

Исследование влияния ионизирующих излучений на характеристики гетероструктурных полевых транзисторов на нитриде галлия

Д.В. Громов¹, Ю.А. Матвеев², Г.Н. Назарова¹

¹ Институт экстремальной прикладной электроники НИЯУ «МИФИ»

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», dvgrom@spels.ru

Аннотация — Проведен анализ радиационных эффектов в СВЧ гетероструктурных полевых транзисторах на основе нитрида галлия при воздействии ионизирующих излучений. Установлены физические механизмы радиационного изменения характеристик рассматриваемых GaN транзисторов.

Ключевые слова — нитрид галлия, ионизирующее излучение, наногетероструктуры, двумерный электронный газ, СВЧ элементная база.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно ведутся исследования по разработке перспективной СВЧ полупроводниковой элементной базы на основе соединений A_3B_5 , в том числе на нитридах галлия (GaN) [1].

Ожидаемая область применения изделий на GaN – приемно–усилительные тракты СВЧ–диапазона.

Полупроводниковые элементы на основе GaN способны работать в существенно более широком диапазоне выходной СВЧ мощности при повышенных напряжениях питания по сравнению с приборами на кремнии, арсениде галлия или на любом другом освоенном в производстве полупроводниковом материале.

Сейчас одно из главных направлений СВЧ-полупроводниковой электроники на GaN, на котором сосредоточены основные силы разработчиков – создание AlGaIn/GaN и AlGaIn/AlN/GaN наногетероструктурных полевых транзисторов (ГСПТ) с затвором Шоттки с высокими значениями скорости и подвижности электронов в канале [2]. Основной областью GaN ГСПТ, как и в остальных полевых транзисторных структурах с высокой подвижностью электронов в канале, является область двумерного электронного газа (ДЭГ). Она формируется в зоне гетероперехода между барьерным $Al_xGa_{1-x}N$ -слоем и нелегированным канальным GaN-слоем.

Возможность использования этих приборов в устройствах, эксплуатируемых в условиях воздействия радиационных факторов, вызывает необходимость исследования в них радиационных эффектов.

В данной работе проведен анализ влияния ионизирующих излучений (ИИ) на характеристики гетероструктурных полевых транзисторных структур на основе GaN.

II. БАЗОВЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что вся совокупность радиационных воздействий приводит к образованию в элементах изделий твердотельной СВЧ электроники (ТСВЧЭ) трех доминирующих эффектов:

- структурных повреждений, вызываемых воздействием высокоэнергетичного излучения (главным образом нейтронного и протонного);
- дозовых эффектов, вызываемых воздействиями импульсного и стационарного гамма, а также электронного и протонного излучений;
- эффектов мощности дозы, вызываемых воздействием импульсного гамма излучения.

Установлено, что трековые ионизационные эффекты при воздействии отдельных ядерных частиц не оказывают существенного влияния на современные изделия ТСВЧЭ и в практических случаях могут быть исключены из рассмотрения.

Структурные эффекты. Структурные эффекты смещения представляют собой перемещения атомов из своего нормального положения в кристаллической решетке вещества, происходящие вследствие передачи атому некоторой энергии при облучении. Пороговая энергия смещения (E_d) определяется как минимальная энергия, которую необходимо приложить к атому, чтобы переместить его из нормального положения. Расчетные значения E_d для различных полупроводни-

ковых материалов в зависимости от постоянной решетки материала приведены в табл. 1.

Пороговая энергия является фундаментальным показателем стойкости полупроводниковых материалов к воздействию стационарных ИИ. Поэтому можно предполагать, что GaN является одним из наиболее стойких к воздействию радиации полупроводников, используемых в ТСВЧЭ. Он близок по этому свойству к H-SiC.

Дозовые эффекты. Дозовые эффекты в первую очередь относятся к диэлектрическим слоям и покрытиям, которые используются при формировании приборных структур. Однако в ряде случаев в результате различных физических эффектов они являются причиной перестройки зарядовых состояний и в активных областях приборов.

В результате рассмотренных процессов в приборных слоях могут протекать дополнительные токи утечки, или, наоборот, первичные технологические дефекты могут компенсироваться с уменьшением общего тока прибора.

