили 3–6 нм. В литературе описывается модель Госсика [8], согласно которой кластер дефектов будет окружен областью пространственного заряда радиусом ~ 15 нм, т.е. будет непрозрачным для электронов в канале включением. Таким образом, кластер, попадающий в канал транзистора, способен „выкусить“ часть области канала. Размеры „выкушенной“ области составляют 25–30 нм, что при расстоянии между КРД около 100 нм ведет к уменьшению площади поперечного сечения канала на 10% и будет смещать профиль распределения электронов. Последнее согласуется с данными, наблюдаемыми в эксперименте.

Применение предложенной выше методики многократного измерения зависимости емкости структур от напряжения для AlGaIn/GaN HEMT не дало такого показательного результата, как для GaAs-структур. Погреш-

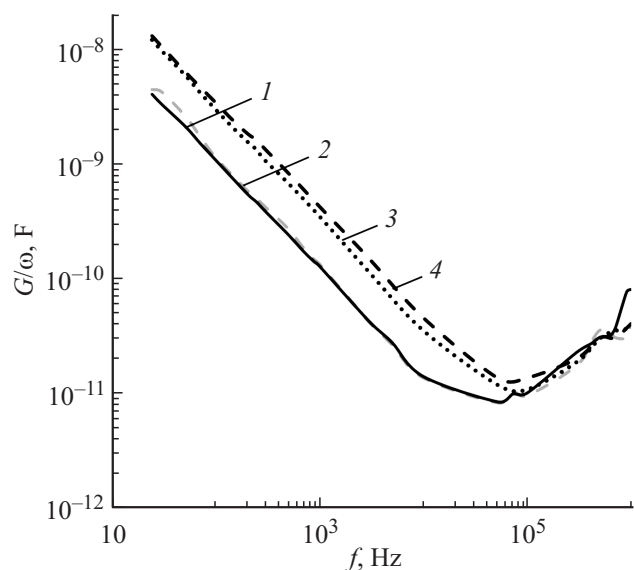


Рис. 5. Зависимость отношения измеренной проводимости AlGaAs/GaAs-структур (барьерных контактов) к круговой частоте измерительного сигнала от частоты измерительного сигнала для кольцевого электрода. Цифрами указан номер образца.

ности измерений, связанные с естественными шумами, оказались выше, так что разброс значений емкости до облучения оказался больше и поглотил возможные изменения, связанные с влиянием радиационных дефектов. Последнее, видимо, объясняется тем, что электроны находятся в слое двумерного электронного газа, а слои структуры, находящиеся глубже, имеют значительно меньшую проводимость, чем у GaAs-структуры. Поэтому анализ влияния кластеров дефектов на заглубленные слои структуры указанным методом затруднен.

В связи с этим применялся иной метод анализа параметров структуры. Исследовалась зависимость проводимости структур от напряжения смещения, измеряемая параллельно с измерением вольт-фарадной характеристики. Иными словами, учитывались как реальная, так и мнимая части измеряемого импеданса. Параллельно с анализом вольт-фарадных зависимостей барьеров Шоттки определялся максимум на зависимости проводимости от напряжения смещения, полученный для различных частот измерительного сигнала. Эксперимент показал, что положение указанных максимумов слабо зависело от напряжения смещения, что давало возможность провести их сравнение.

На рис. 5 приведена зависимость отношения проводимости к частоте измерительного сигнала. Хорошо видно, что зависимость не линейная. Данный метод в [9] было предложено использовать для анализа поверхностных состояний в структурах Si–SiO₂. Поскольку в структурах AlGaIn/GaN к барьерному электроду примыкает слой широкозонного материала, а форма квантовой ямы имеет треугольный вид, как и в структурах Si–SiO₂, то в данной работе указанная методика использовалась для

анализа особенностей проводимости исследуемых структур. Рост графиков в области малых частот говорит о наличии состояний с большими временами перезарядки, причем исследуемые структуры можно разделить на две группы с большим и меньшим значением G/f , т.е. с большей и меньшей концентрацией состояний.

