

## Исследование распределения электронов в GaN и GaAs структурах после $\gamma$ -нейтронного облучения

© Е.А. Тарасова\*, А.В. Хананова\*, С.В. Оболенский\*, В.Е. Земляков<sup>+</sup>, Ю.Н. Свешников\*, В.И. Егоркин\*, В.А. Иванов♦ Г.В. Медведев♦, Д.С. Смотрин\*♦

\* Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603600 Нижний Новгород, Россия

<sup>+</sup> Национальный исследовательский университет „МИЭТ“, 124498 Зеленоград, Москва, Россия

• ЗАО „Элма Малахит“, 124460 Зеленоград, Москва, Россия

♦ ОАО „НПО Салют“, 603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: obolensk@rf.unn.ru

(Получена 7 июля 2015 г. Принята к печати 17 июля 2015 г.)

Приводятся результаты экспериментального исследования параметров GaN и GaAs структур до и после  $\gamma$ -нейтронного облучения. Предложен специальный набор тестовых диодов, позволяющих снизить погрешность результатов измерений параметров структур, что важно для проектирования и оптимизации конструкции полупроводниковых приборов.

### 1. Введение

Для проведения корректного численного физико-топологического моделирования полупроводниковых приборов необходимо иметь исходные экспериментальные данные, измеренные с низкой погрешностью. Наиболее важными параметрами полупроводниковых структур, предназначенных для изготовления диодов и транзисторов, являются толщины и уровни легирования слоев, концентрация и подвижность электронов. Разработка специальной методики измерений параметров полупроводниковых структур с учетом определения погрешностей измерений позволит существенно продвинуться в качестве и корректности результатов моделирования. Наличие такой методики приобретает особое значение при исследованиях параметров полупроводниковых структур, подвергнутых  $\gamma$ -нейтронному облучению, когда введение радиационных дефектов способно существенно изменить профили распределения легирующей примеси и электронов [1–4].

В ходе выполнения работы проводился анализ вольт-фарадных характеристик специальных диодов Шоттки, при этом особое внимание обращалось на трансформацию профиля распределения концентрации электронов по глубине структур. Для выявления погрешностей измерений использовался набор из девяти диодов, размеры которых были согласованы таким образом, чтобы сопоставление результатов вольт-фарадных измерений и профилей концентрации электронов позволяло оценивать адекватность получаемых результатов. Особое внимание обращалось на методический аспект определения профилей распределения электронов по глубине структур и исследовалось влияние геометрических размеров тестовых диодов на погрешность измерений.

Несмотря на то что вольт-фарадный метод имеет стандартные ограничения, связанные с естественным

„размытием“ распределения электронов относительно распределения доноров или иных источников свободных электронов, например в GaN/AlGaIn гетероструктурах, было решено использовать только традиционную методику обработки данных вольт-фарадных измерений путем дифференцирования по напряжению и не применять иных математических обработок. Учитывая сказанное, далее будет использоваться термин „распределение концентрации электронов по глубине структуры“, а обсуждение распределения доноров, радиационных дефектов и т.п. будет оговариваться отдельно.

Проведенное в работе сопоставление профилей электронов в GaN и GaAs структурах, полученных по разработанной методике, позволило изучить радиационно-стимулированные процессы перестройки дефектов. Использование разных типов радиационных излучений —  $\gamma$ -излучения, формируемого ускорителем электронов, и  $\gamma$ -нейтронного излучения ядерного реактора позволило отличить влияние точечных радиационных дефектов и их комплексов, возникающих как при  $\gamma$ -, так и при нейтронном облучении, от влияния кластеров радиационных дефектов с размером 10–100 нм, формируемых в полупроводниковых структурах только быстрыми нейтронами спектра деления с энергиями 0.1–10 МэВ [4].

После облучения GaAs структур радиационные дефекты приводили к изменению концентрации активной примеси, поставляющей электроны в зону проводимости как за счет снижения ее доли путем перевода в неактивное состояние путем образования комплексов дефектов, так и за счет ее радиационно-стимулированной диффузии. В то же время в GaN гомоструктурах указанный процесс протекать не мог, так как структуры специально не легировались, поэтому имело смысл рассматривать только фоновое легирование и(или) поставку свободных носителей за счет дефектов кристаллической структуры. Необходимо было определить, как будет изменяться

проводимость таких структур после облучения, в чем отличие этого механизма от подобного в GaAs.

В GaAs структурах количество радиационных дефектов, равное количеству атомов доноров, теоретически могло все их сделать неактивными путем образования комплексов дефектов с примесью. В GaN/AlGaN гетероструктурах на границе раздела слоев проводимость возникла из-за влияния пьезоэффекта, поэтому ожидалась значительно большая радиационная стойкость, которая определяется атомами самого материала, а их на несколько порядков больше, чем атомов легирующей примеси в GaAs структуре. Проверка последнего предположения крайне важна для разработчиков радиационно-стойкой электроники, ранее указанный эффект в GaN/AlGaN гетероструктурах практически не исследовался.