Эффекты мощности дозы. Действие импульсных ИИ на полупроводниковые и диэлектрические элементы сопровождается ионизацией, т.е. генерацией неравновесных электронно-дырочных пар. Механизмы ионизации носят пороговый характер и для различных видов ИИ проявляются по-разному.

Эффективность ионизации (g_0) является критерием, по которому в первом приближении можно проводить сравнения по стойкости к воздействию ИИ. Эта величина определяет количество избыточных носителей заряда в областях полупроводниковых приборов, ко-

торые формируют дополнительный ионизационный ток в областях полупроводниковых структур [3].

В табл. 2 приведены значения g_0 для различных материалов, применяемых в ТСВЧЭ.

Таким образом, при идентичных топологических и электрофизических параметрах элементов ионизационный ток в GaN приборах будет сравним с кремниевыми структурами, и будет существенно меньше по сравнению с элементами на арсениде галлия и германии.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В ГСПТ НА GAN

Облучение гамма-квантами. В работе [4] объектами исследования являлись ГСПТ на основе нелегированных структур AlGaIn/GaN (барьерный слой $Al_{0,33}Ga_{0,67}N$ – 23 нм, буферный слой GaN – 1100 нм, низкотемпературный слой $Al_{0,14}Ga_{0,86}N$ – 40 нм), выращенных на сапфировой подложке. Транзисторы имели ширину канала 200, 250, 300 и 400 мкм. Длина затвора варьировалась от 150 до 350 нм. Затвор располагался на расстоянии 1 и 2 мкм от истока и стока, соответственно. При комнатной температуре плотность носителей составляла примерно 10^{13} см^{-2} , а подвижность – $1250 \text{ см}^2/\text{В.с}$.

Транзисторы облучались при комнатной температуре гамма-квантами источника Co^{60} с интенсивностью 100 рад/с до порядка 10^8 рад. Разогрев образцов во время облучения не превышал 40°C . Для контроля параметров транзисторов через несколько часов после набора очередной дозы при комнатной температуре проводились измерения вольт-амперных характеристик приборов.

Таблица 1

Величина пороговой энергии E_d в зависимости от постоянной решетки полупроводника a_0

Полупроводник	GaAs(Ge)	Si	C-SiC	Алмаз	GaN	H-SiC
$a_0, \text{Å}$	5,65	5,431	4,36	3,57	3,15	3,08
$E_d, \text{эВ}$	9	12,8	37	80	145	153

Таблица 2

Значения эффективности ионизации для различных полупроводниковых материалов

Полупроводник	SiO ₂	H-SiC	GaN	Si	GaAs	Ge
$g_0, \text{пар}/(\text{см}^3 \text{рад})$	$5,9 \cdot 10^{12}$	$2,3 \cdot 10^{13}$	$4,0 \cdot 10^{13}$	$4,3 \cdot 10^{13}$	$7,1 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^{14}$

На рис. 1 приведены дозовые зависимости относительного изменения сопротивления канала транзистора и его крутизны.

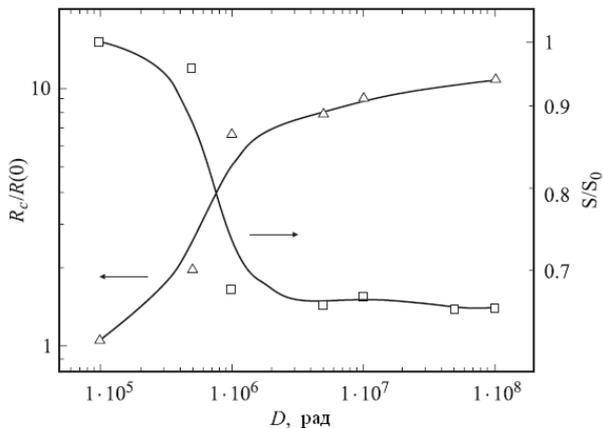


Рис. 1. Дозовые зависимости сопротивления канала и крутизны AlGaIn/GaN ГСПТ (ширина канала -200 мкм, длина затвора – 0,25 мкм) [4]

Анализ приведенных на рисунке данных показывает, что заметные изменения характеристик транзисторов наблюдаются для доз, превышающих 10^5 рад.

