

07.2

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

© С.В. Оболенский¹, Е.В. Волкова¹, А.Б. Логинов², Б.А. Логинов³, Е.А. Тарасова¹,
А.С. Пузанов¹, С.А. Королев⁴

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ Национальный исследовательский университет „МИЭТ“, Зеленоград, Москва, Россия

⁴ 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 ~ 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 (~ 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 μm , зазор кольцевого контакта для тестовых диодов 7 и 8 составлял 9 и 40 μm 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.

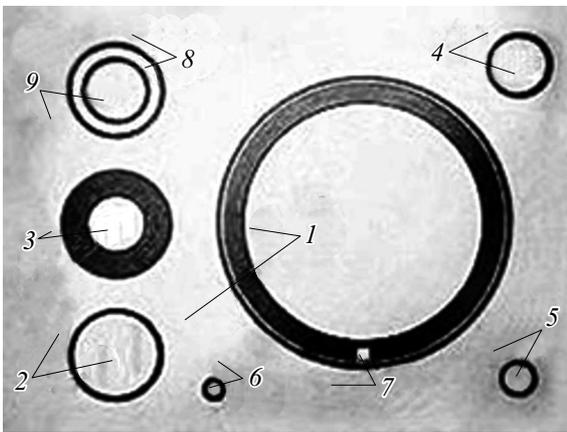


Рис. 1. Исследуемый тестовый объект с круговыми и кольцевыми диодами Шоттки. Размеры диодов от 9 до $300 \mu\text{m}$. Цифрами обозначены пары контактов, которые использовались для измерений.

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 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 min) разогрева до температуры 200°C и выдержки около суток с плавным снижением температуры до комнатной.

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

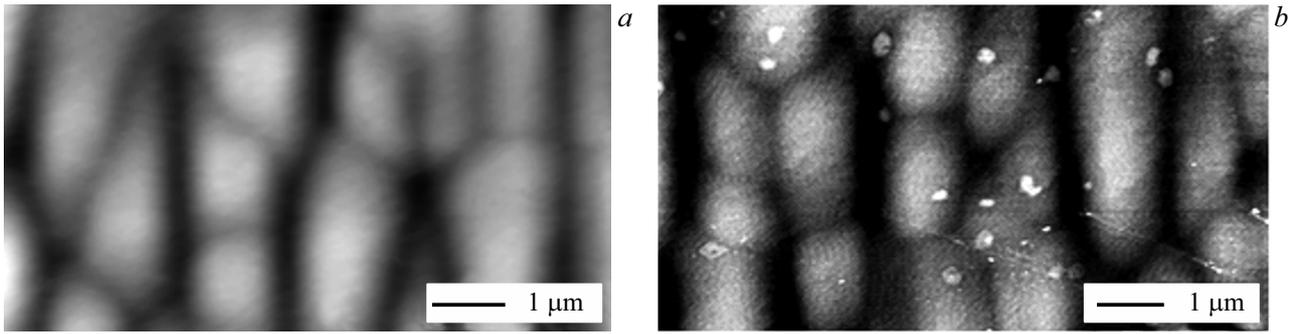


Рис. 2. Характерный вид микрорельефа поверхности GaAs до (a) и после (b) воздействия быстрых нейтронов.

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 (~ 30 nm). Размер ОПЗ зависел от уровня концентрации электронов и увеличивался до 100 nm и более в n -слое, проводимость которого снизилась значительно.

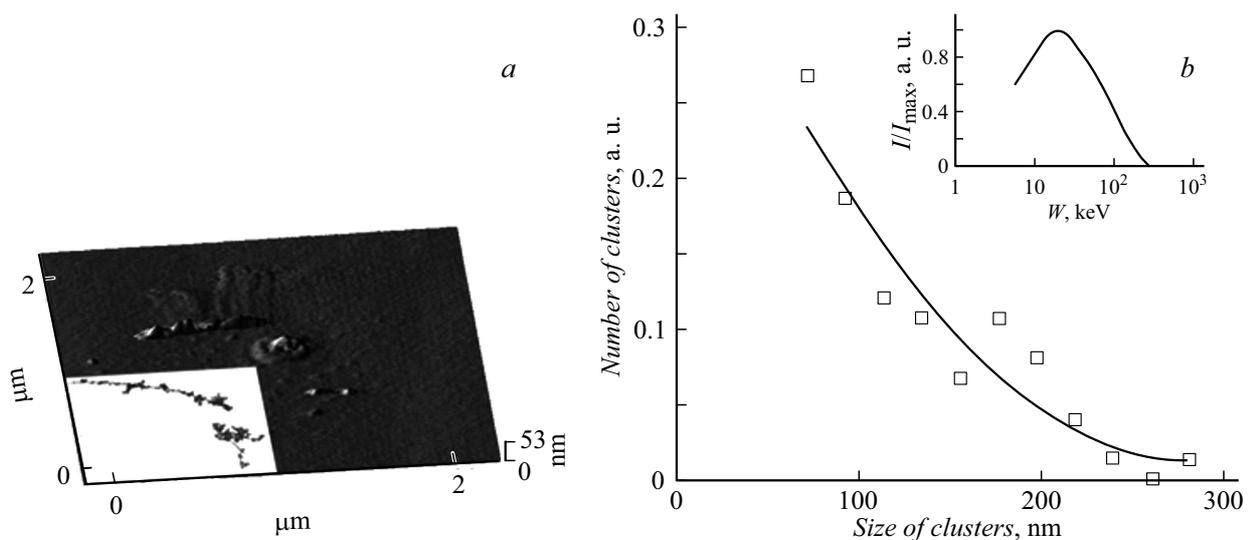


Рис. 3. Анализ распределения кластеров дефектов по размерам. *a* — АСМ-изображение структуры кластеров радиационных дефектов. На вставке — результат моделирования в программе TRIM. *b* — распределение по размерам кластеров радиационных дефектов, образовавшихся при облучении GaAs нейтронами: сплошная 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)