

Влияние параметров барьеров Шоттки AlGaN/GaN/SiC НЕМТ-транзисторов на фазовые шумы СВЧ-генераторов

*В.В. Груздов, К.Л. Енишерлова, Ю.В. Колковский,
Н.В. Давыдов, С.А. Капилин*

АО «НПП «Пульсар», г. Москва, Россия

Enisherlova@pulsarnpp.ru

СВЧ-транзисторы на новом широкозонном материале – нитриде галлия (НЕМТ-транзисторы) – позволяют создавать перспективные радиоэлектронные системы. Определение связи между параметрами транзисторной структуры и характеристиками СВЧ-генераторов на НЕМТ-транзисторах является актуальной задачей.

Проанализирована связь между особенностями емкостных параметров барьеров Шоттки систем затвор – сток AlGaN/GaN/SiC-транзисторов и спектральной плотностью мощности фазовых шумов СВЧ-генератора на базе данных транзисторов. Исследована выборка мощных 6-пальцевых транзисторов X -диапазона с длиной затвора 0,25 мкм, с выводом металлизации к истоку на обратную сторону кристалла и полевыми электродами FP . Показано, что при измерении на частотах $f < 500$ кГц у большинства анализируемых кристаллов C - V -характеристики в области перехода от обогащения к обеднению имеют характерный пик, высота которого возрастает с уменьшением частоты измерения. При измерении уровня шумов данной выборки кристаллов транзисторов в составе СВЧ-генератора установлена устойчивая корреляция между высотой характерного пика емкости на C - V -характеристиках и уровнем спектральной плотности мощности фазового шума СВЧ-генератора, в состав которого входит данный кристалл.

Полученные результаты по корреляции емкостных измерений с фазовыми шумами могут быть объяснены наличием ловушечных центров как в барьерном слое AlGaN, так и на его границах.

Ключевые слова: СВЧ-генератор; AlGaN/GaN/SiC-транзисторы; спектральная плотность мощности фазовых шумов; C - V -характеристики; барьер Шоттки; области стока и истока.

Для цитирования: Влияние параметров барьеров Шоттки AlGaN/GaN/SiC НЕМТ-транзисторов на фазовые шумы СВЧ-генераторов / В.В. Груздов, К.Л. Енишерлова, Ю.В. Колковский и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т. 22. – № 5. – С. 460–470. – DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-5-460-470

Influence of AlGaN/GaN/SiC Parameters of HEMPT-Transistors on Microwave Generators Phase Noises

*V.V. Gruzlov, K.L. Enisherlova, Y.V. Kolkovsky,
N.V. Davidov, S.A. Kapilin*

J&C «S&PE»Pulsar», Moscow, Russia

Enisherlova@pulsarnpp.ru

The microwave transistors on a wide-zone semiconductor material – gallium nitride (HEMPT-transistors) permit to create the perspective radioelectronic systems. Therefore, the determination of relation between the parameters of the transistors structure and the characteristics of the microwave generators on HEMT-transistors is an actual problem.

The connection between the Schottky barrier parameters of the transistor gate-drain system and the spectral power of the phase noise of microwave generators based on these transistors has been analyzed. The selection of the powerful 6-finger transistors of the X-band with the 0.25 μ m gate and the lead-out of metallization on the reverse side of the crystal and the field electrodes (FP) has been investigated.

In measurement at the $f < 500$ kHz frequency the most part of the analyzed crystals the C-V-characteristics in the area of transition from enrichment to depletion had a characteristic peak, the height of which increased with the decrease of the measurement frequency. While measuring the noises level of the given selection of crystals of the transistors being a part of the microwave generator a stable correlation between the height of the characteristic capacitance peak on the C-V-characteristics and the level of spectral density of the phase noise power of the microwave generator, which included the given crystal, has been established.

Keywords: microwave generator; AlGaN/GaN/SiC HEMT-transistors; power spectral density of phase noises; C-V-characteristics; Schottky barrier; drain and source regions.

For citation: Influence of AlGaN/GaN/SiC Parameters of HEMPT-Transistors on Microwave Generators Phase Noises / V.V. Gruzlov, K.L. Enisherlova, Y.V. Kolkovsky et al. // Proc. of Universities. Electronics. – 2017. – Vol. 22. – № 5. – P. – 460–470. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-5-460-470

Введение. Стабильность частоты и фазы генерируемых сигналов определяет основные характеристики радиолокационных и связных радиоэлектронных систем [1–3]: дальность обнаружения объектов; разрешение объектов по дальности; подавление мешающих отражений от местных предметов и медленно движущихся объектов; помехозащищенность и скрытность передачи сигналов. Оценка стабильности частоты и фазы формируемых сигналов проводится с помощью таких статистических характеристик, как среднеквадратическое отклонение параметра сигнала от среднего значения, автокорреляционная функция и спектральная плотность мощности шума параметров сигнала [4, 5]. Наиболее приемлемым является измерение фурье-образа корреляционной функции случайного процесса – спектральной плотности мощности шума, с которой связана дисперсия параметров [4–6].

