

07.2

## Комплексное исследование кластеров радиационных дефектов в GaAs-структурах после нейтронного воздействия

© С.В. Оболенский<sup>1</sup>, Е.В. Волкова<sup>1</sup>, А.Б. Логинов<sup>2</sup>, Б.А. Логинов<sup>3</sup>, Е.А. Тарасова<sup>1</sup>,  
А.С. Пузанов<sup>1</sup>, С.А. Королев<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский университет „МИЭТ“, Зеленоград, Москва, Россия

<sup>4</sup> Институт физики микроструктур РАН, Афонино, Нижегородская обл., Россия

E-mail: obolensk@rf.unn.ru

Поступило в Редакцию 2 ноября 2020 г.

В окончательной редакции 25 ноября 2020 г.

Принято к публикации 26 ноября 2020 г.

Приводятся результаты экспериментальных исследований электрофизических параметров и морфологии поверхности GaAs-структур кольцевых и круговых диодов Шоттки до и после облучения нейтронами с энергией  $\sim 1$  MeV. Методом атомно-силовой микроскопии выявлены объемные радиационные дефекты. По результатам вольт-фарадных измерений определена концентрация электронов и оценена их подвижность до и после облучения. На основе результатов, полученных с применением совокупности данных методов, предложена методика определения средних размеров областей пространственного заряда кластеров радиационных дефектов.

**Ключевые слова:** кластеры радиационных дефектов, вольт-фарадный метод, атомно-силовая микроскопия.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.05.50676.18608

Известно, что при воздействии быстрых нейтронов ( $\sim 1$  MeV) в твердом теле помимо точечных дефектов и их комплексов в результате каскадных смещений атомов материала формируются разупорядоченные области — кластеры радиационных дефектов [1]. Такие объекты состоят из субкластеров и окружены областью пространственного заряда (ОПЗ) размером в десятки и сотни нанометров, которая является препятствием для движения электронов [2]. В условиях сокращения размеров активных областей современных полупроводниковых приборов учет морфологии радиационных дефектов становится все более важным для прогнозирования радиационной стойкости приборов нанoeлектроники. Характерные размеры кластеров и субкластеров дефектов (10–100 nm) [1,3] сопоставимы с размерами современных диодов и транзисторов, т.е. вдоль их активных областей может располагаться всего один или несколько кластеров. При этом движение электронов может происходить между кластерами и/или субкластерами дефектов, в том числе и в квазибаллистическом режиме [4], или иметь особенности, свойственные перколяционной проводимости. В этих условиях для моделирования процесса переноса носителей заряда требуется детальная информация о размерах, форме и внутренней структуре кластеров дефектов. Наиболее важным является определение размеров ОПЗ, так как поле пространственного заряда значительно влияет на перенос электронов в облученных образцах.

В настоящей работе приводятся результаты комплексного экспериментального исследования характеристик крупных разупорядоченных областей, образующихся

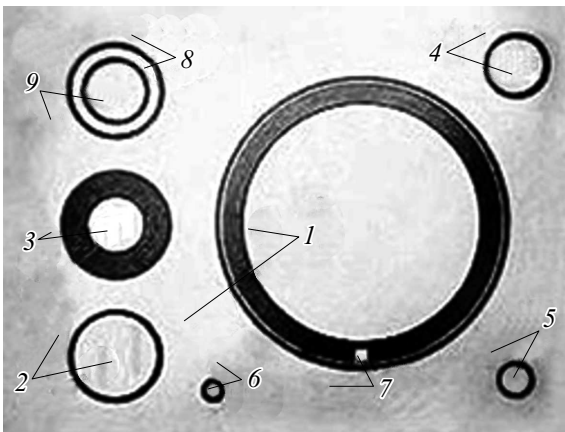
при воздействии нейтронов спектра деления в GaAs. Анализ морфологии кластеров дефектов, определение их количества и размеров в приповерхностном слое  $n$ -GaAs проводились непосредственно по результатам зондовых измерений на поверхности материала. В отличие от [5] размеры ОПЗ кластеров вычислялись на основе данных об изменении концентрации и подвижности электронов в слоях, прилегающих к поверхности.

