

Устойчивость нитридных СВЧ монолитных интегральных схем преобразователя сигнала к облучению потоком нейтронов и гамма-излучению

С.С. Арутюнян^{1,2}, К.А. Кагирина^{1,3}, Д.В. Лаврухин¹,
С.А. Гамкрелидзе¹, Н.Е. Иванова^{1,3}

¹Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (г. Москва)

²Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук (г. Черноголовка)

³Московский технологический университет

Stability of Nitride Microwave Signal Converter ICs Irradiated by Neutrons and Gamma Radiation

S.S. Arutyunyan^{1,2}, K.A. Kagirina^{1,3}, D.V. Lavrukhin¹,
S.A. Gamkrelidze¹, N.E. Ivanova^{1,3}

¹Institute of Ultrahigh Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences, Moscow

²Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials of Russian Academy of Sciences, Chernogolovka

³Moscow Technological University

Исследована радиационная стойкость преобразователей сигнала миллиметрового диапазона, изготовленных на основе нитридных транзисторов с высокой подвижностью электронов (AlGaN/GaN HEMT), к облучению потоком нейтронов и гамма-излучению. В качестве параметров для оценки стойкости выбраны следующие: диапазон выходного ВЧ-сигнала, коэффициент преобразования и суммарный ток потребления. Получена зависимость тока потребления от поглощенной дозы и температуры образца при гамма-облучении. Показано, что влияние потока нейтронов на характеристики незначительно, тогда как гамма-излучение приводит к существенному повышению тока потребления за счет образования донорных вакансий азота, а также отжига ростовых акцепторных дефектов и упорядочения дефектов. Через шесть месяцев параметры приборов имели исходные значения, что свидетельствует о восстановлении первоначального состояния кристаллической структуры подложки.

Ключевые слова: монолитные интегральные схемы; AlGaN/GaN; преобразователь сигнала; радиационная стойкость; гамма-облучение; поток нейтронов.

The radiation stability of the AlGaN/GaN millimeter-wave signal converters, irradiated by neutron and gamma radiation, has been investigated. As the parameters for estimation of the stability the following characteristics have been

chosen: the output microwave signal range, the conversion factor and total consumed current. The dependence of the consumed current on the absorbed dose and the sample temperature under gamma irradiation has been obtained. The effect of the neutron flux upon the characteristics has been found insignificant, though the gamma irradiation has resulted in a considerable increase of consumed current due to formation of the nitrogen donor vacancies, annealing of growth acceptor defects, strain relaxation and defects ordering. After 6 months the measurements have shown that the characteristics of the devices have recovered to initial values indicating the restoration of the original state of the substrate crystal structure.

Keywords: AlGaN/GaN HEMT; AlGaN/GaN signal converter; radiation resistance; gamma irradiation; neutron irradiation.

Введение. Монолитные интегральные схемы (МИС) на основе AlGaN/GaN являются перспективной электронной компонентной базой для применения в таких современных системах специального назначения, как радиолокационные, широкополосной космической связи и мониторинга, радиоэлектронной безопасности [1]. К используемой в данных системах компонентной базе предъявляются высокие требования по радиационной стойкости к воздействию внешних факторов, влияющих на их работоспособность и надежность.

Цель настоящей работы – исследование радиационной стойкости МИС преобразователя сигнала (ПС) на основе AlGaN/GaN к воздействию гамма-излучения и облучению потоком нейтронов на частоты выходного сигнала $f_{п.ч.}$, суммарный ток потребления $I_{п}$ и коэффициент преобразования $K_{пр}$ изготовленных МИС ПС. Критерием стойкости является сохранение значений рабочих характеристик приборов в допустимых пределах после воздействия внешнего фактора.