Спектральная плотность мощности фазового шума СВЧ-генератора описывается степенной моделью фазового шума, учитывающей связь между фазой и круговой частотой $\omega = d\phi/dt$:

$$S_{\phi}(f_m) = A_{-3} \cdot f_m^{-3} + A_{-2} \cdot f_m^{-2} + A_{-1} \cdot f_m^{-1} + A_0, \quad (1)$$

где $A_{-3} \cdot f_m^{-3}$ – частотный фликкер-шум; $A_{-2} \cdot f_m^{-2}$ – частотный «белый» шум; $A_{-1} \cdot f_m^{-1}$ – фазовый фликкер-шум; A_0 – фазовый «белый» шум; f_m – частота отстройки от несущей частоты f_0 , $f_m = f - f_0$.

Первые два слагаемых в формуле (1) – собственный вклад генератора в спектральную плотность мощности фазового шума выходного сигнала, вторые два слагаемых описывают вклад буферных и умножительных каскадов. Конкретные значения фликкер-шума и «белого» шума определяются шумами активных приборов, которые зависят от их конструкции и технологической реализации.

Для СВЧ-генератора уровень спектральной плотности мощности фазового шума $S_{\phi}(f_m)$ связан со спектральной плотностью низкочастотного шума активного элемента СВЧ-транзистора $S_{\text{тр}}(f_m)$ следующей формулой [7]:

$$S_{\phi}(f_m) = \left(\frac{f_p}{(Q_n \cdot f_m)} \right)^2 K_p S_{\text{тр}}(f_m),$$

где Q_n – нагруженная добротность резонатора; K_p – коэффициент усиления активного полупроводникового автогенератора, компенсирующий потери в резонаторе; f_p – рабочая частота.

Внедрение СВЧ-транзисторов на новом широкозонном полупроводниковом материале – нитриде галлия (НЕМТ-транзистора) – позволяет создавать перспективные радиоэлектронные системы [8–11]. Поэтому задача определения связи между параметрами транзисторной структуры, измеряемыми физико-химическими методами [12–14], и характеристиками СВЧ-генераторов на НЕМТ-транзисторах является актуальной.

Цель настоящей работы – установление связи между характером нестабильности емкости при измерениях C - V -характеристик кристаллов AlGaIn/GaN/SiC-транзисторов и спектральной плотностью мощности фазового шума СВЧ-генераторов на их основе.

Объект и методика эксперимента.

Анализировались кристаллы мощных 6-пальцевых AlGaIn/GaN/SiC-СВЧ-транзисторов X -диапазона с длиной затвора 0,25 мкм (рис.1), изготовленных на гетероструктурах AlGaIn/GaN, выращенных с применением MOCVD-технологии на подложках SiC с ориентацией (0001). В качестве барьерного слоя использовался нелегированный слой AlGaIn толщиной 15–20 нм. Омические контакты к областям стока и истока формировались с использованием композиции

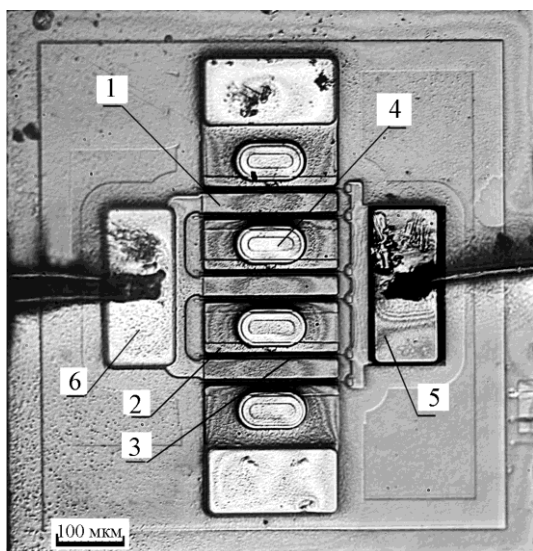


Рис.1. Общий вид кристалла СВЧ-транзистора: 1 – сток; 2 – исток; 3 – затвор; 4 – вывод металлизации к истоку на обратную сторону кристалла; 5 – контактное окно к затвору; 6 – контактное окно к стоку

Fig.1. General view of the microwave transistor crystal: 1 – drain; 2 – source; 3 – gate; 4 – metallization lead to source on the reverse side of the crystal; 5 – contact window to gate; 6 – contact window to drain

Ti-Al-Mo-Au. Контакты к области истока через металлизированные отверстия, расположенные непосредственно в активной области прибора, выведены на обратную сторону подложки кристалла транзистора.

Исследовалась выборка из 10 кристаллов СВЧ-транзисторов. Вольт-фарадные характеристики барьеров Шоттки систем затвор – сток и затвор – исток измерялись в диапазоне частот от 1 кГц до 1 МГц на установке CSM/WIN System при планарном расположении измерительных золотых зондов на контактных окнах транзисторов. Емкостные зависимости снимались по последовательной схеме замещения. Дополнительно исследовались вольт-амперные характеристики барьеров Шоттки затвор – сток. Спектральная плотность мощности фазового шума измерялась в составе СВЧ-генератора, стабилизированного резонатором (рис.2).