При этом прибор сохраняет свои усилительные свойства до уровней 10^8 рад. Авторы относят изменение характеристик к деградации омических контактных сопротивлений истока и стока приборов.

Облучение электронами. Влияние облучения электронов с энергией 0,45 МэВ при низких температурах, характерных для факторов космического пространства, на характеристики ГСПТ на основе структур AlGaIn/GaN (барьерный слой $Al_{0,27}Ga_{0,73}N$ – 25 нм, буферный слой GaN – 2000 нм), выращенных на SiC подложке, исследовалось в работах [5,6]. Также был проведен сравнительный анализ результатов при облучении в нормальных условиях для комнатной температуры [7].

На рис. 2 в приведены выходные характеристики исследуемых ГСПТ до и после облучения электронами с энергией около 0,5 МэВ при комнатной и азотной температурах (~ 85 К). Вольтамперные характеристики (ВАХ) приборов после отжига при комнатной температуре в течение 24 дней представлены на рис. 3.

При низкотемпературном облучении и измерении ВАХ приборов наблюдалось увеличение тока стока приборов и, соответственно, плотность n_s ДЭГ.

Подобное непрогнозируемое радиационное поведение характеристик полевой транзисторной структуры позволило авторам предложить гипотетическую модель, позволяющую объяснить эффект роста тока стока в канале прибора и концентрации носителей заряда в области ДЭГ.

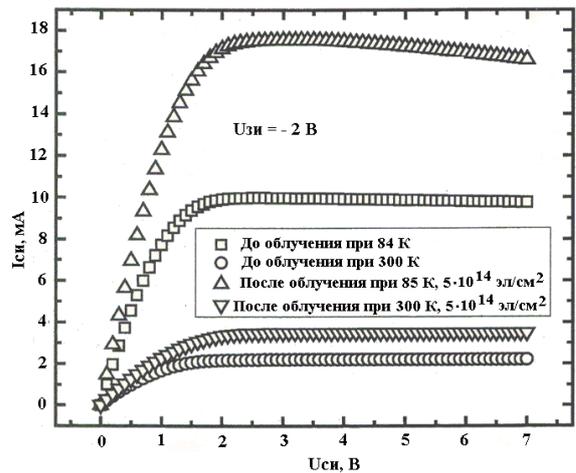


Рис. 2. Выходные характеристики AlGaIn/GaN ГСПТ до и после облучения электронами при 85 К и 300 К с энергией 0,5 МэВ [7]

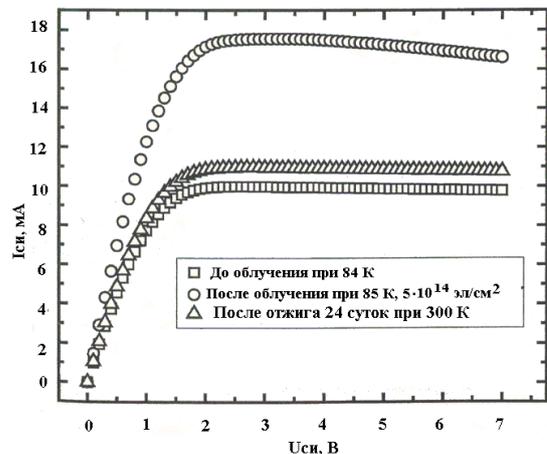


Рис. 3. Выходные характеристики AlGaIn/GaN ГСПТ до и после облучения электронами при 85 К с энергией 0,5 МэВ и после отжига при 300 К в течение 24 суток [7]

На рис. 4 приведена энергетическая диаграмма, с помощью которой можно объяснить этот эффект.

В результате низкотемпературного облучения в барьерном слое AlGaIn транзистора наблюдается накопление положительного заряда, который при низких температурах способствует увеличению скачка энергетических зон на границе гетероперехода AlGaIn/GaN и росту плотности носителей в области ДЭГ. С ростом температуры наблюдается миграция положительного заряда и эффект увеличения тока стока за счет этого процесса уменьшается.

При этом при повышенных температурах на границе гетероперехода формируется скопление донорных структурных дефектов, что приводит к деградации подвижности в области ДЭГ.