Объекты исследования. Для проведения исследований в ИСВЧПЭ РАН (г. Москва) разработаны и изготовлены МИС ПС для диапазона частот 57–64 ГГц миллиметровых длин волн по технологии AlGaN/GaN HEMT. Размер кристаллов ПС составил $1,9 \times 2,26$ мм. Для изготовления приборов применялась полупроводниковая нитридная гетероструктура (рис. 1), выращенная методом металлорганической газофазной эпитаксии (МОСVD) на Al_2O_3 , с подвижностью носителей $1300 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и их концентрацией порядка 10^{13} см^{-2} при комнатной температуре. Приборная мезаизоляция формировалась травлением подложки в индуктивно связанной плазме со смесью газов $BCl_3 + Ar$. В качестве омических контактов использовался n -GaN, выращенный на вытравленных в поверхности подложки окнах методом молекулярно-лучевой эпитаксии, и на него электронно-лучевым испарением осаждалась контактная композиция металлов Cr/Pt/Au. Для затворов применялась двухслойная металлизация Ni/Au.

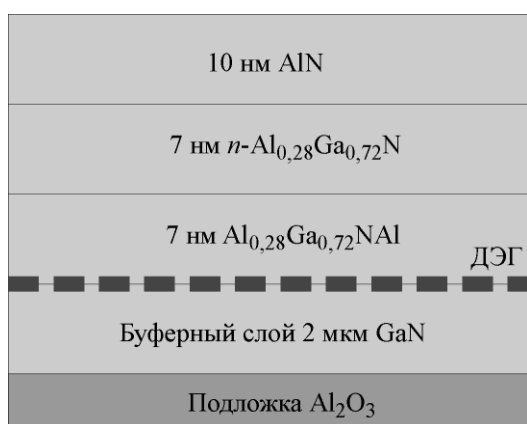


Рис.1. Послойная структура нитридной подложки

качестве омических контактов использовался n -GaN, выращенный на вытравленных в поверхности подложки окнах методом молекулярно-лучевой эпитаксии, и на него электронно-лучевым испарением осаждалась контактная композиция металлов Cr/Pt/Au. Для затворов применялась двухслойная металлизация Ni/Au.

После изготовления МИС проведены СВ-исследования электрофизических характеристик гетероструктуры, которые показали наличие заряженных дислокационных линий в барьерном слое с высокой концентрацией электронов. Это говорит о пластической ре-

лаксации кристаллической решетки в слоях AlGaN и существенном уменьшении их внутреннего упругого напряжения.

Одной из особенностей конструкции ПС является заземляющий слой металлизации толщиной 2,5 мкм, осажденный по слою специально разработанного фотолака на всей поверхности кристалла, кроме контактных площадок питания, управления, входа и выхода сигналов (рис.2). Изготовленные ПС состоят из генератора, управляемого напряжением (ГУН), смесителя (С) и усилителя промежуточной частоты (УПЧ). До воздействия указанных факторов рабочие характеристики ПС удовлетворяли следующим условиям: диапазон выходного ВЧ-сигнала до 2 ГГц, преобразование сигнала без потерь (коэффициент преобразования $K_{пр} > 0$ дБ), суммарный ток потребления не более 100 мА.

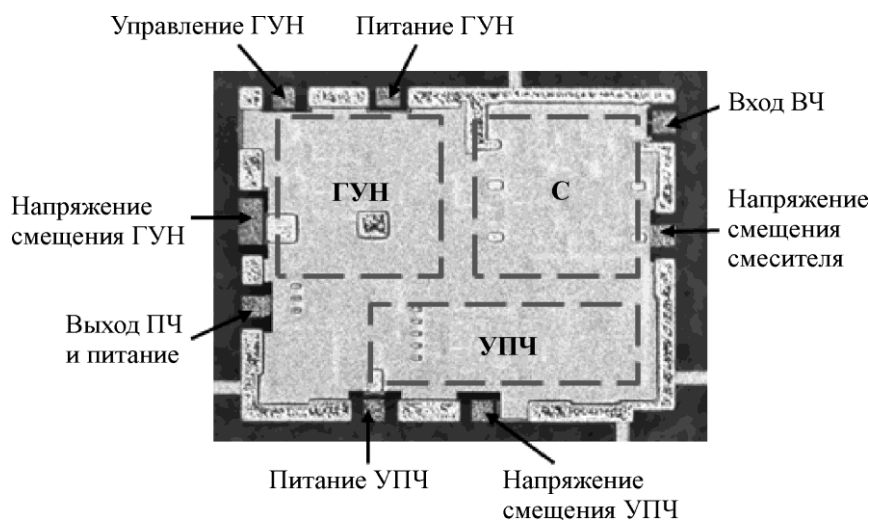


Рис.2. Кристалл МИС ПС

Исследования проводились на двух сериях образцов ПС, по три образца в каждой.