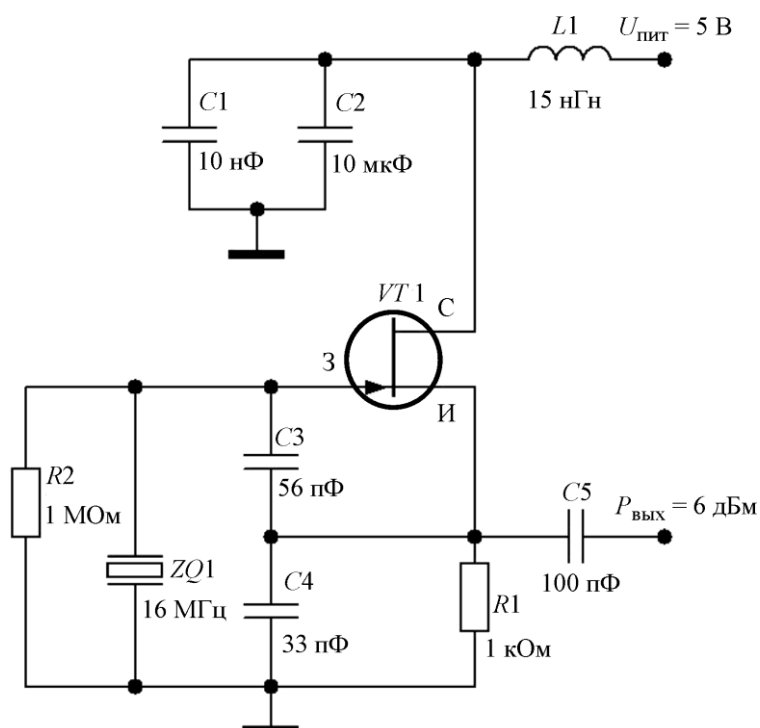


Рис.2. Схема измерительного генератора (VT 1 – анализируемый транзистор)

Fig.2. Electrical circuit of oscillator (VT 1 – analyzed transistor)

Результаты и их обсуждение. Результаты измерения C - V -характеристик при работе по последовательной схеме измерения систем затвор – сток и затвор – исток кристаллов СВЧ-транзисторов показали следующее. Практически все исследуемые кристаллы на частотах $f < 500$ кГц имеют пик возрастания емкости в области перехода от обогащения к обеднению. Отметим, что с уменьшением частоты измерения высота пика увеличивается (рис.3). Для разных кристаллов в выборке высота наблюдаемого пика емкости $C_{s\max}$ отличается при измерении на одной и той же частоте (рис.4). Распределения высоты пика емкости $C_{s\max}$, построенные по результатам измерений, показывают, что пики с минимальной высотой характерны для кристаллов № 7, 8, 9, а с максимальной – для кристаллов № 4,5. Детальное исследование C - V -характеристик, измеренных во всем диапазоне измеряемых частот, показало, что для ряда кристаллов помимо первого пика, фиксируемого при напряжении смещения от $-2,2$ до $-2,4$ В, характерно появление на C - V -характеристиках второго пика, фиксируемого при напряжении смещения от $-3,1$ до $-3,2$ В. При этом высота второго пика может быть у разных кристаллов больше или меньше высоты первого пика (рис.5).

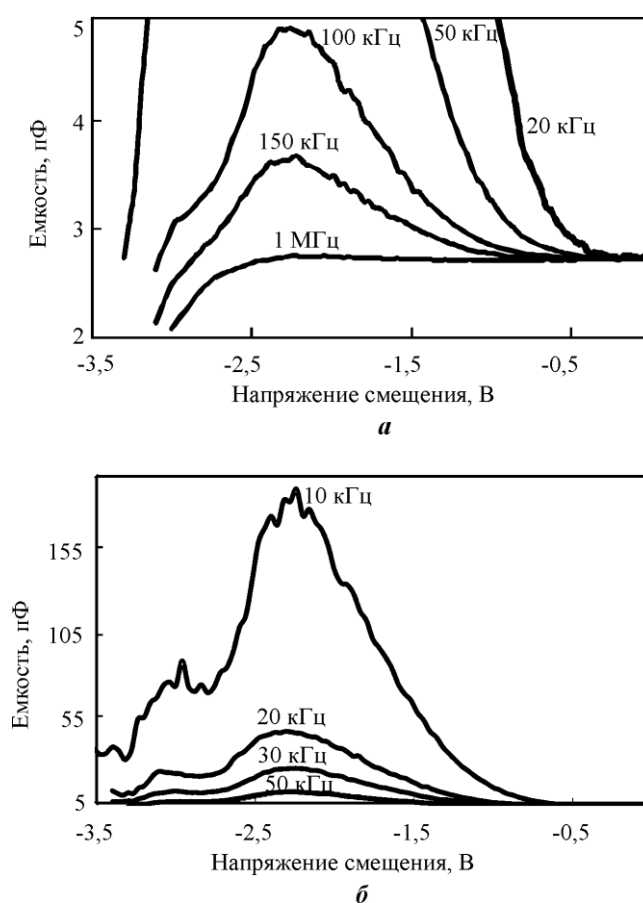


Рис.3. C-V-характеристики барьеров Шоттки системы затвор – сток кристалла № 6 при частотах: а – от 20 кГц до 1 МГц; б – от 10 до 50 кГц
 Fig.3. C-V characteristics of the gate-drain barrier Shottky system of the № 6 crystal out of the microwave transistor samples at frequencies: а – from 20 kHz to 1 MHz; б – from 10 kHz to 50 kHz

