

# АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ПС СВЧ-ДИАПАЗОНА К ВОЗДЕЙСТВИЮ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

► К.А.Кагирина, Ю.В.Федоров, Д.В.Лаврухин, Д.Л.Гнатюк, А.В.Зуев, О.А.Рубан  
ИСВЧПЭ РАН

Предлагаются результаты исследования стойкости к воздействию внешних факторов преобразователей сигнала с частотой 57–64 ГГц, изготовленных на гетероструктурах AlGaN/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в ИСВЧПЭ РАН. Под внешними факторами в работе подразумевается воздействие нейтронного излучения и гамма-излучения. Также приведены результаты изучения долговременной стабильности преобразователей сигнала.

## STABILITY ANALYSIS OF MICROWAVE SIGNAL CONVERTERS UNDER EXTERNAL INFLUENCES

K.A.Kagirina, Y.V.Fedorov, D.V.Lavruhin, D.L.Gnatuk, A.V.Zuev, O.A.Ruban  
IUFSE RAS

The article presents the results of the study of resistance to external factors, signal transducers with frequency 57–64 GHz fabricated heterostructures AlGaN/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in ISVCHPE RAS. Under the external factors in the implied effects of neutron radiation and gamma radiation. Also, the results of the study of long-term stability of the signal converters.

## ВВЕДЕНИЕ

Современные монолитные интегральные схемы (МИС) СВЧ-диапазона находят свое применение в авиационной электронике и космических системах связи, которые подразумевают требования по стойкости МИС к воздействию внешних факторов. Поэтому актуальными являются исследования стойкости к перепадам температур и радиационному воздействию. Целью данной работы было изучение стойкости МИС преобразователей сигнала (ПС), изготовленных по технологии ИСВЧПЭ РАН, к воздействию потока нейтронов, гамма-излучения, а также их долговременной стабильности.

## ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассматриваемый ПС объединяет в себе генератор, управляемый напряжением (ГУН), смеситель и усилитель промежуточной частоты (УПЧ). При разработке МИС ПС стояла задача достижения следующих значений электрических параметров: диапазон входного ВЧ-сигнала 57–64 ГГц, диапазон выходного ВЧ-сигнала до 2 ГГц, преобразования без потерь

(коэффициента преобразования  $K_{пр} > 0$  дБ), КСВН по входу ВЧ-сигнала не более 2, суммарный ток потребления не более 100 мА. Особенностью конструкции данного ПС является верхняя металлизация по слою фотолака – открытыми являются только контактные площадки. Фотография кристалла приведена на рис.1. Размеры изготовленных кристаллов ПС составляют 1,9×2,26 мм<sup>2</sup>.



Рис.1. Фотография кристалла МИС ПС

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 1. Воздействие нейтронов

Облучение нейтронами проводилось при комнатной температуре в пассивном электрическом режиме на оборудовании ФГУП "НИИП". Кристаллы ПС подверглись воздействию нейтронов с энергиями  $\sim 1,4$  MeV при флюенсе  $\Phi \approx 2,6 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> и сопутствующей дозе гамма-излучения  $\sim 6,9$  кРад. Измерение СВЧ-параметров и потребляемых токов кристалла осуществлялось в ИСВЧПЭ РАН при комнатной температуре в одной и той же рабочей точке до и после облучения. Результаты этих измерений приведены в табл.1.

В табл.1 были использованы обозначения:  $f_{пч}$  – рабочий диапазон частот выходного сигнала ПЧ;  $I_{потр}$  – ток потребления (суммарный);  $K_{пр}$  – коэффициент преобразования.

Как видно, наблюдается изменение частоты сигнала ПЧ после воздействия на  $-3$ ,  $-2$ ,  $+27$  и  $+12\%$  для образцов № 1, 2, 3 и 4 соответственно. Коэффициент преобразования образцов 1, 2 и 4 вырос на 21, 18 и 6%. Коэффициент преобразования образца 4 упал на 85%. Несмотря на изменения, измеренные после эксперимента значения всех параметров остались в пределах допустимого диапазона.

Токи потребления образцов 1 и 2 после воздействия изменились несущественным образом, в то время как для образцов 3 и 4 токи упали на 14 и 11%. Падение токов может быть связано с образованием в процессе облучения заряженных дефектов в области AlGaN вблизи канала [1, 2].