Влияние ионизирующих излучений на зонную структуру активной области AlGaN/GaN и характеристики МИС. Как показал анализ литературных источников, воздействие ионизирующих излучений (ИИ) на гетероструктуры AlGaN/GaN может приводить как к падению подвижности и концентрации носителей в двумерном электронном газе (2DEG), так и к их росту [2]. Это проявляется в изменении тока насыщения, порогового напряжения $U_{пор}$, токов утечки и других параметров активных элементов МИС [2–6], что ведет к изменению напряжения и тока питания, частотного диапазона выходного сигнала и других статических и динамических характеристик МИС. Образование всех видов дефектов независимо от их вида происходит с большей вероятностью при взаимодействии ИИ с уже существующими в подложке дефектами – примесями, дислокациями и т.д. [7].

Возникающие изменения электрофизических параметров нитридных гетероструктур при воздействии гамма-излучения объясняются в большей степени образованием одномерных дефектов кристаллической решетки как с донорными энергетическими уровнями (вакансиями азота V_N и межузельными атомами галлия Ga_i), так и с акцепторными (межузельными атомами азота N_i и вакансиями галлия V_{Ga}) [8], а также антиструктурных дефектов [9]. Основываясь на расчетных данных, эти дефекты можно расположить по возрастанию энергии их образования: $V_N^+ \approx V_{Ga}^-$ (2,5 эВ) \rightarrow $\rightarrow N_i^-$ (5,5 эВ) $\rightarrow Ga_N \approx N_{Ga}$ (8 эВ) $\rightarrow Ga_i^{++}$ (10 эВ). Малые энергии образования говорят

о том, что наибольшими по концентрации в равновесном состоянии дефектами будут вакансии азота и галлия [9].

Пороговое напряжение $U_{пор}$ и ток потребления $I_{п}$ могут изменяться в очень широких пределах в зависимости от дозы гамма-облучения [5]. Гамма-облучение с низкими дозами приводит к небольшому (7–8 %) увеличению тока исток-сток за счет повышения подвижности носителей, которое происходит вследствие релаксации внутренних упругих напряжений кристаллической решетки гетероструктуры и упорядочения встроенных дефектов [2, 10]. В противоположность этому гамма-облучение с высокими дозами приводит к существенному (60 %) падению тока исток-сток из-за падения концентрации носителей заряда, обусловленного образованием акцепторных энергетических уровней. При таком облучении увеличение продолжительности экспозиции приводит к дальнейшему падению тока [5]. В работе [11] показан рост тока сток-исток при гамма-облучении с дозами порядка 10^5 рад, в то время как увеличение дозы выше 10^6 рад привело к падению тока.

Дефектообразование при облучении нейтронами имеет отличия от дефектообразования при гамма-облучении [12]. При облучении быстрыми нейтронами в кристаллической структуре нитридной подложки дополнительно образуются кластерные дефекты – области разупорядочения. Их энергетические уровни располагаются между уровнями Ga_i^{++} и N_i^- , за счет чего происходит пиннинг уровня Ферми на уровне 2,39 эВ относительно потолка валентной зоны. Под действием нейтронов с высокой энергией в полупроводниковой подложке также могут происходить реакции превращения $Ga(n, \gamma) \rightarrow Ge$, причем Ge создает мелкий донорный уровень, и $N(n, \gamma) \rightarrow O$, что расширяет спектр возможных дефектов [9].

Кроме того, наблюдается отличие в изменении свойств GaN и AlGaN при облучении нейтронами. Скорость внедрения нейтронным облучением компенсирующих дефектов при определенных условиях облучения у AlGaN в 100 раз превышает скорость внедрения у GaN [13], а отжиг создаваемых в AlGaN дефектов происходит при существенно более высоких температурах [14].