## 2. Объекты исследований и методика экспериментов

Исследовались AlGaIn/GaN, GaN и  $n_1/n_2/n^-/i$ -GaAs структуры, состав и параметры которых приведены в табл. 1–4. Параметры структуры фирмы Cree (структура № 1) определялись исходя из вольт-фарадной характеристики контактов затвор–исток серийного транзистора, изготавливаемого указанной фирмой. Оригинальные отечественные структуры № 2 имели приблизительно сходную конструкцию с используемой фирмой Cree [5], но они выделены в отдельный тип, так как параметры технологического процесса изготовления структур были, возможно, несколько иными, чем разработанные за рубежом. Параметры GaN и GaAs структур № 3 и 4 анализировались с целью проверки методики измерений и для сопоставления физических процессов, вызываемых радиационным облучением в объемных материалах, с аналогичным в гетероструктурах. Последнее позволило исследовать радиационно-стимулированные процессы в AlGaIn/GaN структурах № 1 и 2 более полно.

Для проведения экспериментов был разработан специальный комплект AlGaIn/GaN и  $n^-/n/i$ -GaAs диодов с барьером Шоттки. Для удобства измерений и повышения их точности комплект был объединен в специальный тестовый объект, который состоял из девяти диодов с кольцевыми и круговыми внутренними электродами (см. вставку на рис. 1). Диоды изготавливались после эпитаксиального осаждения полупроводниковых слоев на подложку в заданных местах полупроводниковой структуры — в центре и по краям. Размеры тестовых диодов указаны в табл. 5.

Измеряемые емкости указанных диодов составляли от 10 до 500 пикофард. При этом площади и соответственно емкости некоторых круговых и кольцевых диодов совпадали, что позволяло сопоставлять их вольт-фарадные характеристики и полученные из них профили концентрации простым наложением кривых на одном графике. Меньшие и большие площади диодов позволяли проверять масштабируемость физических процессов,

**Таблица 1.** Параметры исследуемой GaN/AlGaIn структуры (Cree) (структура № 1)

| Номер слоя | Толщина слоя, нм | Концентрация электронов, $\text{см}^{-2}$ | Подвижность носителей, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ |
|------------|------------------|---|--|
| AlGaIn     | 25               | —   | 1500   |
| AlN        | 3                | —   | 1500   |
| GaN        | 20               | $2.2 \cdot 10^{13}$                       | 1500   |
| Подложка   | SiC              |   |  |

*Примечание.* Данные взяты из обзора [8]. Для изготовления применялся МОС-гидридный метод эпитаксии из газовой фазы [5].

**Таблица 2.** Параметры исследуемой GaN/Al<sub>0.27</sub>Ga<sub>0.73</sub>N структуры (структура № 2)

| № | Толщина слоев, нм |     |      | Параметры двумерного электронного газа    |  |
|---|-------------------|-----|------|---|--|
|   | AlGaIn            | AlN | GaN  | Концентрация электронов, $\text{см}^{-2}$ | Подвижность носителей, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ |
| 1 | 25                | 0.7 | 2300 | $1.2 \cdot 10^{13}$                       | 1830   |
| 2 | 25                | 0.7 | 2300 | $1.2 \cdot 10^{13}$                       | 1850   |
| 3 | 25                | 0.7 | 2300 | $1.2 \cdot 10^{13}$                       | 1840   |

*Примечание.* Структуры изготавливались на сапфировой подложке, применялся МОС-гидридный метод эпитаксии из газовой фазы.

**Таблица 3.** Параметры исследуемой GaN структуры (структура № 3)

| Номер слоя | Толщина слоя GaN, нм | Концентрация доноров, $\text{см}^{-3}$ |
|------------|----------------------|--|
| 1          | 300                  | Слой специально не легировался         |
| 2          | Сапфировая подложка  |  |

*Примечание.* Структура изготавливалась МОС-гидридным методом эпитаксии из газовой фазы.

**Таблица 4.** Параметры эпитаксиальных GaAs структур (структура № 4)

| Номер слоя | Толщина слоя, нм              | Концентрация доноров, $\text{см}^{-3}$ |
|------------|-------------------------------|--|
| 1          | 90                            | $1.5 \cdot 10^{17}$                    |
| 2          | 50                            | $2.2 \cdot 10^{17}$                    |
| 3          | 500                           | $< 10^{15}$                            |
| 4          | Полуизолирующая GaAs подложка |  |

*Примечание.* Для изготовления применялся МОС-гидридный метод эпитаксии из газовой фазы, тип доноров — Si.

