

07

## Особенности взаимодействия протонов с транзисторными структурами с двумерным AlGaIn/GaN-каналом

© В.В. Емцев<sup>1</sup>, Е.Е. Заварин<sup>1</sup>, М.А. Козловский<sup>1</sup>,  
М.Ф. Кудояров<sup>1</sup>, В.В. Лундин<sup>1</sup>, Г.А. Оганесян<sup>1</sup>, В.Н. Петров<sup>1</sup>,  
Д.С. Полоскин<sup>1</sup>, А.В. Сахаров<sup>1</sup>, С.И. Трошков<sup>1</sup>, Н.М. Шмидт<sup>¶,1</sup>,  
В.Н. Вьюгинов<sup>2</sup>, А.А. Зыбин<sup>2</sup>, Я.М. Парнес<sup>2</sup>, С.И. Видякин<sup>3</sup>,  
А.Г. Гудков<sup>3</sup>, А.Е. Черняков<sup>4</sup>, В.В. Козловский<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

<sup>2</sup> ЗАО „Светлана-Электронприбор“, Санкт-Петербург

<sup>3</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

<sup>4</sup> НТЦ микроэлектроники РАН, Санкт-Петербург

<sup>5</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>¶</sup> E-mail: Natalia.Shmidt@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 30 марта 2016 г.

Показано, что взаимодействие протонов с энергией 1 MeV и дозами  $(0.5-2) \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  с транзисторными структурами с двумерным AlGaIn/GaN-каналом (AlGaIn/GaN-HEMT) сопровождается не только генерацией точечных дефектов, но и образованием локальных областей с разупорядоченным наноматериалом. Степень разупорядоченности наноматериала оценивалась количественно методами мультифрактального анализа. Увеличение степени разупорядоченности наноматериала, наиболее ярко проявляющееся при дозе протонов  $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ , приводит к падению подвижности и электронной плотности в двумерном канале HEMT-структур в несколько раз. При этом на транзисторах наблюдается падение величины тока сток-исток и рост тока утечки затвора на порядок. В HEMT-структурах с повышенной разупорядоченностью наноматериала до воздействия протонов, облучение протонами, даже с дозой  $1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ , приводит к подавлению двумерной проводимости в канале и выходу из строя транзисторов.

Транзисторы на основе AlGaIn/GaN-наногетероструктур с высокой подвижностью электронов в двумерном канале (AlGaIn/GaN-HEMT) являются частью элементной базы полупроводниковой СВЧ-электроники.

При функционировании в космосе эти приборы подвергаются воздействию потоков частиц высоких энергий от 1 до  $10^{12}$  GeV, проходящих из Галактики и от Солнца. Львиную долю в этом потоке, около 90%, занимают протоны. В последнее десятилетие изучение влияния различных видов ионизирующих излучений на образование дефектов в полупроводниковых материалах, на работоспособность и надежность приборов, в том числе приборов СВЧ-электроники для космических применений, приобрело особую актуальность. Большое число работ посвящено этой тематике. Наибольшее внимание уделено изучению точечных радиационных дефектов, а в AlGaIn/GaN-HEMT — выяснению физики явлений, приводящих к изменению основных параметров транзисторов. Существенно меньше изучена роль разупорядоченных областей, возникающих под действием ионизирующих излучений. Между тем в отдельных работах [1,2], выполненных на традиционных полупроводниках, отмечается, что такие области играют существенную роль в процессах рекомбинации неравновесных носителей. Кроме того, хорошо известно, что разная степень разупорядоченности наноматериала свойственна слоям [3] и приборным структурам [4] на основе нитридов третьей группы и без воздействия ионизирующих излучений. Разупорядоченность наноматериала вызвана спецификой роста этих материалов на зародышевых слоях, в неравновесных условиях с большими рассогласованиями (до 13%) постоянных решетки подложки и слоев и формированием мозаичной (колончатой) структуры, сросшейся по дислокационным и дилатационным границам, пронизывающим всю структуру. Эти ростовые особенности приводят к сосуществованию микро- и нанообластей двумерного и трехмерного характера роста в одной структуре со слабой разориентацией относительно друг друга и, как следствие, к разупорядоченному рельефу поверхности, отражающему сложную внутреннюю организацию наноматериала [3,4]. Сложная внутренняя организация наноматериала приводит к случайным флуктуациям состава твердого раствора и к неоднородному распределению локальных механических напряжений. Система протяженных дефектов, пронизывающая HEMT-структуру, содержит прорастающие дислокации различного типа, в том числе дислокации с открытым ядром (V-дефекты), скопления дислокаций, дислокационные стенки, а также дефекты упаковки с общей плотностью до  $10^8$  см<sup>-2</sup>. Свойства отдельных элементов этой системы существенно различаются по проводимости. Ранее было выяснено, что сложная внутренняя организация наноматериала, по существу фрактальная, заметно влияет на частотные