Влияние гамма-излучения на МИС ПС на основе AlGaN/GaN. Первая серия образцов подвергалась гамма-облучению со средней энергией гамма-квантов 0,5 МэВ в течение 30 мин. Общая поглощенная доза составила 56 крад. Облучение происходило при температуре образцов 235, 313 и 368 К. Измерения $f_{п.ч}$, $I_{п}$ и $K_{пр}$ проводились до облучения и через два дня после облучения. Температура измерения до и после облучения составляла 25 °С в одной и той же рабочей точке. Результаты измерений для первой серии образцов приведены в табл.1. Значения токов потребления существенно выросли после облучения, что привело к соответствующему изменению значения коэффициента преобразования.

Таблица 1

Результаты воздействия гамма-облучения на МИС ПС

Номер образца	Температура образца, К	$f_{п.ч}$, ГГц			$I_{п}$, мА			$K_{пр}$, дБ		
		До	После	$\Delta f_{п.ч}$, %	До	После	$\Delta I_{п}$, %	До	После	$\Delta K_{пр}$, %
1	235	0,983	0,983	-11,0	84	112,5	+34	6,85	10,94	+60
2	313	1,043	0,923	-12,0	100	142,1	+42	7,65	14,39	+88
3	368	0,968	1,073	+0,1	99	153,2	+55	8,57	16,00	+87

Измерения характеристик ПС через шесть месяцев после облучения показали, что все параметры вернулись к исходным значениям.

Влияние облучения потоком нейтронов на МИС ПС на основе AlGaIn/GaN. Вторая серия образцов подвергалась импульсному облучению потоком нейтронов со средней энергией 1,4 МэВ длительностью 60 мкс, флюенсом $2,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и сопутствующей дозой гамма-облучения 6,9 крад. Поглощенная доза облучения нейтронами составила 56 крад. Параметры $f_{п.ч}$, $I_{п}$ и $K_{пр}$ измерены перед облучением и через два дня после него при комнатной температуре в одной и той же рабочей точке. Результаты измерений приведены в табл.2.

Таблица 2

Результаты воздействия нейтронного облучения на МИС ПС

Номер образца	$f_{п.ч}$, ГГц			$I_{п}$, мА			$K_{пр}$, дБ		
	До	После	$\Delta f_{п.ч}$, %	До	После	$\Delta I_{п}$, %	До	После	$\Delta K_{пр}$, %
1	1,043	1,013	-3	90	92	+2	10,4	12,6	+21
2	0,873	0,770	-12	100	98	-2	8,3	9,8	+18
3	1,013	1,133	+12	89	79	-11	3,1	3,3	+6

Из приведенных в таблице данных можно сделать вывод о том, что облучение нейтронами с указанными характеристиками не приводит к выходу какого-либо из параметров за пределы допустимых значений.

Обсуждение результатов. Результаты измерений параметров образцов после гамма-облучения и облучения потоком нейтронов показали изменение частот выходного сигнала в пределах $\pm 12\%$, при этом значения данного показателя не вышли за пределы 2 ГГц. Несущественными оказались также изменения тока потребления (не превысили 100 мА) и коэффициента преобразования после облучения образцов нейтронами. Таким образом, изготовленные МИС ПС можно считать стойкими к нейтронному излучению.

Наиболее сильные изменения в характеристиках ПС произошли после гамма-облучения. Токи потребления возросли на 34–55 %, а коэффициент преобразования соответственно увеличился на 60–88 %. Такие сильные изменения параметров говорят в целом о неустойчивости изготовленных МИС ПС к гамма-облучению с указанными параметрами. Результаты измерений параметров после гамма-облучения требуют подробного анализа.