а также сравнивать результаты измерений на кольцевых диодах, ширина кольца которых сравнима с радиусом круговых диодов. В литературе рассмотрены аналогичные конструкции тестовых диодов [6], применяемых для

**Таблица 5.** Геометрические размеры тестовых диодов и типичные значения емкостей диодов при нулевом смещении

| № диода | Внешний радиус контакта, мкм | Ширина кольца кольцевых диодов, мкм | Величина зазора между электродами, мкм | Типичное значение емкостей диодов при нулевом смещении для структуры № 4, пФ |
|---------|------------------------------|-------------------------------------|--|--|
| 1       | 300                          | —                                   | 70                                     | 500  |
| 2       | 150                          | —                                   | 10                                     | 80   |
| 3       | 100                          | —                                   | 70                                     | 40   |
| 4       | 70                           | —                                   | 10                                     | 40   |
| 5       | 50                           | —                                   | 10                                     | 10   |
| 6       | 30                           | —                                   | 10                                     | 5  |
| 7       | 325                          | 9                                   | 16                                     | 40   |
| 8       | 150                          | 40                                  | 10                                     | 40   |
| 9       | 100                          | —                                   | 70                                     | 40   |

измерения профиля легирования. Однако предложенный в данной работе набор является наиболее полным.

Благодаря тому что у контактов диодов варьировались радиус, ширина кольца и зазор между ними, путем сопоставления результатов измерений вольт-фарадных характеристик и вычисленных по ним профилей легирования удавалось интерполировать результаты таким образом, что паразитные элементы диодов давали минимальный вклад. Погрешность измерений оценивалась по повторяемости результатов, а также путем сравнения профилей легирования между собой. Там, где профили совпадали, считали, что влияние паразитных эффектов мало. Важной особенностью применяемого тестового объекта являлась возможность измерения профилей электронов в одной точке полупроводниковой структуры с помощью разных диодов, что позволяло получить статистику результатов измерений и исключить влияние брака при изготовлении диодов, например, влияние избыточного тока утечки барьера Шоттки, на результаты вольт-фарадных измерений.

Вначале измерялись параметры AlGaIn/GaN структур полевых транзисторов, изготовленных фирмой Cree. Особенности указанных структур, изготовленных методом газофазной эпитаксии на SiC подложках, описаны в обзоре [8]. Конкретные профили распределения электронов было интересно сопоставить с аналогичными отечественными структурами, которые изготавливались на сапфировых подложках. Для расшифровки результатов измерений GaN структур, а также для определения возможностей предложенной в работе измерительной методики анализировались параметры эпитаксиальных GaAs полупроводниковых структур (табл. 4), часто применяемых для изготовления полевых транзисторов с затвором Шоттки. Чтобы отличить эффекты, связанные с объемом материала, от эффектов на гетерогранице, дополнительно исследовались GaN структуры, не содержащие гетероперехода.

Так как GaN и GaAs являются перспективными материалами для изготовления радиационно-стойких диодов и транзисторов, то после измерений параметров структуры облучались нейтронами. Так как облучение

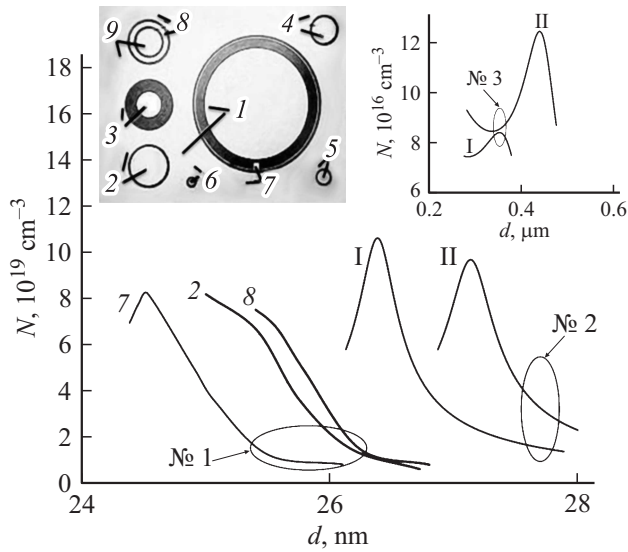
проводилось на ядерном реакторе, на структуры также воздействовало сопутствующее  $\gamma$ -облучение. Чтобы различить влияние  $\gamma$ - и нейтронного облучения, проводилось облучение структур только  $\gamma$ -квантами с той же дозой. В последнем случае в качестве источника  $\gamma$ -квантов использовался ускоритель электронов. Результаты эксперимента позволили судить о разнице в процессах, протекающих в GaN и GaAs структурах после облучения.

Для исследований параметров структур использовался измерительный стенд [3], состоящий из измерителя иммитанса E7-20 и снабженного микроскопом зондового устройства, позволяющего подключать к измерителю бескорпусные образцы диодов. Шаг по напряжению смещения составлял 0.04 В, амплитуда измерительного сигнала 0.1 В. Для каждого значения напряжения смещения производилось по 30 измерений емкости, результаты которых затем усреднялись.