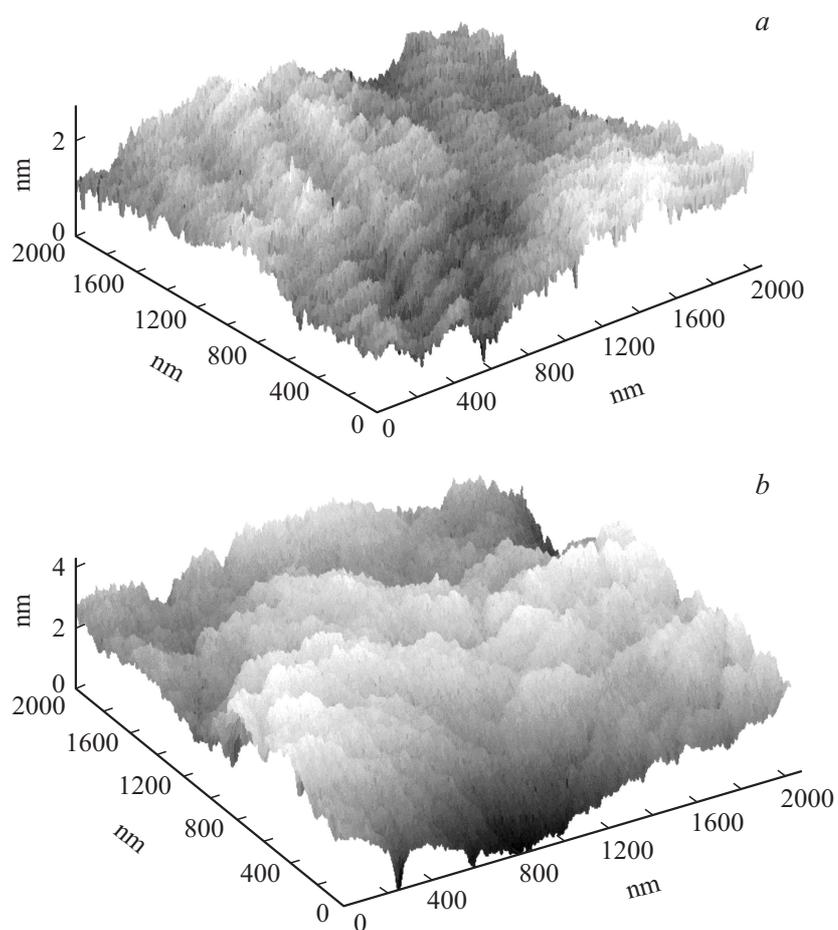
характеристики AlGaIn/GaN-HEMT [5], а также на величину подвижности носителей заряда в слоях нитрида галлия [3].

Целью работы явилось изучение разупорядоченности наноматериала, возникающее при взаимодействии протонов с AlGaIn/GaN-HEMT-структурами, ее влияние на подвижность электронов в двумерном канале и на параметры транзисторов.