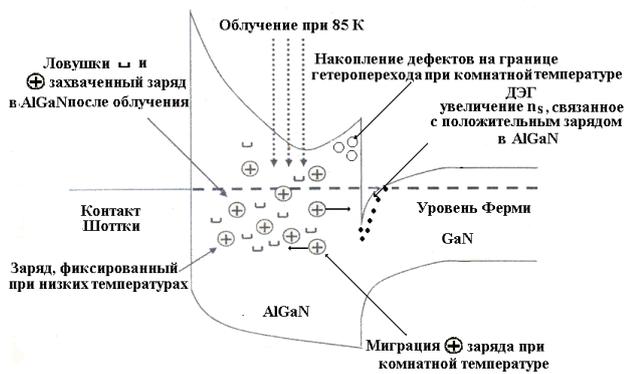


Рис. 4. Процессы накопления заряда в подзатворной области AlGaIn/GaN ГСПТ [7]

Облучение протонами. Влияние структурных дефектов на характеристики AlGaIn/GaN ГСПТ достаточно подробно исследовалось при облучении этих приборов протонами с энергией 1,8 МэВ [8-10]. В отдельных образцах под каналным слоем формировался тонкий (0,5 нм) слой AlN.

На рис. 5 и 6 представлены зависимости изменения выходной и входной ВАХ приборов без буферного слоя AlN от флюенса протонов с энергией 1,8 МэВ.

Анализ приведенных зависимостей радиационного изменения характеристик ГСПТ при облучении протонами с энергией 1,8 МэВ показывает, что до уровней флюенсов 10^{14} протон/см² не наблюдается существенной деградации параметров приборов, что указывает на высокую радиационную стойкость ГСПТ на GaN. Деградация характеристик приборов при больших значениях флюенса связана с введением структурных дефектов при облучении и деградации плотности носителей в ДЭГ и подвижности электронов в канале транзистора.

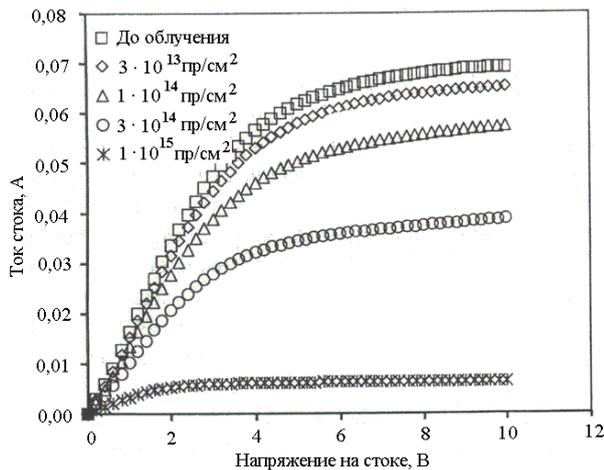


Рис. 5. Деградация выходной ВАХ AlGaIn/GaN ГСПТ при облучении протонами с энергией 1,8 МэВ [9]

Сравнительный анализ данных по деградации характеристик ГСПТ с буферным слоем AlN (AlGaIn/AlN/GaN) и без него (AlGaIn/GaN) был проведен в работе [9]. При этом было установлено, что введение

дополнительного слоя AlN приводит не только к росту подвижности носителей в канале транзистора, но и к снижению чувствительности к воздействию протонного облучения.

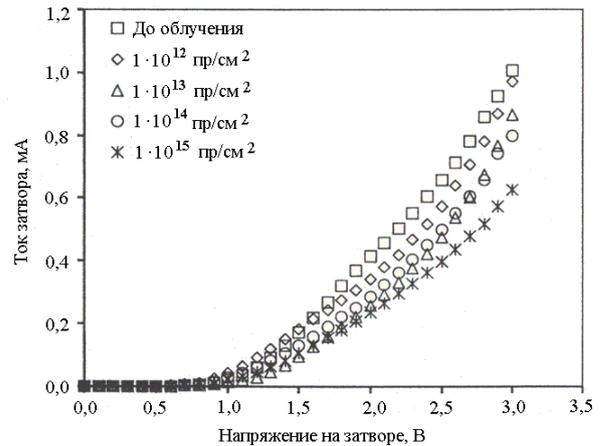


Рис. 6. Изменение входного тока затвора Шоттки AlGaIn/GaN ГСПТ при облучении [9]