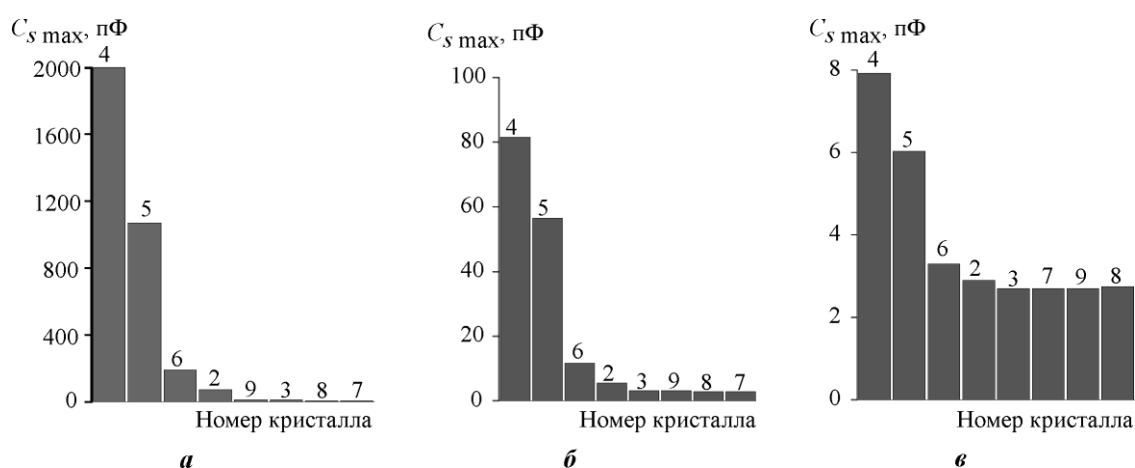


Рис.4. Распределение высоты пика емкости $C_{s \max}$ на C-V-характеристиках по выборке при частотах f : а – 10 кГц; б – 50 кГц; в – 200 кГц
 Fig.4. Distribution of the peak height capacitance $C_{s \max}$ of the C-V characteristics on sampling of transistor crystals at the frequency measurements: а – 10 kHz; б – 50 kHz; в – 200 kHz

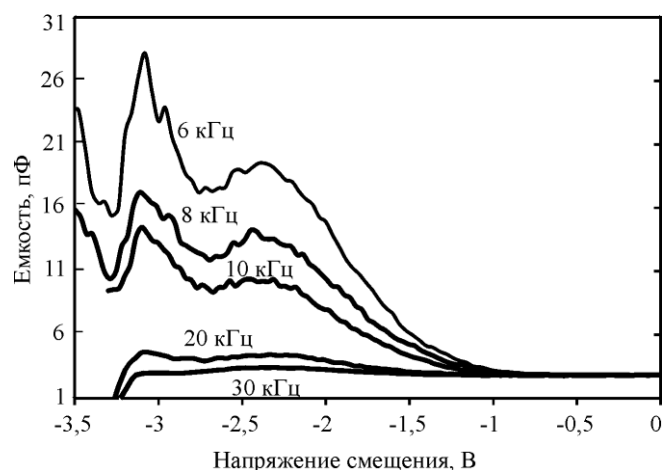


Рис.5. C - V -характеристики барьеров Шоттки системы затвор – сток кристалла № 3 при частотах от 6 до 30 кГц

Fig.5. C - V characteristics of the gate-drain barrier Shottky system of the № 3 crystal from the transistor crystals sampling at measure frequencies from 6 to 30 kHz

При измерении V - I -характеристик установлено, что значения обратных токов системы затвор – сток I_{3C} для разных кристаллов отличаются примерно на порядок:

Номер кристалла	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{3C}, 10^{-6}\text{A}$	1,4	2,05	8,2	8,04	2,6	0,51	0,625	0,48	2,16

При этом наблюдается корреляция между высотой пика $C_{s\text{max}}$ на C - V -характеристиках и обратным током I_{3C} СВЧ-транзисторов.

Измерения уровня спектральной плотности мощности фазового шума $S_\varphi(f_m)$ кристаллов в составе СВЧ-генератора показали различный ход зависимости $S_\varphi(f_m)$ у разных кристаллов (рис.6). В частности, значения $S_\varphi(f_m)$ на частоте отстройки $f_m = 10$ кГц у кристаллов № 4 и 9 отличаются на 30 дБн/Гц. Распределение результатов измерения $S_\varphi(f_m)$ для СВЧ-генератора по выборке при одной и той же частоте отстройки (рис.7) 10, и 200 кГц показывает, что минимальный уровень $S_\varphi(f_m)$ имеют кристаллы № 7, 8, 9, а максимальный – кристаллы № 4, 5.