Увеличение тока потребления (см. табл.1) говорит о росте концентрации или подвижности носителей тока. Важно учесть, что чем выше температура образцов при облучении, тем сильнее возрастает ток потребления. Такие изменения объясняются образованием в подзатворной области транзисторов, входящих в конструкцию ПС, дефектов кристаллической решетки с донорными энергетическими уровнями [15], а также отжигом ростовых акцепторных дефектов и упорядочением дефектов, что наблюдается при гамма-облучении дозами до 10^5 рад [11]. Все эти процессы имеют более высокую интенсивность при повышении температуры, что согласуется с измерениями. Литературные данные подтверждают, что гамма-облучение гетероструктур AlGaIn/GaN приводит к образованию одномерных дефектов, из которых донорными являются вакансии азота и собственные межузельные атомы галлия. Кроме того, релаксация внутренних напряжений при гамма-облучении вносит лишь небольшой вклад (7–8%) в общее изменение параметров [7, 11], так как в процессе изготовления МИС при проведении высокотемпературных процессов формирования омических контактов релаксация кристаллической решетки в слоях уже произошла. Таким образом, гамма-облучение ПС на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN приводит к преобладающему образованию вакансий азота и межузельных атомов галлия, что повышает концентрацию

носителей в двумерном электронном газе. Именно эти дефекты имеют наибольшее влияние на изменение характеристик приборов.

Измерения через два дня после облучения показали, что токи потребления образцов, облученных при температурах 313 и 368 К, понизились на 8 и 11 % соответственно. Это свидетельствует об отжиге внесенных гамма-излучением дефектов, который происходит в GaN даже при комнатной температуре [14].

Измерения через шесть месяцев после облучения показали, что все параметры имеют те же значения, что и до облучения. Это говорит о возвращении кристаллической структуры подложки к первоначальному состоянию за счет отжига и разупорядочения дефектов, которые в нитридных структурах подвижны при комнатных температурах [8, 9].

Заключение. Импульсное нейтронное облучение со средней энергией нейтронов 1,4 МэВ длительностью 60 мкс, флюенсом $2,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, поглощенная доза ионизирующего излучения которого составила 56 крад с сопутствующей дозой гамма-излучения 6,9 крад, не привело к существенным изменениям диапазона выходного ВЧ-сигнала, коэффициента преобразования и суммарного тока потребления.

Гамма-излучение со средней энергией гамма-квантов 0,5 МэВ и общей поглощенной дозой 56 крад привело к увеличению тока питания МИС ПС на 34–55 % за счет повышения концентрации носителей ввиду образования вакансий азота, межузельных атомов галлия, а также отжига ростовых акцепторных дефектов, релаксации встроенных напряжений и упорядочением дефектов кристаллической структуры подложки. Через шесть месяцев после гамма-облучения все характеристики МИС ПС имели прежние значения.

Изготовленные ПС являются стойкими к воздействию нейтронного облучения, но гамма-облучение приводит к выходу величины тока потребления за пределы допустимых значений и соответствующему увеличению коэффициента передачи. Повышения стабильности работы МИС ПС можно достигнуть, подобрав режим работы его составных частей таким образом, чтобы изменение электрофизических параметров подложки приводило к меньшим изменениям тока потребления, например, за счет смещения рабочей точки активных элементов в область с меньшей крутизной.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 14.607.21.0011, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60714X0011).

Литература

1. Нитридные приборы миллиметрового диапазона / П. Мальцев, Ю. Федоров, Р. Галиев и др. // Наноиндустрия. – 2014. – №3(49). – С. 40–51.
2. Effect of low dose c-irradiation on DC performance of circular AlGaIn/GaN high electron mobility transistors / Ya-Hsi Hwang, Yueh-Ling Hsieh, Lei Lei et al. // J. of Vacuum Science & Technology. – 2014. – В 32. – P. 031203-2–031203-5.
3. Impact of low gamma radiation dose on electrical trap related effects in AlGaIn/GaN HEMTs / F. Berthlet et al. // Electronics Letters. – 2012. – Vol. 48. – P. 1078 – 1079.
4. Radiation-induced electron traps in Al_{0.14}Ga_{0.86}N by 1 MeV electron radiation / M.R. Hogsed, Y.K. Yeo, Mo Ahoujja et al. // Appl. Phys. Lett. – 2005. – Vol. 86 – Iss. 26 – P. 123–125.
5. Gamma irradiation impact on electronic carrier transport in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors / C. Schwarz, A. Yadav, M. Shatkhin et al. // Appl. Phys. Lett. – 2013. – Vol. 102 – 062102. – P. 1–3.
6. Stability of submicron AlGaIn/GaN HEMT devices irradiated by gamma rays / S. Jha, Emil V. Jelenković, M.M. Pejović et al. // Microelectronic Engineering. – 2009. – Iss. 86 – P. 37–40.
7. Process dependence of proton-induced degradation in GaN HEMTs / T. Roy, En Xia Zhang, S. Yevgenig et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2010. – №6 (57). – P. 3060–3065.