Облучение быстрыми нейтронами. Исследования влияния быстрых реакторных нейтронов на статические и высокочастотные характеристики ГСПТ на сапфировой подложке были проведены для структур, сформированных с использованием ионно-лучевого травления для получения глубины «мезы» изоляции порядка 1000 Å, напыления в вакууме системы металлизации Ti/Al/Ni/Au (25/150/40/150 нм) с последующей термообработкой для формирования омических контактов к AlGaIn/GaN (быстрый термический отжиг при температуре 820 °С в течении 20 с). Значения сопротивления омического контакта составляли порядка 0,4-0,5 Ом·мм.

Затвор Шоттки формировался либо с помощью фотолитографии (длина затвора 0,5 мкм), либо электронно-лучевой литографией (длина затвора 0,17-0,25 мкм) с последующей операцией напыления в вакууме системы металлизации Ni/Au (40/300 нм); пассивация осуществлялась нанесением диэлектрика Si₃N₄ с последующим плазмохимическим травлением; формирование электрических межсоединений обеспечивалось методом «взрывной» фотолитографии с напылением в вакууме Ti/Au (80/500 нм); механическая обработка использовалась для утонения структуры до 150 мкм. Кристаллы транзисторов монтировались на теплоотвод.

Выходные ВАХ исследуемых транзисторных структур измерялись зондовым методом непосредственно на рабочих пластинах, до и после пассивации поверхности слоем Si₃N₄. Было установлено, что пассивация приводит к улучшению характеристик.

Исследование СВЧ характеристик транзисторных структур проводилось с помощью анализа данных, полученных при измерении S-параметров структур транзисторов с помощью прецизионного векторного

анализатора E8361A фирмы Agilent Technologies в диапазоне частот 10 МГц...67 ГГц. Типовые значения граничных и максимальных частот, определенных из частотных зависимостей S-параметров, для транзистора с длиной затвора 0,2 мкм и $W_3=2 \times 50$ мкм: $F_t=25$ ГГц, $F_{max}=60$ ГГц. При этом величина выходной мощности транзисторов на частоте 8 ГГц достигала 3 Вт/мм.

Облучение проводилось на импульсном реакторе типа «БАРС», характеристики измерялись до и после облучения флюенсом нейтронов $2 \cdot 10^{14}$ нейтрон/см².

Выходные ВАХ ГСПТ до и после воздействия флюенса быстрых нейтронов $2 \cdot 10^{14}$ нейтрон/см² приведены на рис. 7.

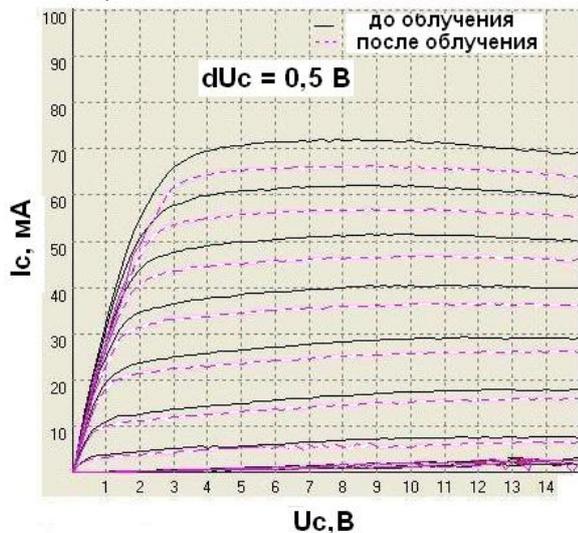


Рис. 7. Выходные ВАХ ГСПТ до и после воздействия флюенса быстрых нейтронов $2 \cdot 10^{14}$ нейтрон/см² [6]

Анализ приведенных данных показывает, что до уровней воздействия порядка 10^{14} нейтрон/см² не наблюдается существенной (более 10% от исходного значения) деградации статических характеристик ГСПТ. Подобный эффект наблюдался и при облучении ГСПТ нейтронами при комнатной температуре [6].