Для снижения влияния наводок, проникающих в измерительный прибор из сети питания, стенд был оснащен оригинальным сетевым фильтром. Для предотвращения влияния атмосферных электромагнитных наводок зондовая система закрывалась со всех сторон специальным экраном со съемной крышкой для установки исследуемых образцов.

### 3. Результаты измерений параметров структур до облучения

На рис. 1 изображены профили распределения электронов в структурах № 1 и 2, а на вставке — № 3. Данные получены путем дифференцирования по напряжению вольт-фарадных характеристик различных тестовых диодов [7]. Важной особенностью процедуры обработки было сопоставление профилей концентрации электронов, получаемых с помощью разных тестовых диодов. Как следует из рис. 1, наиболее полно, т.е. с определением значения и координаты экстремума зависимости, профиль воспроизводится с помощью измерений, проведенных на кольцевом диоде 7. Результаты измерений



**Рис. 1.** Профиль концентрации электронов в GaN/AlGaIn структурах № 1 и 2. На вставках — фотография тестового объекта, состоящего из 9 кольцевых и круговых диодов (слева), и профиль концентрации электронов по глубине для GaN структуры № 3 (справа). На структуре № 2 измерения проводились с помощью кольцевых диодов 7 и 8 (см. обозначения на вставке), а также кругового диода I, на структуре № 3 с помощью кругового диода I. Координата отсчитывалась от поверхности металлического контакта. Измерения структуры № 2 проводились до облучения нейтронами. Измерения структур № 1 и 3 проводились до (I) и после (II) облучения потоком нейтронов с флюенсом  $8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ .

были подтверждены сравнением с экспериментальными данными, полученными методом ВИС.

Из рис. 1 также видно, что носители сконцентрированы в очень узкой области вблизи гетерограницы GaN/AlGaIn структур № 1 и 2, что служит показателем качества структур. Если сравнивать параметры этих структур, то видно, что по уровню концентрации электронов они находятся на одном уровне. При этом уровень фонового легирования структуры № 2 был лучше — менее  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Это должно обеспечить требования как по высокому пробивному напряжению, так и по токам насыщения транзистора, изготовленного на таких структурах.

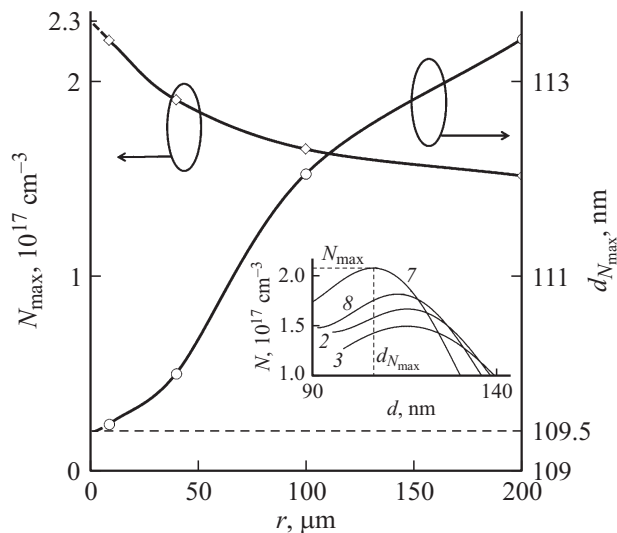
Аналогичным образом анализировалась  $n_1/n_2/n^-/i$ -GaAs структура № 4. Предложенная методика измерений позволила подтвердить, что требуемые по техническому заданию параметры структур были реализованы точно, а величина фонового легирования буферного слоя была существенно меньше  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

В ходе специальной серии измерений особое внимание обращалось на отличие профилей распределения электронов, получаемых из измерений на разных диодах, изготовленных на GaAs структуре № 4. Было показано, что с точки зрения адекватности измерений важную роль играет сопротивление растекания вдоль легиро-

ванного слоя структуры № 4. Указанное сопротивление определяется радиусом кругового или шириной кольцевого барьерных контактов. При увеличении отрицательного напряжения на одном полупериоде измерительного сигнала электроны „выдавливаются“ из-под контакта, а в течение другого полупериода — „затягиваются“. Создаваемая этим латеральным током разность потенциалов искривляет границу области пространственного заряда так, что виртуальные обкладки измеряемого конденсатора перестают быть плоскими. Это приводит к возникновению погрешности измерений. Чем меньше ширина кольцевого или радиус кругового металлических контактов, тем меньше паразитное сопротивление и точнее результат измерений.

На рис. 2 приведены зависимости вычисленного максимального значения концентрации электронов и положения максимума по глубине структуры от размера тестовых диодов — ширины кольцевого и радиуса кругового контактов. На вставке приведен полный профиль концентрации GaAs структуры, измеренный с помощью тестов № 2, 3, 7, 8. На этом графике хорошо видно смещение вычисленного профиля концентрации электронов, возникающего из-за влияния паразитного сопротивления растекания. Наиболее точные данные дает тестовый диод 7, так как ширина кольца этого диода минимальна, т.е. минимально паразитное сопротивление растекания.