### 2. Воздействие гамма-излучения

Испытания на стойкость к воздействию гамма-излучения проводились в АО "ЭНПО СПЭЛС" в активном электрическом режиме. В качестве источника гамма-излучения использовался ускоритель электронов, работающий в режиме тормозного излучения. Поглощенная доза ионизирующего излучения (ИИ) образцов составила  $D \gg 56$  кРад. Для контроля токов потребления в процессе облучения ПС были разварены в испытательную оснастку.

На рис.2 представлены зависимости тока потребления образцов ПС  $I_{потр}$ , нормированного на начальное значение тока, от поглощенной дозы ИИ.

На рис.2 видно, что ток потребления с увеличением дозы (времени облучения) растет, причем скорость роста тем больше, чем больше температура окружающей среды в процессе облучения.

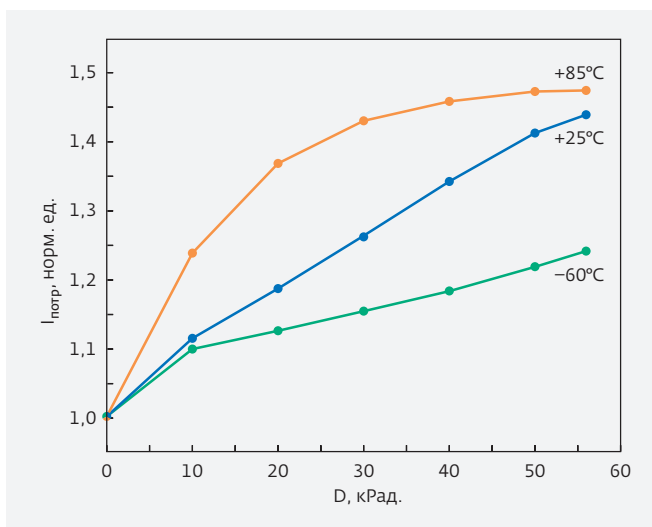


Рис.2. Изменение нормированного тока потребления ПС в процессе воздействия гамма-излучением

Кроме того, при температуре  $+85^\circ\text{C}$  наблюдается насыщение скорости роста тока потребления. Скорее всего, наблюдаемые различия в динамике тока потребления от времени связаны с неодинаковыми механизмами генерации и рекомбинации неравновесных носителей заряда в слое AlGaN при разной температуре.

В табл.2 сравниваются значения параметров ПС до и после эксперимента. Все измерения проводились при комнатной температуре в неизменной рабочей точке.

В табл.2 использованы те же обозначения, что и в табл.1. После воздействия гамма-излучения изменение частоты ПЧ составило  $+11$  и  $-12\%$  для образцов 5 и 6 соответственно. В образце № 7 частота после эксперимента не изменилась. Коэффициент преобразования образца № 5 упал на 3%, образца № 6 – вырос на 88%, образца № 7 – увеличился на 60%. Значения всех параметров таблицы находятся в диапазоне допустимых значений.

Таблица 1. Результаты воздействия нейтронов

№ образца	$f_{пч}$ , ГГц		$I_{потр}$ , мА		$K_{пр}$ , дБ	
	до	после	до	после	до	после
1	1,043	1,013	90	92	10,4	12,6
2	0,873	0,770	100	98	8,3	9,8
3	1,043	1,328	98	84	2,65	0,4
4	1,013	1,133	89	79	3,1	3,3

**Таблица 2.** Результаты воздействия гамма-излучения

Образец №	Температура облучения		$f_{пч}$ , ГГц		$I_{потр}$ , мА		$K_{пр}$ , дБ	
	до	после	до	после	до	после	до	после
5	+85 °С	0,968	0,968	1,073	100	89	16,57	16,0
6	+25 °С	1,043	1,043	0,923	99	62	7,65	14,39
7	-60 °С	0,983	0,983	0,983	91	100	6,85	10,94

Ток образца № 5 упал примерно на 12%, образца 6 – на 40%, ток образца № 7 вырос на 9%. Снижение значений тока потребления после воздействия может быть связано с образованием структурных дефектов в области AlGaN, близкой к каналу [3, 4], которое приводит к понижению подвижности носителей в канале.