Анализ частотных зависимостей коэффициента передачи S_{21} и максимально возможного коэффициента усиления MAG до и после облучения нейтронами показывает, что до уровней флюенса быстрых нейтронов $2 \cdot 10^{14}$ нейтрон/см² также не наблюдается существенно изменения усилительных характеристик ГСПТ (F_1 и F_{max} уменьшаются на 20-25 %).

Облучение ионами. Исследование влияния облучения ионами С, О и Fe с энергиями 2 и 68 МэВ на структуру ГСПТ на GaN было проведено в работе [11]. Для сравнения проводилось облучение протонами этих же структур.

Типовая структура ГСПТ была сформирована на SiC подложке. Дополнительно на той же подложке был сформирован 5 мкм контрольный слой GaN, легированный кремнием до уровня $5 \cdot 10^{16}$ см⁻³ для изучения

влияния структурных дефектов при облучении протонами и ионами.

На рис. 8-10 приведены зависимости изменения ВАХ приборов при облучении протонами и высокоэнергетичными ионами.

Анализ приведенных данных показывает, что значения флюенсов облучения, при которых еще не наблюдается существенной деградации характеристик ГСПТ, составляет: для протонов – более 10^{13} см⁻²; для ионов углерода и кислорода - 10^{11} см⁻²; для ионов железа - 10^{10} см⁻².

Для контрольного слоя GaN при этом не наблюдается существенных изменений подвижности для протонов и ионов С и О до уровней 10^{12} см⁻². При этом для флюенса ионов железа 10^{12} см⁻² деградация подвижности была уже существенной.

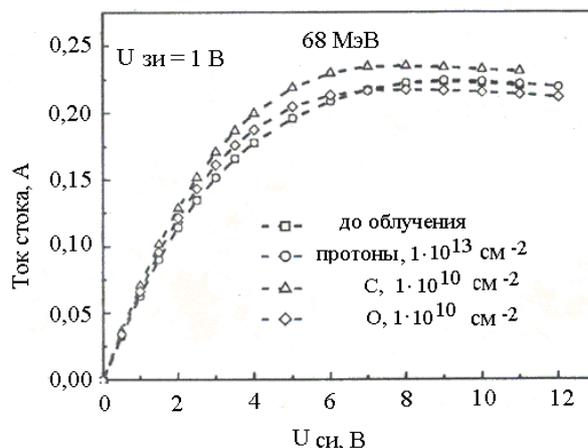


Рис. 8. Радиационное изменение ВАХ ГСПТ при облучении протонами и ионами с энергией 68 МэВ [11]

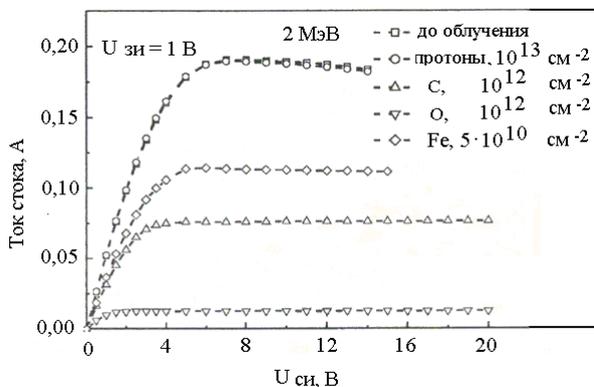


Рис. 9. Деградация ВАХ ГСПТ при облучении протонами и ионами с энергией 2 МэВ [11]

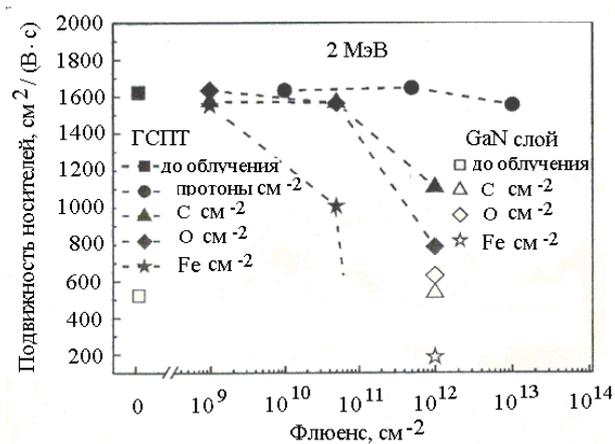


Рис. 10. Радиационное изменение подвижности носителей заряда в канале ГСПТ и контрольном слое GaN при облучении протонами и ионами с энергией 2 МэВ [11]

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного анализа экспериментальных и теоретических исследования радиационной стойкости перспективного для СВЧ полупроводниковой электроники материала – нитрида галлия, а также анализа исследований базовых приборных структур ГСПТ на его основе можно сделать следующие выводы.