Исследуемые структуры  $n/n^+$ -GaAs были изготовлены с использованием газофазной эпитаксии на полужолирующей GaAs-подложке. Толщина слоя и концентрация атомов донорной примеси составляли соответственно: для  $n$ -слоя — 90 nm и  $(3-5) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , для  $n^+$ -слоя — 500 nm и  $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . Максимум концентрации электронов достигался в средней части  $n$ -слоя, а подвижность электронов была минимальной ( $2000-3000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ) в  $n$ -слое и увеличивалась до  $4000-5000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$  в  $n^+$ -слое. На структурах были сформированы кольцевые и круговые диоды, содержащие барьер Шоттки. Радиус круговых контактов Шоттки варьировался от 50 до 30  $\mu\text{m}$ , зазор кольцевого контакта для тестовых диодов 7 и 8 составлял 9 и 40  $\mu\text{m}$  соответственно (рис. 1). Емкость перехода металл-полупроводник в исследуемых диодах при нулевом напряжении смещения составила от 5 до 500 pF. Для удобства измерений и снижения их погрешности комплект диодов объединялся в тестовый объект, предназначенный для определения профилей распределения электронов по глубине и оценки их подвижности. Методика проведения измерений обеспечивала низкую погрешность за счет компенсации погрешностей

Результаты измерений распределений по глубине концентрации и подвижности электронов в исследуемых структурах (20 образцов)

Параметр	Концентрация		Подвижность	
	без отжига	с отжигом	без отжига	с отжигом
Положение максимума (для концентрации) и минимума (для подвижности) по глубине слоя после облучения, а.е.	87	95	72	96
Значение максимума (для концентрации) и минимума (для подвижности) после облучения, а.е.	64	98	69	98
Среднее значение в слое после облучения, а.е.	55	85	65	93

Примечание. Приведено значение в процентах от исходного.



**Рис. 1.** Исследуемый тестовый объект с круговыми и кольцевыми диодами Шоттки. Размеры диодов от 9 до  $300 \mu\text{m}$ . Цифрами обозначены пары контактов, которые использовались для измерений.

путем сопоставления результатов измерений на диодах с различными размерами [6]. Конструкция образцов позволяла исследовать микрорельеф поверхности полупроводникового материала в зазорах между контактами (рис. 1) до и после радиационного воздействия.

Толщина проводящего  $n$ -слоя исследуемой структуры была сопоставима с размерами крупных кластеров радиационных дефектов ( $\sim 100 \text{ nm}$ ) [4] и их областей пространственного заряда ( $\sim 30 \text{ nm}$  согласно модели Госсика [2]), поэтому можно считать, что их поверхностная плотность, измеренная с помощью методики атомно-силовой микроскопии (АСМ), соответствовала таковой в самом легированном слое. Для контроля влияния точечных дефектов и мелких кластеров, которые „не видны“ на поверхности материала, часть образцов подвергалась отжигу.

Для концентрации примесей  $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$  характерное расстояние между ионами доноров составляет

$12\text{--}13 \text{ nm}$ , так что внутри крупных кластеров радиационных дефектов ( $> 100 \text{ nm}$ ) нейтрализуется до 1000 ионов доноров, а субкластеры с размером  $10\text{--}20 \text{ nm}$  „поглощают“ только один донор. Более мелкие субкластеры ( $\sim 5 \text{ nm}$ ) могут размещаться в промежутке между донорами, но влиять на них посредством ОПЗ. Таким образом, кластеры дефектов вместе с их ОПЗ „выкусывают“ области объемом  $V_0$ , так что статическая проводимость слоя  $g_{st}$  уменьшается пропорционально нарушенному объему  $V$

$$g_{st} \sim V(1 - \exp[-DV_0S/V]),$$

где  $D$  — доза облучения,  $S$  — площадь образца [7]. АСМ дает информацию об объеме кластеров без ОПЗ, так что сопоставление результатов позволяет определить ширину ОПЗ.