В ходе экспериментов было проанализировано изменение максимального значения профиля легирования в зависимости от длины растекания тестового объекта для GaAs структуры. Получено, что значение концентрации в максимуме для тестового объекта № 2



**Рис. 2.** Зависимость максимального значения концентрации  $N_{\text{max}}$  и координаты  $d_{N_{\text{max}}}$ , соответствующей максимуму на профиле концентрации электронов, от радиуса кругового и ширины кольца кольцевого контактов диодов. На вставке — профили распределения электронов, рассчитанные по измерениям вольт-фарядных характеристик на различных тестовых диодах. Цифрами на рисунке обозначены тестовые диоды (см. вставку на рис. 1).

(длина растекания 200 мкм) отличается от аналогичного для тестового объекта № 7 (длина растекания 9 мкм) на 26%. Путем экстраполяции указанной зависимости к нулевому значению длины растекания были получены точные значения максимальной концентрации доноров в структуре, которое составило  $2.31 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , и положение максимума —  $d_{N_{\max}} = 109.5 \text{ нм}$ . Таким образом, погрешность измерения параметров структуры, определяемая как разница между экстраполированным значением и получаемым в ходе измерений, отнесенная к экстраполированному значению, составляет для кольцевых контактов № 7 и 8 — 4 и 9%, а для круговых контактов № 2 и 4 — 16 и 26% соответственно.

Следует отметить, что применяемая для обработки экспериментальных данных модель плоского конденсатора справедлива только в случае, когда площадь металлического контакта и противолежащей виртуальной обкладки конденсатора на границе области пространственного заряда много больше, чем боковая граница указанной области. Это правило выполняется для всех тестовых диодов на глубинах не более 400 нм. В этом случае соотношение паразитной и „рабочей“ площадей обкладок составляет не более 1/10, а типичное значение, используемое при измерениях проводящих слоев структур, — 1/100. При измерении параметров слоев, залегающих на больших глубинах, указанное правило выполняется только для круговых диодов. Поэтому сравнение результатов измерений для кольцевых и круговых диодов проводилось только для анализа распределения электронов в проводящих слоях, т. е. вблизи металлического контакта тестового диода.

#### 4. Параметры структур после $\gamma$ -нейтронного облучения

Описанные в предыдущем разделе GaAs и GaN структуры облучались быстрыми нейтронами спектра деления со средней энергией 1 МэВ в пассивном режиме, т. е. без подачи питания. Флюенс нейтронов при этом составлял  $10^{13} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . На структуры также воздействовало сопутствующее  $\gamma$ -излучение с энергией квантов около 1 МэВ и дозой  $10^4 - 10^5$  рад. Уровень воздействующего  $\gamma$ -излучения был таков, что, согласно данным [1],  $\gamma$ -кванты генерировали на 1–2 порядка меньше дефектов, чем нейтронное облучение. Параметры полупроводниковых структур измерялись до и спустя месяц после облучения. Также исследовалось влияние только  $\gamma$ -облучения с энергией 1 МэВ и дозой  $10^6 - 10^7$  рад. Указанное воздействие давало сходную с нейтронным концентрацию радиационных дефектов, но в отличие от нейтронного воздействия при  $\gamma$ -облучении генерировались только точечные дефекты типа пар Френкеля, которые формировали в структуре стабильные комплексы, в том числе с атомами легирующей примеси [1]. Нейтронное облучение формировало в структурах как точечные дефекты, так и их кластеры (разупорядоченные области), имеющие размеры 10–100 нм и содержащие  $10^2 - 10^4$  точечных дефектов [1].

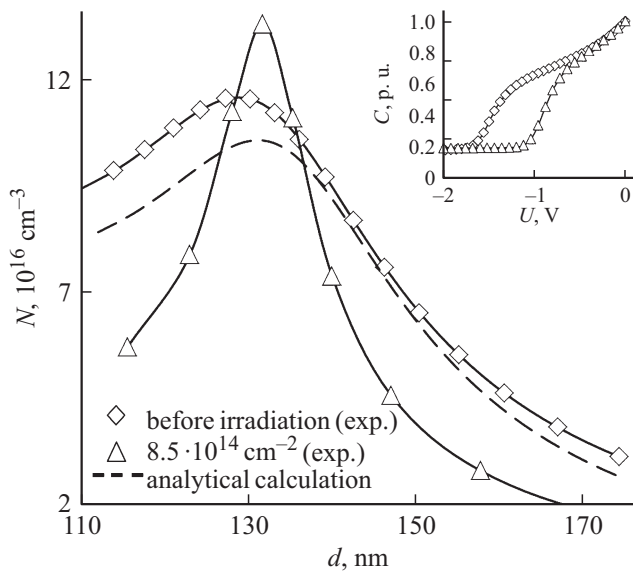
Результаты измерений параметров тестовых диодов на AlGaIn/GaN структурах после  $\gamma$ -нейтронного облучения показали незначительное смещение вольт-фарадной характеристики барьерного контакта диодов в сторону, противоположную той, куда смещаются аналогичные характеристики у GaAs диодов (см. вставку на рис. 3). Такое поведение после облучения характерно для структур металл-диэлектрик-полупроводник [1] и объясняется накоплением заряда в слое диэлектрика. Указанное свойство GaN структур ранее практически не изучалось и является важным для анализа радиационной стойкости GaN транзисторов, так как приводит к смещению сток-затворной вольт-амперной характеристики в противоположную сторону по сравнению с аналогичным смещением в GaAs транзисторах с барьером Шоттки. Таким образом, напряжение отсечки в случае GaAs транзисторов Шоттки после облучения будет уменьшаться, а для GaN/AlGaIn — возрастать [8].