Дозовые эффекты в ГСПТ на GaN начинают проявляться при достаточно высоких (порядка 10^6 рад) уровнях при облучении гамма-квантами.

Структурные дефекты при воздействии флюенсами протонов и быстрых реакторных нейтронов не оказывают существенного влияния на характеристики GaN транзисторных наногетероструктур до уровней порядка 10^{14} см⁻².

В случае облучения высокоэнергетичными ионами деградация характеристик GaN транзисторных структур наблюдается при уровнях 10^{10} - 10^{11} см⁻² и существенно зависит от энергии и атомного номера ионов.

Прогнозные теоретические оценки стойкости к воздействию импульсного ИИ дают более высокие значения критических уровней воздействия по сравнению с кремнием, арсенидом галлия и германием. По этому показателю GaN близок к карбиду кремния. Следует отметить, что эти результаты еще нуждаются в экспериментальном подтверждении.

Анализ приведенных данных показывает, что GaN является достаточно перспективным полупроводниковым материалом с точки зрения создания радиационно-стойкой СВЧ элементной базы для использования в военной и космической технике.

Работа проведена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» по проекту «Проведение поисковых исследований по направлению «Микроэлектроника» в рамках мероприятия 1.2.1 Программы ГК П670».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Rudiger Quay. Gallium Nitride Electronics. Springer Series in Materials Science. 1996. 498 p.
- [2] Данилин В., Жукова Т., Кузнецов Ю., Тараканов С., Уваров Н. Транзистор на GaN пока самый крепкий орешек // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2005. №4. С. 20-29.
- [3] Агаханян Т.М., Аствацатурьян Е.Р., Скоробогатов П.К. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах / Под ред. Т.М. Агаханяна. 1989. М.: Энергоатомиздат. 256 с.
- [4] Куракин А.М. Влияние гамма – радиации на характеристические сопротивления нитридгаллиевых гетероструктурных транзисторов с высокой подвижностью электронов // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 18. С. 3-5.
- [5] McClory J.W., Petrosky J.C., Sattler J.M. Jarzen T.A. An Analysis of the Effects of Low-Energy Electron Irradiation of AlGaIn/GaN HFETs // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2007. Vol. 54. №6. P. 1946-1952.
- [6] McClory J.W., Petrosky J.C. Temperature Dependent Electrical Characteristics An Analysis of Neutron Irradiated AlGaIn/GaN HFETs // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2007. Vol. 54. №6. P. 1969-1974.
- [7] Moran J.T., McClory J.W., Petrosky J.C., Farlow G.C. The effects of Temperature and Electron Radiation on the Electrical Properties of AlGaIn/GaN HFETs // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2009. Vol. 56. №6. P. 3223-3228.
- [8] White R.D., Bataiev M., Goss S.H. et al. Electrical, Spectral, and Chemical Properties of 1.8 MeV Proton Irradiated AlGaIn/GaN HEMT Structures as a Function of Proton Fluence // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2003. Vol. 50. №6. P.1934-1941.
- [9] Xinwen Hu, Karmarkar A.P., Bongim Jun et al. Proton - Irradiation Effects on AlGaIn/ AlN/GaN High Electron – Mobility Transistors // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2003. Vol. 50. №6. P. 1791-1796.
- [10] Karmarkar A.P., Bongim Jun, Fleetwood D.M. et al. Proton Irradiation Effects on GaN – Based High Electron – Mobility Transistors With Si – Doped Al_xGa_{1-x}N Thick GaN Cap Layers // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2004. Vol. 51. №6. P. 3801-3806.
- [11] Sonia G., Brunner F., Denker A. et al. Proton and Heavy Ion Irradiation Effects on AlGaIn/GaN HFET Devices // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2006. Vol. 53. №6. P. 3661-3666.