Измерения проводились до и после нейтронного облучения спектра деления (энергия  $0.01\text{--}3 \text{ MeV}$ , средняя энергия около  $1 \text{ MeV}$ , колоколообразный спектр); флюенс составлял  $0.5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ , облучение изотропно по направлению. Образцы размещались в специальных контейнерах для транспортировки и облучения. Каждый исследуемый образец упаковывался отдельно в специальный пакет, во время проведения эксперимента по облучению образцы не извлекались из контейнеров. С помощью оптического микроскопа проводился контроль чистоты поверхности исследуемых структур и анализировались механические повреждения структур как до, так и после облучения. Были проведены две серии измерений: 1) до и после облучения; 2) до и после облучения и последующего отжига дефектов с помощью быстрого ( $5 \text{ min}$ ) разогрева до температуры  $200^\circ\text{C}$  и выдержки около суток с плавным снижением температуры до комнатной.

Измерение зависимости концентрации электронов по глубине проводилось вольт-фардадным методом по методике, предложенной в работе [6]. Результаты измерений приведены в таблице. Видно, что концентрация и подвижность существенно меняются после облучения, но

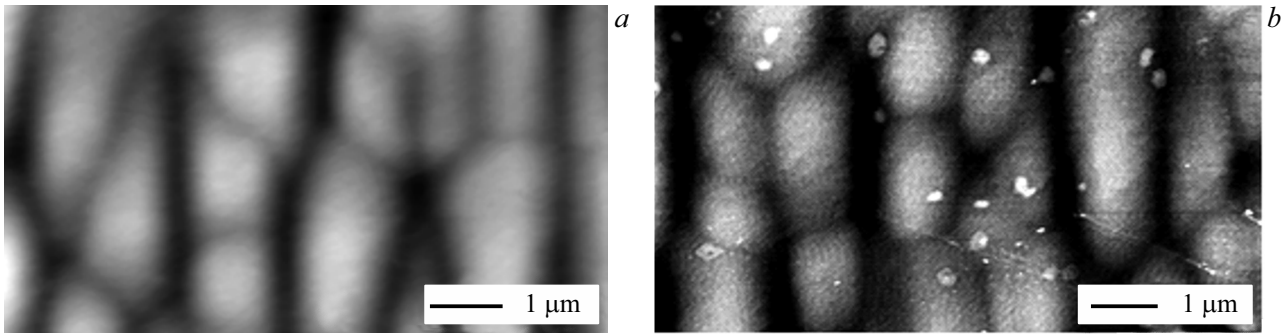


Рис. 2. Характерный вид микрорельефа поверхности GaAs до (a) и после (b) воздействия быстрых нейтронов.

их значения могут быть почти полностью восстановлены отжигом точечных дефектов и мелких кластеров.

Для исследований микрорельефа поверхности GaAs до и после воздействия быстрых нейтронов использовался сканирующий зондовый микроскоп „СММ-2000“ (изготовитель — АО „Завод ПРОТОН“, Зеленоград, www.microscopy.su). До измерений образцы закреплялись на специальной ламели так, чтобы их можно было позиционировать при повторных измерениях (после облучения) с погрешностью не хуже 10–20 μm; таким образом, зонд микроскопа попадал в ту же область, что и при измерениях до облучения [8]. Это позволяло надежно констатировать наличие нарушений на поверхности образцов.

Кадры топографии поверхности в области GaAs-колец диодов и транзисторов (рис. 1) получены в режиме АСМ. В качестве зондов использованы кантилеверы с радиусом закругления острия 2 nm марки „MSNL“ фирмы Bruker (США). Достижимое латеральное разрешение до 2 nm, по высоте — до 0.1 nm. Для одновременного с изучением рельефа снятия карт электропроводности исследуемой поверхности с разрешением до 5 nm применялись также проводящие кантилеверы RTESPA фирмы Bruker (США) с радиусом закругления острия 8 nm. Дополнительные измерения проводились с использованием кантилеверов с радиусом закругления острия 10 nm марки NSG30/TiN фирмы NT-MDT. На рис. 2 приведены типичные изображения, полученные при сканировании поверхности GaAs до и после облучения.