При решении поставленной задачи опирались на ранее разработанную и апробированную методику количественной оценки характера организации наноматериала с помощью мультифрактального параметра степени нарушения локальной симметрии (степень разупорядочения наноматериала  $\Delta_p$ ) [3]. Методика основана на том, что в материалах со сложной внутренней структурой особенности морфологии отражают характер организации наноматериала. Благодаря этому обработка математического множества, соответствующего изображению поверхности слоя или структуры в атомно-силовом микроскопе, методами мультифрактального анализа по программе MFDROM [6] позволяет количественно охарактеризовать степень разупорядоченности ( $\Delta_p$ ). Точность определения параметра  $\Delta_p \pm 0.002$ . Увеличение значений параметра  $\Delta_p$  по абсолютной величине коррелирует с усложнением морфологии поверхности структур (появление более развитого рельефа), вызванным ухудшением согласования блоков мозаичной структуры, увеличением протяженности дислокационных стенок и количества скоплений дислокаций с одновременным увеличением неоднородности их распределения, хотя увеличения общей плотности одиночных дислокаций при этом может не наблюдаться [3,7]. Эксперименты проводились на AlGaIn/GaN-HEMT-структурах, выращенных методом MOCVD, конструктивные и технологические подробности приведены в [8]. Для исследований были выбраны два типа HEMT-структур, существенно отличающихся только по характеру организации наноматериала, со значениями  $\Delta_p$  0.345 и 0.350. Из структур каждого типа были сделаны образцы с омическими контактами для измерения подвижности электронов в двумерном канале HEMT-структур методом Ван-дер-Пау, а также транзисторы в ЗАО „Светлана-Электронприбор“ с топологией, приведенной в [8]. Облучение проводилось протонами, ускоренными на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе до энергии 1.0 MeV, в вакууме  $10^{-5}$  Torr. От типа образцов HEMT-структур и небольшие партии транзисторов из этих же структур облучались протонами с дозами  $5 \cdot 10^{13}$ ,  $1 \cdot 10^{14}$ ,  $2 \cdot 10^{14}$  cm<sup>-3</sup>. Морфология поверх-

ностей структур до и после облучения изучалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ), количественно оценивался общепринятый параметр оценки шероховатости поверхности RMS и максимальные отклонения величины шероховатости Peak-to-peak ( $Pp$ ), а также значения  $\Delta_p$ .

Взаимодействие протонов с AlGaIn/GaN-HEMT-структурами сопровождается возникновением разупорядоченных локальных областей наноматериала, нарушением и уширением ростовых ступеней. Наиболее ярко эти изменения выражены после воздействия протонов с дозой  $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . На рис. 1 представлены АСМ-изображения поверхностей типичных участков HEMT-структуры с  $\Delta_p = 0.345$  до (а) и после (б) облучения протонами. Разупорядоченность наблюдается практически на всей поверхности HEMT-структуры, но ее характер отличается на разных участках. Количественные оценки параметра  $\Delta_p$  на разных участках этой структуры дают значения от 0.350 до 0.365, в то время как до облучения протонами разупорядоченность наноматериала и разброс значений  $\Delta_p$  на разных участках были заметно меньше — 0.345–0.348. Эти результаты коррелируют с данными по шероховатости поверхности. Значение параметра RMS в полях  $2 \times 2 \mu\text{м}$  на разных участках структуры 0.2320–0.3375 nm до облучения возрастает до значений 0.5115–0.8170 nm после облучения и отражает значительное увеличение разброса между участками одной и той же структуры. Параметр  $Pp$ , регистрирующий максимальную разницу по высоте рельефа в отдельных точках исследуемых участков, дает разброс 2.262–2.654 nm до воздействия и 8–25 nm после воздействия. Усиление разупорядоченности наноматериала HEMT-структуры сопровождается падением подвижности электронов в двумерном канале (рис. 2, кривая 2) относительно значений до облучения (рис. 2, кривая 1). Кроме того, на транзисторах наблюдается падение тока сток-исток на порядок и рост тока затвора, а часть транзисторов (до 40%) перестает функционировать. При дозе  $10^{14} \text{ см}^{-2}$  количество нефункционирующих транзисторов существенно уменьшилось до 20%, а на остальных падение тока незначительное. При дозе  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  никаких изменений не наблюдается. Полученные результаты на транзисторах с  $\Delta_p = 0.345$  соответствуют лучшим опубликованным [9]. На HEMT-структурах с повышенной разупорядоченностью ( $\Delta_p = 0.350$ ) до облучения падение подвижности электронов в двумерном канале аналогично представленному на рис. 2, кривая 2, но наблюдается уже при дозе протонов  $10^{14} \text{ см}^{-2}$ . При этом разупорядоченность по всей структуре  $\Delta_p = 0.365$  (рис. 1, с). Кроме