### 3. Изучение долговременной стабильности

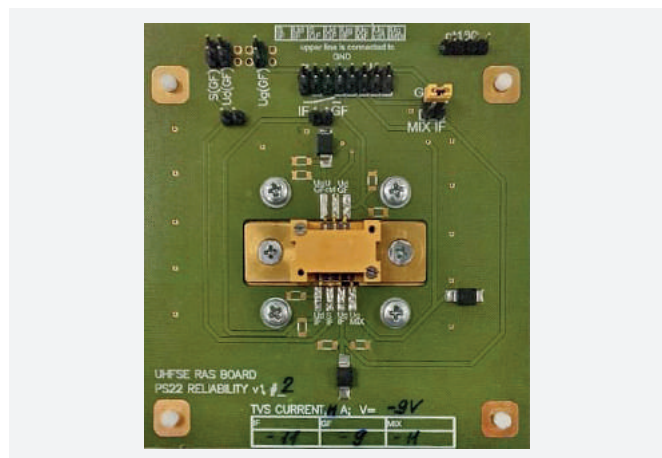
Изучение долговременной стабильности ПС проводилось в ИСВЧПЭ РАН. Для экспериментов чипы ПС были смонтированы в испытательную оснастку, показанную на рис.3. Данная оснастка позволяет проводить измерения высокочастотных характеристик кристалла в рабочей точке, контроль потребляемых токов, токов утечки и температуры чипа с помощью датчика температуры PT100.

В процессе экспериментов температура окружающей среды поддерживалась равной +85 °С. Образцы ПС № 8 и № 9 исследовались в циклическом режиме питания: 55 мин образец находится в активном режиме (питание включено), затем в течение

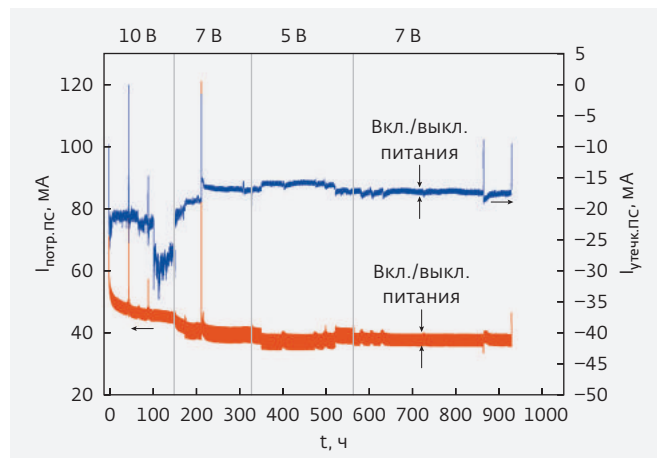
5 мин – в пассивном (питание отключено). Величина напряжения питания три раза изменялась: первые 170 ч  $U_{питПС}=10$  В, затем на 170 ч при  $U_{питПС}=5$  В и 560 ч при  $U_{питПС}=7$  В. Токи потребления непрерывно фиксировались. В качестве примера на рис.4 приведена динамика изменения токов потребления и утечки для образца № 8.

На рис.4 красной линией обозначены токи потребления образца № 8 при разных напряжениях питания, черной – токи утечки ПС. Желтыми вертикальными линиями обозначены временные зоны, в которых использовались различные значения  $U_{питПС}$  – 10, 7 или 5 В. В процессе 1000-часового эксперимента образцы несколько раз снимались для проведения контроля работоспособности и измерения СВЧ-параметров, при этом фиксировались импульсы тока потребления и утечки из-за переходных процессов при выходе на температурный режим.

Во время эксперимента суммарный ток потребления образца № 9 упал на 60% (на 52,9 мА) и суммарный ток утечки – на 33% (на 1,9 мкА). Ток потребления образца № 8 снизился примерно на 39% (на 23,0 мА), а ток утечки образца № 8 – на 33%



**Рис.3.** Фотография МИС ПС в испытательной оснастке (кристалл ПС закрыт крышкой)



**Рис.4.** Изменение токов  $I_{потрПС}$  и  $I_{утпс}$  в процессе изучения долговременной стабильности образцов ПС

(на 5,1 мкА). Отметим, что падение тока потребления на начальном этапе эксперимента (первые 50–100 ч) объясняется процессом термоэлектротренировки. Дальнейшее падение токов связано уже с образованием заряженных ловушек на поверхности AlGaIn, в подложке и в слое пассивации в процессе эксперимента [5].