Отметим, что качественный вид зерен GaAs сохраняется, при этом на сканах облученного материала появляются дополнительные включения значительно меньшего размера, средняя поверхностная плотность которых составила  $1.2 \mu\text{m}^{-2}$ . При расчете поверхностной плотности и распределения объектов по размерам учитывались только те, которые состоят не менее чем из девяти точек на изображении, обнаружение более мелких областей считалось недостоверным. Усредненный диаметр кластеров радиационных дефектов рассчитывался как  $d = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}}$ , где  $S$  — площадь объекта.

Вероятность  $P_m$  обнаружения  $m$  кластеров радиационных дефектов подчиняется распределению Пуассона

$$P_m = \frac{(\langle\sigma\rangle F_n V N)^m}{m!} \exp(-\langle\sigma\rangle F_n V N),$$

где  $F_n$  — флюенс нейтронов,  $N$  — концентрация атомов вещества,  $V$  — объем области, равный произведению исследуемой площади  $S$  и усредненной по спектру нейтронов глубины обнаружения кластеров радиационных дефектов  $\langle l \rangle$ :

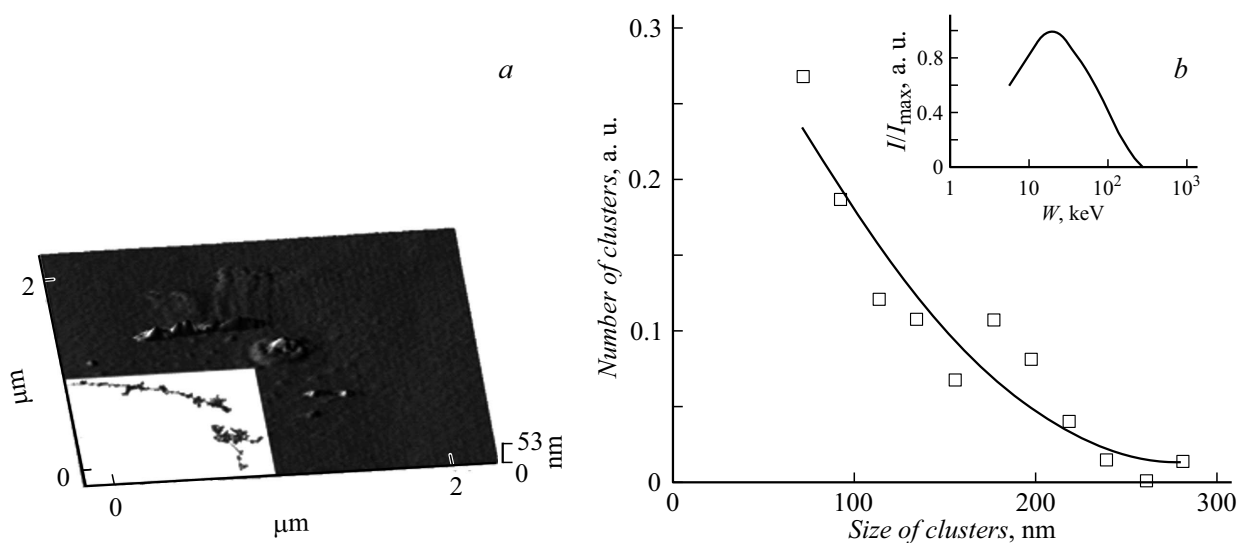
$$V = S\langle l \rangle = S \int_0^{\infty} l(E) f(E) dE,$$