**Рис. 1.** Изображения в атомно-силовом микроскопе поверхностей AlGaIn/GaN-HEMT-структуры с  $\Delta_p = 0.345$  до (a) и после (b) облучения протонами дозой  $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ , а также HEMT-структуры после облучения дозой  $1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  (c), с ухудшенной организацией наноматериала ( $\Delta_p = 0.350$ ) до облучения.

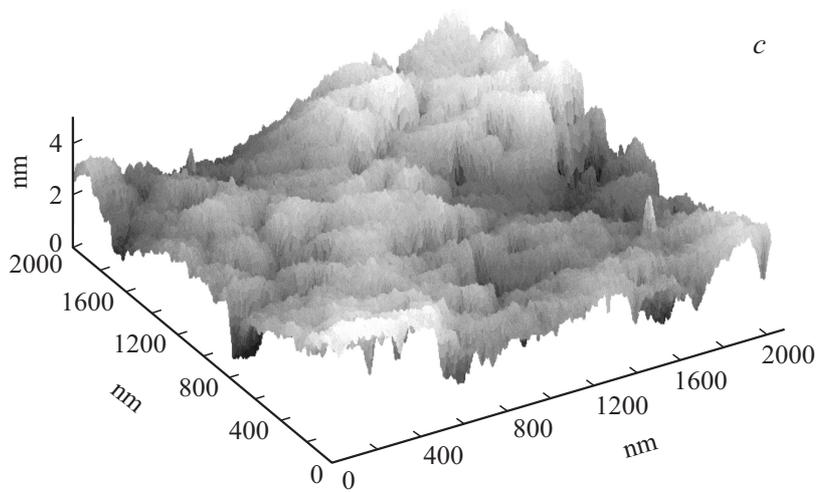


Рис. 1 (продолжение).

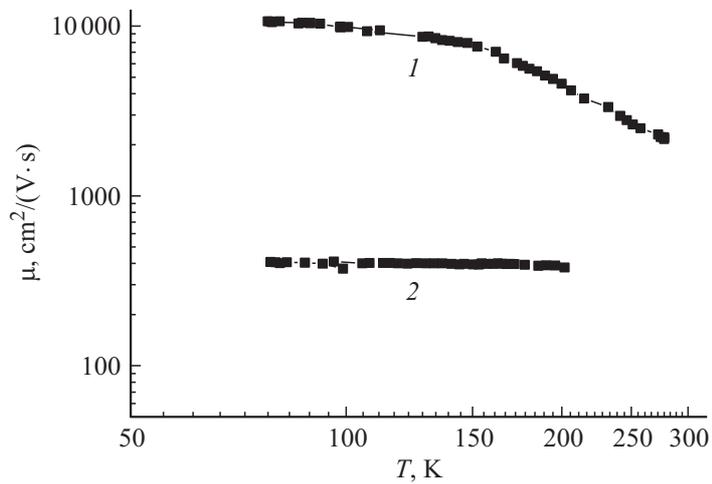


Рис. 2. Температурные зависимости подвижности в двумерном канале НЕМТ-структуры с  $\Delta_p = 0.345$ : 1 — до облучения протонами; 2 — после дозы  $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ .