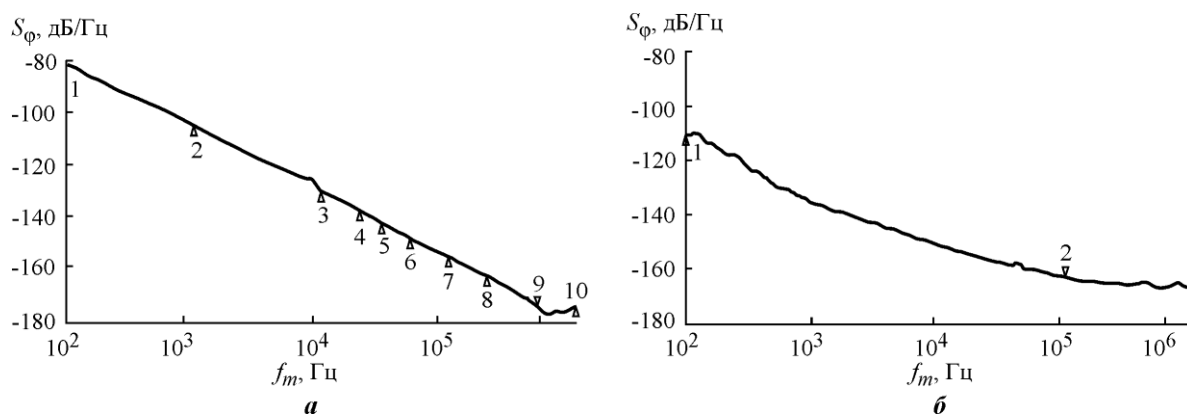


Рис.6. Зависимости спектральной плотности фазового шума $S_\varphi(f_m)$ от частоты отстройки: а – кристалл № 4; б – кристалл № 9

Fig.6. Dependences of the spectral power density of the phase noise $S_\varphi(f_m)$ of the investigated group of the microwave transistor crystals: а – $S_\varphi(f_m)$ of the № 4 crystal; б – $S_\varphi(f_m)$ of the № 9 crystal

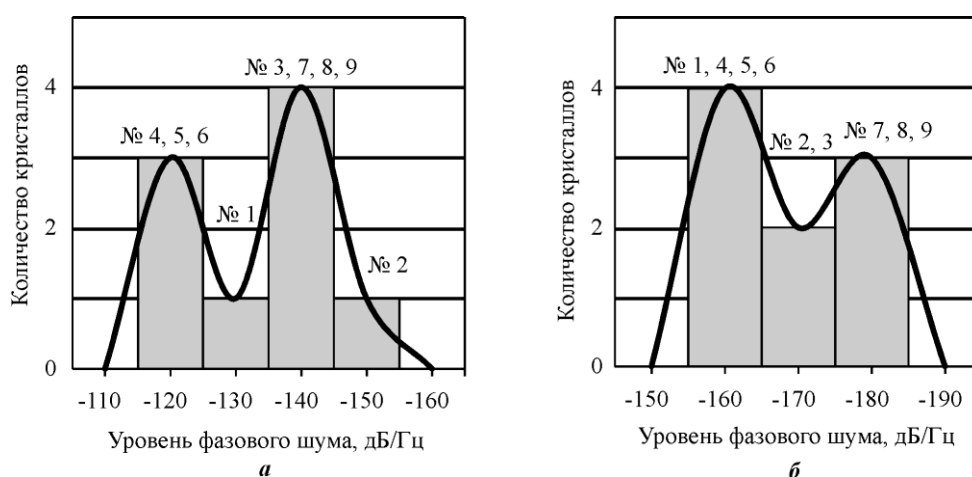


Рис. 7. Уровни фазовых шумов СВЧ-генератора с анализируемыми транзисторами в качестве активного элемента при частоте отстройки: а – 10 кГц; б – 200 кГц

Fig.7. Levels of phase noise of a microwave generator with analyzed transistors, as an active element, in the detuning: а – 10 kHz; б – 200 kHz

Таким образом, существует устойчивая корреляция между высотой пика емкости $C_{s \max}$ в области перехода от обогащения к обеднению на C - V -характеристиках измеряемого кристалла СВЧ-транзистора (см. рис.4) и уровнем спектральной плотности мощности фазового шума $S_{\phi}(f_m)$ СВЧ-генератора, изготовленного на этом кристалле (см. рис.7).

Появление аналогичных характерных пиков на C - V -характеристиках при низкочастотных измерениях зафиксировано в работах [15–17]. Пики наблюдаются при емкостных измерениях как на исходных гетероструктурах AlGaIn/GaN, так и на кристаллах транзисторов и тестовых барьерах Шоттки, сформированных на этих гетероструктурах. В частности, в работе [15] указывается, что у тестовых барьеров Шоттки, сформированных на гетероструктурах с легированным барьерным слоем, при емкостных измерениях наблюдается неустойчивость емкости в виде пика на C - V -кривых. В работе [18] появление аналогичных пиков при низкочастотных измерениях зафиксировано на гетероструктурах с частично легированным кремнием барьерным слоем AlGaIn и у гетероструктур с толстым нелегированным верхним слоем i -GaN (5–7 нм). Причина появления такой неустойчивости емкости может быть связана с наличием в барьерном слое или на его границах дефектов, которые могут проявляться как глубокие ловушечные центры. Временная постоянная дефектов такова, что они возникают на низких частотах измерения, формируя заряд, обеспечивающий приращение емкости. Наблюдаемый спад емкости в пике при возрастании обеднения связан, вероятно, с перераспределением напряжения между каналом и барьерным слоем. По мере возрастания обедняющего напряжения (по абсолютной величине) происходит обеднение канала свободными носителями и, как следствие, уменьшение дополнительного заряда. Скорее всего, определяющими факторами неустойчивости емкости являются процессы, происходящие на границах барьерного слоя (AlGaIn- i -GaN, AlGaIn – пассивирующий слой). При этом процессы зарядки и разрядки граничных состояний могут иметь разные временные постоянные.