Смещение профиля концентрации электронов, наблюдаемое на рис. 1, видимо, вызвано изменением сопротивления гетерограницы GaN/AlGaIn полупроводниковой структуры, связанное с уменьшением концентрации электронов (см. далее). Этот эффект аналогичен эффекту, обсуждаемому в предыдущем разделе, но вызван не различиями в геометрии контактов, а изменением сопротивления растекания из-за влияния радиационного облучения.

В результате проведенных экспериментов получено, что концентрация электронов в GaN структуре № 3 после облучения не уменьшается, как в GaN/AlGaIn структуре № 1, а, наоборот, возрастает (см. вставку на рис. 3). Это изменение можно объяснить влиянием радиационных дефектов, которые организуют поставку свободных электронов в объемных GaN структурах. Напротив, в GaN/AlGaIn структурах накопление радиационных дефектов на гетерогранице приводит к снижению концентрации электронов (рис. 1). Отметим, что сила проявления указанных процессов различна, так как концентрация „фоновых“ электронов в сопоставляемых структурах отличается на 2 порядка, поэтому в GaN/AlGaIn гетероструктурах один эффект камуфлируется другим.

Повышение проводимости GaN слоя GaN/AlGaIn структур может сказаться на параметрах транзистора, изготавливаемого на таких структурах. Однако в структуре № 2 фоновая концентрация электронов примерно в 2 раза ниже, чем в зарубежных, а увеличение проводимости слоя GaN в структуре № 3 из-за радиационного облучения имеет значение на порядок меньше, чем фоновая концентрация электронов в структуре № 2, поэтому существенного влияния на характеристики транзисторов этот эффект оказать не должен.

После облучения GaAs структуры № 4 в слое, примыкающем к металлическому контакту, и в глубине структуры был зафиксирован процесс уменьшения концентрации свободных электронов (см. рис. 3), что в литературе [1,9] традиционно связывают с захватом электронов на генерированные радиацией ловушки, связанные



**Рис. 3.** Профили распределения электронов по глубине GaAs структуры № 4 до и после облучения. За начало координат принята граница раздела металл–полупроводник. На вставке — нормированная на значение в максимуме зависимость емкости кольцевого диода 7 до и после облучения. Для сравнения приведена аналогичная характеристика для GaN/AlGaIn структуры. Видно, что после облучения она смещается в противоположную сторону по сравнению с характеристикой для GaAs диодов.

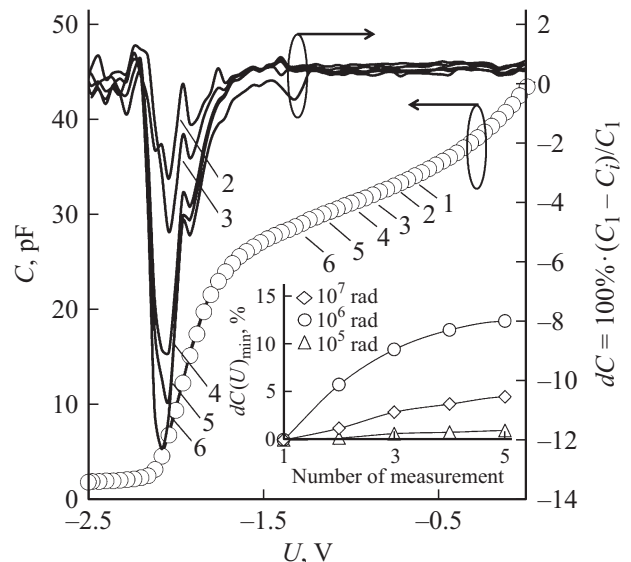
с комплексами радиационных дефектов, включающими донор. Аномальным является наблюдаемое увеличение концентрации в слое структуры, соответствующем максимуму на зависимости концентрации от координаты. Согласно литературным данным, например [9], концентрация электронов в GaAs при  $\gamma$ -нейтронном облучении монотонно убывает и может быть описана зависимостью  $n = N_d(1 - aF_n)$ , где  $n$  — концентрация электронов после облучения,  $N_d$  — концентрация доноров до облучения,  $F_n$  — флюенс нейтронов, а параметр  $a$  зависит от концентрации доноров. На рис. 3 пунктиром приведена зависимость концентрации электронов от координаты, рассчитанная по данной формуле. Как видно из рисунка, полученная в эксперименте кривая не только отличается от предполагаемой в 1.5–2 раза, но и проходит выше, чем исходная. Видимо, указанное аномальное поведение связано со стимулированной радиационным облучением диффузией доноров к границе раздела эпитаксиальных слоев легированного и нелегированного материала. Ранее указанный эффект наблюдался при ионно-лучевом легировании кремниевых структур [9], но при нейтронном облучении арсенид галлиевых структур обнаружен впервые.