того, заметно растет доля нефункционирующих транзисторов (до 60%) по сравнению с НЕМТ с меньшей разупорядоченностью (значения  $\Delta_p = 0.345$ ) до облучения. Полученные результаты позволяют предполагать, что интенсивное дефектообразование происходит, прежде всего, в локальных областях, например в скоплениях дилокаций, в  $V$ -дефектах, в дефектах упаковки, содержащих по всей глубине НЕМТ-структуры слабо связанные атомы как азота, так и галлия, и сопровождается изменением внутренней организации наноматериала, изменением механических напряжений на границах сросшихся доменов, а также проводящих свойств протяженных дефектов. Очевидно, что для обсуждения механизмов дефектообразования в системе протяженных дефектов и количественных оценок необходимы дополнительные исследования.

Таким образом, взаимодействие протонов с НЕМТ-структурами сопровождается не только генерацией точечных радиационных дефектов, но и локальным усилением разупорядоченности наноматериала (ростом значений параметра  $\Delta_p$ ). Причем этот процесс развивается неоднородно по площади НЕМТ-структуры как на нанометровых, так и на микронных масштабах. При этом наблюдается корреляция между ухудшением свойств двумерного канала НЕМТ-структур и ростом значений параметра  $\Delta_p$ . Усиление локальной разупорядоченности наноматериала не только нарушает геометрию двумерного канала, но и может изменять распределение локальных механических напряжений, состав твердого раствора в локальных областях и приводить к неоднородному распределению тока под затвором, а также между стоком и истоком. Первые результаты, полученные в работе, показали значительное влияние локальной разупорядоченности наноматериала, как присутствующей в AlGaIn/GaN-НЕМТ-структурах до, так и усиливающейся после воздействия протонов на параметры транзисторов и их радиационную стойкость. Кроме того, полученные результаты проливают свет на имеющиеся в литературе данные разных авторов по расхождению пороговых значений радиационной стойкости и надежности транзисторов на основе AlGaIn/GaN-НЕМТ-структур. Эти результаты показывают, что улучшение упорядоченности наноматериала и ее контроль в процессе производства транзисторов может стать одним из способов повышения радиационной стойкости и надежности НЕМТ-транзисторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.574.21.0116, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57414XO116).

## Список литературы

- [1] Коноплева Р.Ф., Остроумов В.Н. Взаимодействие заряженных частиц высоких энергий с германием и кремнием. М.: Атомиздат, 1975. С. 128.
- [2] Оболенский С.В. // Микроэлектроника. 2004. № 2. С. 153–159.
- [3] Schmidt N.M., Kolmakov A.G., Emtsev V.V., Lundin W.V. // Nanotechnology. 2001. V. 12. P. 471–474.
- [4] Shabunina E., Averkiev N., Chernyakov A. et al. // Phys. Status Solidi. C. Curr. Top. Solid State Phys. 2013. V. 10. P. 335–337.
- [5] Torkhov N.A., Novikov V.A. // Semiconductors. 2011. V. 45. P. 69–78.
- [6] Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов. М.: Центр, 2001. С. 116.
- [7] Ankudinov A.V., Besyulkin A.I., Kolmakov A.G. et al. // Physica. B. 2003. V. 340–342. P. 462–466.
- [8] Shalygin V.A., Vorobjev L.E., Firsov D.A. et al. // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. P. 073 108.
- [9] Громов Д., Чуков Г. Влияние радиации на гетероструктурные СВЧ приборы и интегральные схемы. Palamarium Academic Publishing, 2012. С. 91.