$l(E)$  — зависимость длины пробега первичного атома отдачи в веществе от энергии нейтронов,  $\langle\sigma\rangle$  — усредненное по спектру нейтронов сечение взаимодействия, которое рассчитывается по формуле

$$\langle\sigma\rangle = \int_0^{\infty} \sigma(E) f(E) dE,$$

$\sigma(E)$  — спектр сечения взаимодействия нейтронов с веществом,  $f(E)$  — нормированный спектр нейтронов ( $\int_0^{\infty} f(E) dE = 1$ ),  $E$  — энергия нейтронов [9–12]. Расчеты показали, что для площади, равной  $1 \mu\text{m}^2$ , с вероятностью более 0.4 кластер будет обнаружен при флюенсе нейтронов  $4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  и с вероятностью, близкой к единице, при  $8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ . Это согласуется как с данными зондовой микроскопии, так и с результатами расчетов каскадов столкновений атомов, образующих кластеры дефектов, методом Монте-Карло по известному алгоритму TRIM [13] (рис. 3).

В результате измерений и расчетов было получено среднее значение величины ОПЗ кластеров, которое составило 37 nm, что несколько больше, чем получается по модели Госсика ( $\sim 30$  nm). Размер ОПЗ зависел от уровня концентрации электронов и увеличивался до 100 nm и более в  $n^-$ -слое, проводимость которого снизилась значительно.



**Рис. 3.** Анализ распределения кластеров дефектов по размерам. *a* — АСМ-изображение структуры кластеров радиационных дефектов. На вставке — результат моделирования в программе TRIM. *b* — распределение по размерам кластеров радиационных дефектов, образовавшихся при облучении GaAs нейтронами: сплошная линия — расчет по TRIM, точки — зондовые измерения. На вставке показан спектр средних энергий, получаемых первичными атомами Ga при столкновениях с быстрыми нейтронами.

В результате исследований доказана работоспособность предложенного подхода к определению параметров кластеров радиационных дефектов и их распределения в целом. Результаты исследований могут быть использованы для моделирования параметров GaAs-полупроводниковых приборов после нейтронного облучения.

### Благодарности

Авторы благодарят сотрудников АО НПП „Салют“ А.Г. Фефелова, Д.И. Дюкова и М.А. Кревского за предоставление образцов и полезные обсуждения.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания (проект № 0729-2020-0057).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Т.М. Агаханян, Е.Р. Аствацатурьян, П.К. Скоробогатов, *Радиационные эффекты в интегральных микросхемах* (Энергоатомиздат, М., 1989).
- [2] B.R. Gossick, *J. Appl. Phys.*, **30** (8), 1214 (1959). <https://doi.org/10.1063/1.1735295>
- [3] С.В.Оболенский, *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, № 7, 53 (2003).
- [4] С.В. Оболенский, *Микроэлектроника*, **33** (2), 153 (2004).

- [5] В.А. Скуратов, А.Е. Ефимов, Д.Л. Загорский, *ФТТ*, **44** (1), 165 (2002),
- [6] 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).
- [7] *Физические процессы в облученных полупроводниках*, под ред. Л.С. Смирнова (Наука, Новосибирск, 1977).
- [8] A.V. Loginov, R.R. Ismagilov, *J. Nanophoton.*, **11** (3), 1 (2017). <https://doi.org/10.1117/1.JNP.11.032509>
- [9] Е.С. Вентцель, *Теория вероятностей* (Наука, М., 1969).
- [10] И.Ю. Забавичев, А.А. Потехин, *Вестн. ННГУ. Сер.: Физика твердого тела*, № 1(2), 64 (2014).
- [11] А.С. Пузанов, С.В. Оболенский, В.А. Козлов, в сб. *Тр. Всерос. конф. Радиационная стойкость электронных систем* („Стойкость-2016“) (НИЯУ МИФИ, М., 2016), с. 69–70.
- [12] А.С. Пузанов, С.В. Оболенский, в сб. *Тезисы докладов VI Всерос. конф. Физические и физико-химические основы ионной имплантации* (ННГУ, Н. Новгород, 2016), с. 89–90.
- [13] J.P. Biersack, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*, **27** (1), 21 (1987). [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(87\)90005-X](https://doi.org/10.1016/0168-583X(87)90005-X)