Для исследования аномального поведения GaAs структур после облучения применялась специальная методика анализа повторяемости результатов измерений вольт-фарадных характеристик. Исследовались свойства GaAs структур, прошедших облучение потоком  $\gamma$ -квантов с энергией 1 МэВ и дозой от  $10^5$  до  $10^7$  рад. Указанный

тип облучения отличается от нейтронного тем, что в структуре генерируются только точечные радиационные дефекты — пары Френкеля, которые являются подвижными и могут диффундировать на естественные стоки дефектов. Предполагалось, что накопление указанных дефектов на границах полупроводниковой структуры будет зарегистрировано в ходе эксперимента и позволит косвенно подтвердить возможность наблюдаемой в предыдущем эксперименте диффузии доноров по похожему механизму.

Вольт-фарадные характеристики измерялись 6 раз подряд в течение одного дня в отсутствие фонового освещения. Одно измерение занимало 30 мин. Временной промежуток между измерениями характеристик составлял не более 5 мин. В ходе измерений характеристик для каждого напряжения смещения производилось 30 отсчетов емкости, затем эти значения усреднялись. Повторное шестикратное измерение характеристик проводилось не ранее чем через сутки после первой серии измерений — результаты эксперимента полностью повторялись. На рис. 4 приведены результаты указанных измерений. Из-за того что характеристики визуально близки, была построена разница между ними для анализа их отличий.

По полученным данным были рассчитаны профили распределения концентрации электронов по глубине структуры. Полученные зависимости сравнивались с результатами первого измерения. Наличие надежно регистрируемой разницы в вольт-фарадных характеристиках свидетельствовало о наличии в исследуемых структурах слоев, содержащих большую, по сравнению с другими



**Рис. 4.** Вольт-фарадные характеристики GaAs структур и их повторяемость при проведении последующих измерений. Цифрами указан номер  $i$ -го измерения. На вставке показана зависимость значения минимума функции  $dC(U)$  от номера измерения для структур, подвергшихся различному уровню облучения. Максимальные изменения наблюдаются для дозы  $\gamma$ -облучения, равной  $10^6$  рад.

слоями, концентрацию дефектов около  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Указанные дефекты перезаряжались при повторных измерениях, что давало вклад в изменение вольт-фарадных характеристик. Поскольку  $\gamma$ -нейтронное излучение указанных энергий поглощается в эпитаксиальных слоях полупроводниковых структур равномерно по глубине, наличие неоднородности в распределении дефектов указывает на их диффузию, которая может также стимулировать и диффузию доноров при  $\gamma$ -нейтронном облучении.

В результате экспериментов было показано, что отличия вольт-фарадных характеристик были максимальны при пятом и шестом измерениях (рис. 4) для диапазона напряжений смещения 1.5–1.8 В. Этим напряжениям соответствуют слои структуры, залегающие на глубине 100–300 нм, где расположена граница раздела „легированный–нелегированный эпитаксиальные слои“. Предположительно, именно эта граница раздела и являлась местом сбора радиационных дефектов и атомов доноров после облучения.

Следует отметить, что наблюдаемый эффект смещения вольт-фарадной характеристики релаксировал в течение суток, так что на следующий день можно было проводить следующую серию измерений, в которой регистрировался тот же эффект накопления заряда. Сравнение результатов в указанных сериях показало, что полученный эффект надежно регистрируется при проведении измерений на различных круговых и кольцевых диодах. При этом наиболее надежно он регистрировался при измерениях емкости у самого тонкого кольцевого диода № 7, а измеряемой проводимости — у кругового диода № 3. Результаты измерений доказывают, что накопление радиационных дефектов на границе раздела эпитаксиальных слоев за счет диффузии возможно.

Следует отметить, что указанная методика позволила оптимизировать технологический процесс так, что указанные процессы накопления дефектов были подавлены полностью. Параметры структур полностью соответствуют техническому заданию, что позволяет изготавливать на них как диоды, так и транзисторы Шоттки.

## 5. Заключение

В работе предложен метод анализа вольт-фарадных характеристик полупроводниковых структур и приборов на их основе. Разработанная методика измерений и применяемый измерительный стенд позволили проводить измерения с высокой точностью, что доказывает хорошая повторяемость результатов измерений малых значений емкостей — разброс значений для емкостей 0.3–1 пф не превышает 0.1%.