Спектральная плотность мощности шума СВЧ-транзистора $S_{\text{тр}}(f_m)$, обусловленная процессами переходов носителей с одного энергетического состояния на другое с постоянной времени τ_p , равна [19,20]:

$$S_{\text{тр}}(\omega) = \frac{S_0}{[1 + (\omega\tau_p)^2]},$$

где $\omega = 2\pi f_m$; S_0 – плотность состояний глубокого уровня с временной постоянной τ_p . Нетрудно видеть, что при $\omega > 1/\tau_p$ зависимость имеет вид $S_{\text{тр}}(f_m) \sim 1/f_m^2$.

Для объяснения наблюдаемой зависимости $S_{\text{тр}}(f_m) \sim 1/f_m^n$, где $1 < f_m < 2$, необходимо учесть, что может иметь место именно переход носителей на поверхностные состояния (см. рис.6). В общем случае вклад процессов перезарядки с различными временными постоянными может быть учтен с помощью статистической функции распределения $\rho(\tau_p)$, описывающей вероятностный вклад процессов с различными постоянными времени в флуктуации выходных параметров транзистора. Значение функции распределения $\rho(\tau_p)$ можно определить из спектральной зависимости измеренного фликкер-шума:

$$S(\omega) = \int_0^{\infty} \frac{S_0 \rho(\tau_p)}{[1 + (\omega\tau_p)^2]} d\tau_p. \quad (2)$$

Для равномерного распределения $\rho(\tau_p) = \rho_0$ спектральная зависимость шума равна:

$$S(\omega) = S_0 \rho_0 \left(\frac{\pi}{2\omega} \right) = \left(\frac{S_0 \rho_0}{2} \right) f^{-1}. \quad (3)$$

Из (2) и (3) следует, что уровень спектральной плотности мощности шума $S_{\text{тр}}(f_m)$ связан с распределением источников перезарядки носителей заряда в СВЧ-транзисторе.

Кроме того, причиной появления пика нестабильности емкости могут быть также большие обратные токи в барьерном слое, которые связаны с наличием цепочки дефектов, вызывающих нестабильность емкости. Эти дефекты могут приводить к возникновению сквозных токов утечек, что подтверждается наличием корреляции между нестабильностью C - V -характеристик (высотой пика) и токами утечек при измерении I - V -характеристик систем затвор – сток. Эти дефекты могут выступать в качестве токопроводящих прослоек.

Таким образом, обнаруженная нестабильность емкости при C - V -измерениях и возникновение низкочастотных шумов могут быть объяснены наличием неких центров как в объемном барьерном слое AlGaN, так и на всех границах гетероструктуры: AlGaN – GaN, поверхность гетероструктуры – пассивирующий слой. Появление таких центров обусловлено особенностями конструкции и технологии изготовления исходных гетероструктур, на которых сформирован транзистор, а также процессами технологического цикла изготовления самих транзисторов (формирование омических контактов, полевых электродов и т.д.). Разнообразие форм C - V -характеристик анализируемых кристаллов, в частности появление второго и третьего пиков, может свидетельствовать о том, что энергетические уровни, связанные с дефектами различной природы, ответственны за возникновение низкочастотных шумов.

Заключение. Проведенный анализ влияния параметров AlGaN/GaN/SiC HEMT-транзисторов на стабильность частоты и фазы сигналов СВЧ-генераторов показал, что внутри выборки СВЧ-транзисторов, изготовленных по одной технологии, разброс измеренных значений спектральной плотности мощности фазового шума составляет до 30 дБн/Гц. Установлена устойчивая корреляция между пиком емкости $C_{s \max}$ в области перехода от обогащения к обеднению на C - V -характеристиках измеряемого кристалла СВЧ-транзистора и уровнем спектральной плотности мощности фазового шума СВЧ-генератора, изготовленного на этом СВЧ-транзисторе. Полученные результаты по

корреляции емкостных измерений с фазовыми шумами могут быть объяснены наличием ловушечных центров как в барьерном слое AlGaIn, так и на его границах, влияние которых обнаружено при измерении C-V-характеристик барьеров Шоттки систем затвор – сток и затвор – исток кристаллов СВЧ-транзисторов.