8. Radiation effects in GaN materials and devices / *A.Y. Polyakov, S.J. Pearton, P. Frenzer et al.* // J. of Materials Chemistry C. – 2013. – Vol. 1. – P. 877–887.

9. **Брудный В.Н., Кособуцкий А.В., Колин Н.Г., Корулин А.В.** Изменение структурных параметров решетки и электронных спектров пленок *n*-GaN на сапфире при облучении реакторными нейтронами // ФТП. – 2011. – Т. 45. – Вып. 4 – С. 461–467.

10. Mechanism of mobility increase of the two-dimensional electron gas in AlGaN/GaN heterostructures under small dose gamma irradiation / *A.M. Kurakin, S.A. Vitusevich, S.V. Danylyuk et al.* // J. of Appl. Phys. – 2008. – 103. – P. 083707-1 – 083707-5

11. Effects of γ -irradiation on AlGaN/GaN-based HEMTs / *S.A. Vitusevich, N. Klein, A.E. Belyaev et al.* // Physica Status Solidi (a). – 2003. – Vol. 195. – N. 1. – P. 101–105.

12. **Gossick B. R.** Disordered regions in semiconductors bombarded by fast neutrons // J. of Appl. Phys. – 1959. – Vol. 30. – N. 8. – P. 1214–1218.

13. Effects of proton implantation on electrical and recombination properties of *n*-GaN / *A.Y. Polyakov, A.S. Usikob, B. Theys et al.* // Solid-State Electronics. – 2000. – Vol. 44. – P. 1971–1983.

14. The effects of temperature and electron radiation on the electrical properties of AlGaN/GaN HFETs / *J.T. Moran, J.W. McClory, J.C. Petrosky et al.* // IEEE Trans. on Nuclear Science. – 2009. – N. 6 (56). – P. 3223–3228.

15. **Громов Д.В., Матвеев Ю.А., Назарова Г.Н.** Исследование влияния ионизирующих излучений на характеристики гетероструктурных полевых транзисторов на нитриде галлия // Сб. тр. V Всероссийской науч.-техн. конф. МЭС-2012 «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» (8–12 окт. 2012 г., Москва). – М.: ИППМ РАН, 2012. – С. 598–603.

Статья поступила
25 апреля 2016 г.

Арутюнян Спартак Савелович – инженер-исследователь Института сверхвысоко-частотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (г. Москва) (ИСВЧПЭ РАН), аспирант Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук (г. Черноголовка) (ИПТМ РАН). *Область научных интересов:* технологии формирования омических контактов к нитридным гетероструктурам, плазмохимия в технологиях микроэлектроники, нитридные СВЧ-устройства. **E-mail: spartakmain@gmail.com**

Казирина Ксения Алексеевна – инженер-исследователь ИСВЧПЭ РАН (г. Москва), аспирант Московского технологического университета. *Область научных интересов:* исследование радиационной стойкости монолитных интегральных схем на основе нитрида галлия.

Лаврухин Денис Владимирович – научный сотрудник ИСВЧПЭ РАН (г. Москва). *Область научных интересов:* лазерная физика, лазерная спектроскопия, физика наноструктур, взаимодействие излучения с веществом, генерация и детектирование терагерцового излучения.

Гамкредидзе Сергей Анатольевич – доктор технических наук, профессор, директор института ИСВЧПЭ РАН (г. Москва). *Область научных интересов:* нано- и микросистемная техника, проектирование МИС и исследование их характеристик, проектирование приемо-передающих систем с высокой степенью интеграции, антенны и фазированные решетки, разработки в области СВЧ-, КВЧ- и терагерцового диапазона.

Иванова Наталья Евгеньевна – инженер-исследователь ИСВЧПЭ РАН (г. Москва), аспирант Московского технологического университета. *Область научных интересов:* технологии изготовления МИС на основе нитрида галлия.