После эксперимента были проведены измерения электрических параметров образцов № 8 и № 9 при комнатной температуре. Результаты измерений представлены в табл.3.

Из табл. 3 следует, что промежуточная частота образца № 8 после эксперимента выросла примерно на 15%, образца № 9 – незначительно уменьшилась (–2%). Коэффициент преобразования образца № 8 упал приблизительно на 29%, образца № 9 вырос на 38%. Суммарный ток потребления ПС № 8 после эксперимента упал на 23%, суммарный ток образца № 9 вырос на 3%. Все значения параметров в табл.3 находятся в диапазоне допустимых значений. Таким образом, в процессе изучения долговременной стабильности образцы ПС сохранили работоспособность.

## НОВИЗНА

Анализ состояния разработок МИС преобразователей сигнала разного типа для диапазона частот 57–64 ГГц показал, что в этом диапазоне применяются МИС, изготовленные по КМОП или SiGe-технологиям на подложках из кремния. На наногетероструктурах AlGaIn/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> изготавливают только отдельные компоненты (усилители, смесители и т.д.). Таким образом, авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие результаты.

1. Впервые в России на наногетероструктурах AlGaIn/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> была разработана технология, позволяющая интегрировать на один кристалл все составляющие приемно-передающих устройств: ГУН, смеситель, усилитель ПЧ. Изготовленные по этой технологии ПС характеризуются диапазоном входного ВЧ-сигнала 57–64 ГГц, диапазоном выходного ВЧ-сигнала до 2 ГГц, КСВН по входу ВЧ-сигнала не более 2, суммарный ток потребления не более 100 мА. Коэффициент преобразования МИС ПС достигает 15 дБ и не уступает коэффициенту преобразования зарубежных аналогов.
2. Проведены исследования стойкости МИС ПС к воздействию потока нейтронов и гамма-излучения, а также долговременной стабильности. Разработанные и изготовленные МИС ПС

**Таблица 3.** Результаты изучения долговременной стабильности

Образец №	f <sub>пч</sub> , ГГц		I <sub>потр</sub> , мА		K <sub>пр</sub> , дБ	
	до	после	до	после	до	после
8	0,998	1,013	96	80	9,55	6,8
9	0,998	0,983	93	96	9,35	12,97

по техническому уровню находятся на уровне лучших мировых достижений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые в России на наногетероструктурах AlGaIn/GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> были разработаны и изготовлены МИС ПС для диапазона частот 57–64 ГГц. Было проведено изучение стойкости этих ПС к воздействию нейтронного излучения и тормозного гамма-излучения, а также изучена надежность ПС. Проведенные исследования показали стойкость ПС к воздействию перечисленных факторов. Таким образом, МИС ПС ИСВЧПЭ РАН по техническому уровню соответствуют лучшим мировым достижениям.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0011, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60714X0011).

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Ling., Jin-Cheng Z., Jun-Shuai X., Xiao-Hua M.** Neutron irradiation effects on AlGaIn/GaN high // Chinese Physics B. 2012.
2. **McClory J.W., C.Petrosky J.** Temperature Dependent Electrical Characteristics // IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE. 2007.
3. Gamma irradiation impact on electronic carrier transport in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors [Журнал] / C.Schwarz, A.Yadav, M.Shatkhin, Flitsiyan, L.Chernyak, V.Kasiyan, L.Liu // APPLIED PHYSICS LETTERS. 2012. 102.
4. 60Co gamma radiation effects on DC, RF, and pulsed I-V characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs [Журнал] / O.Aktas, A.Kuliev, V.Kumar, R.Schwindt, S.Toshkov, D.Costescu, J.Stubbins, I.Adesida // Solid-State Electronics. 2004. 48.
5. **Dammann M., Pletschen W., Waltireit P., Bronner W., Quay R., Muller S., Mikulla M., Ambacher O.** Reliability and Degradation Mechanism of AlGaIn/GaN HEMTs for Next Generation Mobile Communication Systems // Microelectronics Reliability. 2009, May. 49: Т. 5. С. 474–477.