Литература

1. **Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э.** // Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – М.: Радиотехника. – 2010. – 680 с.
2. **Орлов А.Г., Севастьянов Н.Н.** Бортовой ретрансляционный комплекс (БРК) спутника связи. Принцип работы, построение, параметры. – Томск: Изд-во «Дом Томского государственного университета», 2014. – 210 с.
3. **Рытов С.М.** Введение в статистическую радиофизику. Ч1. Случайные процессы. – М.: Наука, 1976. – 496 с.
4. **Малахов А.Н.** Флуктуации в автоколебательных системах. – М.: Наука, 1969. – 880 с.
5. **Рютман Ж.** Характеристики нестабильности фазы и частоты сигналов высокостабильных генераторов: Итоги развития за пятнадцать лет // ТИИЭР. – 1978. – Т. 66. – С. 70–103.
6. **Лисон Д.Б., Джонсон Г.Ф.** Кратковременная стабильность частоты доплеровских радиолокационных станций: требования, измерения, методы // ТИИЭР. – 1966. – №2. – С. 157–163 с.
7. **Rudiger Quay.** Gallium nitride electronics. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. – 469 p.
8. **Васильев А.Г., Колковский Ю.В., Концевой Ю.А.** СВЧ приборы и устройства на широкозонных полупроводниках. – М.: Техносфера, 2011. – 416 с.
9. **Груздов В.В., Колковский Ю.В.** // Новые нитрид-галлиевые технологии для РЛС с АФАР // Интеграл. – 2015. – № 1-2. – С.4–6.
10. **Груздов В.В., Колковский Ю.В.** Нитрид-галлиевая электроника для космических систем// Радиопромышленность. – 2016. – № 3. – С. 54–58.
11. Gallium nitride (GaN). Physics, devices and technology / *Ed. by F. Medjdoub.* – London – NewYork: CRC Press, 2015. – 372 p.
12. **Груздов В.В., Колковский Ю.В., Концевой Ю.А.** Контроль новых технологий в твердотельной СВЧ электронике. – М.: Техносфера, 2016. – 328 с.
13. **Енишерлова К.Л., Лютцау А.В., Темпер Э.М.** Однокристалльная рентгеновская дифрактометрия гетероструктур. – Тамбов: Юлис, 2016. – 143 с.
14. Глубокие уровни и электронный транспорт в гетероструктурах AlGaIn/GaN / **И.В. Антонова, В.И. Поляков, А.И. Руковишников и др.** // ФТП. – 2008. – Т. 42. – Вып. 1. – С. 53–59.
15. **Енишерлова К.Л., Горячев В.Г., Русак Т.Ф., Капилин С.А.** Исследование влияния пассивирующих слоев на емкостные характеристики гетероструктур AlGaIn/GaN// Изв. вузов. Материалы электронной техники. – 2015. – Т. 18. – С. 137–145.
16. **Stradiotto R., Pobegen G., Ostermair C., Grasser T.** On the fly characterization of charge trapping phenomena at GaN/ dielectric and GaN/AlGaIn/dielectric interfaces using impedance measurements// 978-1-4673-7135-3/15.\$31. 00©2015 IEEE. – P. 72–75.
17. **Енишерлова К.Л., Горячев В.Г., Сарайкин В.В., Капилин С.А.** Диагностика гетероструктур AlGaIn/GaN и НЕМТ-транзисторов на их основе методом анализа вольт-фарадных характеристик // Тез. докл. на 11 Всероссийской конф. «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (Москва, 1–3 фев. 2017 г.). – 2017. – С. 128–129.
18. **Киреев О.А., Румянцев С.Л.** О роли поверхности в формировании шума 1/f в n-GaAs // ФТП. – 1985. – Т. 19. – Вып. 11. – С. 2080–2082.
19. **Коган Ш.М.** Низкочастотный токовый шум спектров типа 1/f в твердых телах // Успехи физических наук. – 1985. – Т. 145. – С. 285–328.

Поступила 04.04. 2017 г., принята к публикации 13.06.2017 г.

Груздов Вадим Владимирович – кандидат экономических наук, генеральный директор АО «НПП «Пульсар» (Россия, 105187, г. Москва, Окружной проезд, д. 27).

Енишерлова Кира Львовна – доктор технических наук, начальник лаборатории физико-химических исследований АО «НПП «Пульсар» (Россия, 105187, г. Москва, Окружной проезд, д. 27), Enisherlova@pulsarnpp.ru

Колковский Юрий Владимирович – доктор технических наук, заместитель генерального директора АО «НПП «Пульсар» (Россия, 105187, г. Москва, Окружной проезд, д. 27).

Давыдов Никита Владимирович – начальник лаборатории разработки стабильных СВЧ-генераторов и силовых модулей АО «НПП «Пульсар» (Россия, 105187, г. Москва, Окружной проезд, д. 27).

Капилин Семен Андреевич – инженер 3-й категории АО «НПП «Пульсар» (Россия, 105187, г. Москва, Окружной проезд, д. 27).