С помощью указанной методики в работе были исследованы GaAs структуры, облученные  $\gamma$ -квантами дозой  $10^5$ – $10^7$  рад, и были найдены области сосредоточения радиационных дефектов. По результатам проведенных исследований можно утверждать, что предложенный метод позволяет определять область сосредоточения

технологических и радиационных дефектов, как до облучения, так и после  $\gamma$ - и(или) нейтронного воздействия. Главным преимуществом предложенного метода является возможность использования для анализа штатных приборов и измерительной оснастки, которая традиционно применяется для измерения вольт-фарадных характеристик. Последнее отличает предложенный метод от других подходов, например, метода DLTS, где используется сложная установка и требуется квалифицированный персонал для обслуживания. Разумеется, метод DLTS имеет более широкие возможности, но они не всегда необходимы, когда речь идет о производстве серийных приборов.

Разработанный комплект тестовых диодов с барьером Шоттки позволил проводить измерения с минимальным влиянием паразитных утечек, а дополнительный анализ вольт-фарадных характеристик дал возможность определять значение максимума профиля распределения электронов с высокой точностью — путем экстраполяции измеренных значений, за счет исключения влияния паразитных сопротивлений образцов. Это особенно важно в связи с необходимостью анализа перспективных полупроводниковых структур с двумерным электронным газом.

Благодаря разработанной методике был проведен анализ радиационной стойкости GaN и GaAs структур, которые применяются для изготовления полупроводниковых диодов и транзисторов. Полученная методика позволила наблюдать радиационно-стимулированную диффузию в GaAs структурах, что важно для анализа радиационной стойкости полупроводниковых приборов. Дополнительно было установлено, что GaN структуры выдерживают больший флюенс излучения, чем GaAs структуры, а значит, GaN является наиболее перспективным материалом для изготовления радиационно-стойких приборов.

Работа частично поддержана грантом (соглашение от 27 августа 2013 г. № 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ), а также государственным заданием Министерства образования и науки РФ (код проекта 2183).

## Список литературы

- [1] Е.Р. Аствацатурьян, Д.В. Громов, В.М. Ломако. *Радиационные эффекты в приборах и интегральных схемах на арсениде галлия* (Минск, Университетское, 1992).
- [2] А.В. Мурель, С.В. Оболенский, А.Г. Феллов, Е.В. Киселева. ФТП, **38** (7), 834 (2004).
- [3] Е.С. Оболенская, Е.А. Тарасова, С.В. Оболенский. ВАНТ, сер. Физика радиационного воздействия на аппаратуру, № 4, 9 (2012).
- [4] Е.В. Киселева, С.В. Оболенский, М.А. Китаев, О.В. Ткачев, В.П. Шукайло, В.Т. Громов. ПЖТФ, **31** (20), 58 (2005).
- [5] Ю.В. Федоров. Электроника, № 2, 92 (2011).
- [6] В.П. Карамышев, И.В. Мурылева. Электрон. техн., сер. Микроэлектроника, вып. 6, 26 (1984).
- [7] С.М. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1981).

- [8] Н.В. Басаргина, И.В. Ворожцова, С.М. Дубровских, О.В. Ткачев, В.П. Шукайло, Е.А. Тарасова, А.Ю. Чуринов, С.В. Оболенский. Вестн. ННГУ им. Н.И. Лобачевского, № 3-1, 61 (2013).
- [9] Р. Цулег. *Радиационные эффекты в ИС на GaAs / Арсенид галлия в микроэлектронике*, под ред. Н. Айнспрука, У. Уисмена (М., Мир, 1988) с. 501.
- [10] N.A. Sobolev. In: *Handbook of Self Assembled Semiconductor Nanostructures for Novel Devices in Photonics and Electronics*, ed. by M. Henini (Elsevier, Amsterdam et al., 2008) chap. 13, p. 392.

Редактор А.Н. Смирнов

### Studying processes in GaN and GaAs structures under the influence of $\gamma$ -neutron irradiation

E.A. Tarasova\*, A.V. Hananova\*, S.V. Obolensky\*, V.E. Zemliakov<sup>+</sup>, Yu.N. Sveshnikov<sup>•</sup>, V.E. Egorkin<sup>•</sup>, V.A. Ivanov<sup>♦</sup>, G.V. Medvedev<sup>♦</sup>, D.S. Smotrin<sup>\*♦</sup>

\* Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

<sup>+</sup> National Research University of Electronic Technology, 124498 Zelenograd, Moscow, Russia

<sup>•</sup> Elma-Malachit, JSC, 124460 Zelenograd, Moscow, Russia

<sup>♦</sup> JSC RPE „Salut“, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** The results of experimental investigations of the parameters GaN and GaAs structures after  $\gamma$ -neutron irradiation are provided. A special set of test diodes for reducing error of measurement is proposed. This method is very important for the design and optimization of semiconductor devices.