Результаты проведенных исследований показывают, что предложенный в работе комплексный метод анализа особенностей вольт-фарадных характеристик с учетом исследований частотной зависимости проводимости структур позволяет выявить влияние дефектов на их характеристики. В связи с перспективностью предложенного метода анализа, исследования в этом направлении будут продолжены.

4. Заключение

Предложенная в работе методика позволяет определять положение наиболее дефектного слоя и концентрацию дефектов в нем как в GaAs- и AlGaIn/GaN-структурах, так и в готовых приборах, до и после облучения γ -квантами и нейтронами. Проведенные исследования показывают, что важным аспектом анализа результатов вольт-фарадных измерений после радиационного облучения является необходимость учета диэлектрических включений, которыми по сути являются кластеры радиационных дефектов, окруженные областью пространственного заряда. Указанные включения, попадая в слой двумерного электронного газа, „выкусывают“ часть этого слоя, что влияет на площадь обкладок измеряемой емкости барьерного электрода и должно учитываться при проведении расчетов.

Разработка методов измерений параметров AlGaIn/GaN-структур будет продолжена — весьма перспективным представляется метод комплексного анализа зависимостей как емкости, так и проводимости структур от напряжения смещения в широком диапазоне частот измерительных сигналов.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№ 14-02-0058, 15-02-07935), МОН РФ (соглашение от 27.09.2013 г. № 02.В.49.21.003) и Государственным заданием МОН РФ (код проекта 2183).

Список литературы

- [1] Н.В. Басаргина, И.В. Ворожцова, С.М. Дубровских и др. Вестн. ННГУ им. Н.И. Лобачевского, **1** (3), 61 (2013).
- [2] Д.В. Громов, Ю.А. Матвеев, Ю.В. Федоров. Нано- и микро-системная техника, **5**, 39 (2011).
- [3] Е.А. Тарасова, А.В. Хананова, С.В. Оболенский, В.Е. Земляков, Ю.Н. Свешников, В.И. Егоркин, В.А. Иванов, Г.В. Медведев, Д.С. Смотрин. ФТП, **50** (3), 331 (2016).
- [4] Е.В. Киселева, С.В. Оболенский. Микроэлектроника, **35** (5), 371 (2006).
- [5] R. Adair. Rev. Mod. Phys., **2**, 249 (1980).
- [6] Физика быстрых нейтронов, под ред. Дж. Мариона, Дж. Фаулера (М., Атомиздат, 1966).

- [7] И.С. Григорьев, Е.З. Мейлихов. *Физические величины* (М., Энергоатомиздат, 1991).
[8] С.В. Оболенский. Изв. вузов: Электроника, **6**, 31 (2003).
[9] С.М. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1983).

Редактор Г.А. Оганесян

Theoretical and experimental reseatch of current-voltage, capacitance-voltage and pulse characteristics of HEMT structures and based on field-effect transistors

E.A. Tarasova⁺, E.S. Obolenskaya⁺, A.V. Hananova⁺, S.V. Obolensky⁺, V.E. Zemliakov, V.I. Egorkin*, A.V. Nezhnizev*, A.V. Saharov[▲], A.F. Zazul'nikov[▲], V.V. Lundin[▲], E.E. Zavarin[▲], G.V. Medvedev[▼]*

⁺ Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (NNSU), 603950 Nizhny Novgorod, Russia

* National Research University of Electronic Technology (MIET), 124498 Moscow, Zelenograd, Russia

[▲] Ioffe Institute, 194021 St. Petersburg, Russia

[▼] JSC RPE „Salut“, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract Investigations of parametres of classical n^+/n^- GaAs and AlGaIn/GaN structures with two-dimensional electron gas (HEMT) and field-effect transistors based on them to gamma-neutron exposure were conducted. The levels of their radiation resistance were defined. A method for experimental research of structures, based on differential analysis, of the current-voltage characteristics was presented. This method allows to determine the structure of layers in which radiation defects accumulating. Method, which help to take into account changes in the area of the plates of measured barrier contact capacitance associated with the emergence of clusters of radiation defects, forming a dielectric layer included in the two-dimensional electron gas was presented for the first time.