References

1. Verba V.S., Neronskij L.B., Osipov I.G., Turuk V.Eh. *Radiolokacionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* [Earth-based radar surveying systems]. Moscow, Radiotekhnika, 2010. 680 p. (in Russian).
2. Orlov A.G., Sevast'yanov N.N. *Bortovoj retranslyacionnyj kompleks (BRK) sputnika svyazi. Princip raboty, postroenie, parametry* [On-board relay system (BRS) of communication satellite. Principle of operation, construction, parameters]. Tomsk, Dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2014. 210 p. (in Russian).
3. Rytov S.M. *Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku. Chast' 1. Sluchajnye processy* [Introduction to Statistical Radiophysics. Part 1. Random processes]. Moscow, Nauka, 1976. 496 p. (in Russian).
4. Malahov A.N. *Fluktuacii v avtokolebatel'nyh sistemah* [Fluctuations in self-oscillating systems]. Moscow, Nauka, 1969. 880 p. (in Russian).
5. Ryutman Zh. *Harakteristiki nestabil'nosti fazy i chastoty signalov vysokostabil'nyh generatorov: Itogi razvitiya za pyatnadcat' let* [Characteristics of phase and frequency instability of signals of highly stable generators: Results of development over 15 years]. *Trudy instituta inzhenerov po ehlektronike i radiotekhnike – Proceedings of the Institute of Electronics and Radio Engineering*, 1978, vol.66, pp.70–103. (in Russian).
6. Leeson D.B., Johnson G.F. *Kratkovremennaya stabil'nost' chastoty dopplerovskih radiolokacionnyh stancij: trebovaniya, izmereniya, metody* [Short-term stability of the frequency of Doppler radar stations: requirements, measurements, methods]. *Trudy instituta inzhenerov po ehlektronike i radiotekhnike – Proceedings of the Institute of Electronics and Radio Engineering*, 1966, no. 2, pp.157–163. (in Russian).
7. Rudiger Quay. *Gallium Nitride Electronics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 469 p.
8. Vasil'ev A.G., Kolkovskij Yu.V., Koncevoj Yu.A. *SVCH pribory i ustrojstva na shirokazonnyh poluprovodnikah* [Microwave devices and devices on wide-gap semiconductors]. Moscow, Tekhnosfera, 2011. 416 p. (in Russian).
9. Gruzlov V.V., Kolkovskij Yu.V. *Novye nitrid-gallievye tekhnologii dlya RLS s AFAR* [New gallium nitride technologies for radar stations with AESA]. *Integral – Integral*, 2015, no.1-2, pp. 4–6. (in Russian).
10. Gruzlov V.V., Kolkovskij Yu.V. *Nitrid-gallievaya ehlektronika dlya kosmicheskikh sistem* [Nitride-gallium electronics for space systems]. *Radiopromyshlennost' – Radio industry*, 2016, no. 3, pp. 54–58. (in Russian).
11. *Gallium Nitride (GaN). Physics, Devices and Technology*. Edited by F.Medjdoub. CRC Press. London – New York, 2015. 372 p.
12. Gruzlov V.V., Kolkovskij Yu.V., Koncevoj Yu.A. *Kontrol' novyh tekhnologij v tverdotel'noj SVCH ehlektronike* [Control of new technologies in microwave electronics]. Moscow, Tekhnosfera, 2016. 328 p. (in Russian).
13. Enisherlova K.L., Lyutcau A.V., Temper Eh.M. *Odnokristal'naya rentgenovskaya difraktometriya geterostruktur* [Single-crystal diffractometry of heterostructures]. Tambov: Yulis, 2016. 143 p. (in Russian).
14. Antonova I.V., Polyakov V.I., Rukovishnikov A.I., Mansurov V.G., Zhuravlev K.S. *Glubokie urovni i ehlektronnyj transport v geterostrukturah AlGaIn/GaN* [Deep levels and electronic transport in AlGaIn/GaN heterostructures]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov – Semiconductors*, 2008, vol. 42, no. 1, pp. 53–59. (in Russian).
15. Enisherlova K.L., Goryachev V.G., Rusak T.F., Kapilin S.A. *Issledovanie vliyaniya passiviruyushchih sloev na emkostnye harakteristiki geterostruktur AlGaIn/GaN* [Influence of passivating layers on the capacitive

characteristics of AlGaIn/GaN heterostructures]. *Izvestiya vuzov. Materialy ehlektronnoj tekhniki – Proceedings of universities. Materials of Radioelectronics*, 2015, vol. 18, pp. 137–145. (in Russian).

16. Stradiotto R., Pobegen G., Ostermair C., Grasser T. On the fly characterization of charge trapping phenomena at GaN/ dielectric and GaN/AlGaIn/dielectric interfaces using impedance measurements. 978-1-4673-7135-3/15.\$31. 00©2015 IEEE, pp.72–75.

17. Enisherlova K.L., Goryachev V.G., Sarajkin V.V., Kapilin S.A. Diagnostika geterostruktur AlGaIn/GaN i NEMT-tranzistorov na ih osnove metodom analiza vol't-faradnyh harakteristik [Diagnostics of AlGaIn/GaN heterostructures and HEMT-transistors based on their by method of analysis of C-V characteristics]. *Tezisy dokladov na 11-Vserossiyskoj konferencii «Nitridy galliya, indiya i alyuminiya -strukturny i pribory»* [Abstracts of the 11th All-Russian Conference «Nitrides of Gallium, Indium and Aluminum-Structures and Devices»]. Moscow, 2017, pp. 128–129. (in Russian).

18. Kireev O.A., Romyancev S.L. O roli poverhnosti v formirovanii shuma 1/f v n-GaAs [On the role of the surface in the formation of noise 1/f in GaAs]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov – Semiconductors*, 1985, vol. 19, no.11, pp. 2080–2082.

19. Kogan S.H.M. Nizkochastotnyj tokovyj shum spektrov tipa 1/f v tverdyh telah [Low-frequency current noise of spectra of the 1/f type in solids]. *Uspekhi fizicheskikh nauk – Advances in Physical Sciences*, 1985, vol. 145, pp. 285–328. (in Russian).

Submitted 04.04.2017; accepted 13.06.2017.

Gruzdom Vadim V. – PhD of economic sciences, general director of J&C «S&PE» Pulsar» (Russia, 105187, Moscow, Okruzhnoy proyezd, 27).

Enisherlova Kira L. – Doctor of technical sciences, head of the laboratory, J&C «S&PE» Pulsar» (Russia, 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27), Enisherlova@pulsarnpp.ru

Kolkovsky Yury V. – Doctor of technical sciences, deputy general director of J&C «S&PE» Pulsar», (Russia, 105187, Moscow, Okruzhnoy proyezd, 27).

Davydov Nikita V. – head of the laboratory, J&C «S&PE» Pulsar», (Russia, 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27).

Kapilin Semen A. – engineer, J&C «S&PE» Pulsar», (Russia, 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27).