

# ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

PHYSICAL CHARACTERISTICS AND THEIR STUDY

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2016. Т. 19, № 2. С. 115–123.  
ISSN 1609–3577. DOI: 10.17073/1609-3577-2016-2-115-123

УДК 621.315.592

## НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ЕМКОСТИ ВФ–ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaIn/GaN И НЕМТ–ТРАНЗИСТОРОВ НА ИХ ОСНОВЕ

© 2016 г. К. Л. Енишерлова, В. Г. Горячев,  
В. В. Сарайкин, С. А. Капилин

АО «НПП» Пульсар»,  
Окружной проезд, д. 27, Москва, 105187, Россия

### Введение

Стационарная емкостная спектроскопия полупроводниковых гетероструктур зарекомендовала себя как эффективный метод изучения электронных свойств гетероструктур и приборов на их основе, поскольку этот метод дает возможность получать информацию о количестве и распределении заряда в активных элементах структур. В частности, для нитридных гетероструктур типа AlGaIn/GaN метод снятия вольт–фарадных характеристик (**ВФХ**) используется для определения положения канала двумерного электронного газа (**2DEG**–канал), положения энергетических уровней в квантовой яме, а также для получения информации о профиле распределения свободных носителей в

гетероструктурах и активных областях транзисторов на их основе путем численной обработки  $C$ – $V$ –кривых [1–4]. Однако в ряде работ [5, 6] отмечалось, что наблюдаемая неустойчивость емкости у ряда гетероструктур при построении профилей распределения заряда по глубине и при определении глубины расположения 2DEG–канала делает неоднозначными результаты, полученные при численной обработке ВФХ из–за сложности правильной интерпретации экспериментальных данных. Такую неустойчивость в виде возрастания емкости отмечали в работе [5] при измерении структур AlGaIn/GaN с барьерным слоем, принудительно легированным кремнием. Аналогичную неустойчивость с возрастанием емкости в виде характерного пика на ВФХ при переходе от

Проведен комплекс исследований частотных зависимостей вольт–фарадных характеристик гетероструктур AlGaIn/GaN, а также барьеров Шотки областей затвор–исток и затвор–сток кристаллов AlGaIn/GaN/SiC HEMT–транзисторов с целью выяснения причин появления в ряде случаев неустойчивости емкости. Исследованы кристаллы мощных AlGaIn/GaN/SiC СВЧ–транзисторов  $X$ –диапазона с длиной затвора 0,25 мкм и гетероструктуры, выращенные MOCVD–эпитаксией. Для уточнения распределения эпитаксиальных слоев по глубине гетероструктур проведен послойный элементный анализ (Al, Ga и Si) методом масс–спектрометрии вторичных ионов. Появление пика возрастания емкости на  $C$ – $V$ –характеристиках гетероструктур AlGaIn/GaN при низкочастотных измерениях зафиксировано на структурах с частично легированным кремнием барьерным слоем AlGaIn и на гетероструктурах с «толстым» верхним слоем  $i$ –GaN. Появление аналогичного характерного пика на низких частотах наблюдалось и на  $C$ – $V$ –кривых барьеров Шотки систем затвор–исток и затвор–исток ряда HEMT–транзисторов. Проведен анализ изменения сопротивления  $R_s$  при измерении на разных частотах и разном напряжении смещения с построением годографа импеданса последовательной  $RC$ –цепи. Анализ годографов для ряда исследованных транзисторов показал, что в большинстве случаев появление пика неустойчивости на частотах 20–500 кГц связано в большей степени со сквозными токами утечки в барьерном слое, а на частотах 1–20 кГц с генерационно–рекомбинационными центрами в барьерном слое или на границе AlGaIn–GaN.

**Ключевые слова:** гетероструктуры AlGaIn/GaN, барьеры Шотки, HEMT–транзисторы, вольт–фарадные характеристики, последовательная и параллельная схемы замещения, годограф импеданса цепи, генерационно–рекомбинационный вклад

Енишерлова Кира Львовна — доктор техн. наук, начальник лаборатории, e-mail: enisherlova@pulsarnpp.ru; Горячев Владимир Глебович — старший научный сотрудник; Сарайкин Владимир Васильевич — старший научный сотрудник; Капилин Семен Александрович — инженер 3–й категории.

обогащения к обеднению наблюдали в работе [6] как для исходных гетероструктур с «толстым» (5—7 нм) верхним нелегированным слоем  $i$ -GaN («шапочка» GaN), так и для тестовых барьеров Шотки (БШ) на их основе. Для эпитаксиальных гетероструктур AlGaIn/GaN, выращенных на карбиде, сапфире или кремнии, правильная интерпретация наблюдаемых ВФХ осложняется рядом причин, таких как неидеальность переходов между слоями и наличие неконтролируемых примесей на границах, а также промежуточных дефектных слоев. Именно поэтому расчетные профили, получаемые при формальной числовой обработке ВФХ, обычно обозначают как «эффективные» или «кажущиеся» профили распределения носителей по глубине [3]. В этом случае используется последовательная схема замещения. Более того, усложнение конструкции нитридных гетероструктур: ввод специальных приповерхностных и спейсерных слоев различной толщины с целью увеличения стабильности работы приборов и повышения их радиационной стойкости, варьирование мольного содержания алюминия в барьерном слое, а также толщины слоев и особенностей расположения слоев относительно друг друга в поисках оптимального технологического варианта [7], требует дополнительных исследований параметров гетероструктур. Поэтому проведение дальнейших исследований ВФХ нитридных гетероструктур в широком диапазоне частот, безусловно, представляет интерес для выяснения возможных причин появления различных отклонений характеристик от общепринятых и изучения влияния этих отклонений на параметры приборов.

Цель работы — проведение комплекса исследований частотных зависимостей ВФХ как исходных гетероструктур AlGaIn/GaN, так и БШ областей затвор—исток и затвор—сток кристаллов НЕМТ-транзисторов, сформированных на нитридных гетероструктурах, для изучения причин появления в ряде случаев нестабильности емкости.

### Теоретическая предпосылка

В работе [8] представлена достаточно простая модель, с помощью которой можно обосновать некоторые электрические характеристики AlGaIn/GaN НЕМТ-структур, в частности вольт-амперные. Представленная электрическая схема упрощенно разделена на внешнюю и внутреннюю части. Внешняя часть включает элементы транзистора (паразитные сопротивления областей стока и истока), а внутренняя — элементы самой гетероструктуры (емкости и сопротивления барьерного и канального слоев, паразитные емкости и сопротивление буферного слоя) (рис. 1).

При измерении непосредственно на гетероструктурах, анализируют только внутреннюю схему. В этом случае величина измеряемой емкости при

последовательной схеме замещения определяется следующим уравнением:

$$\frac{1}{C_{\text{сизм}}} = \frac{1}{C_t + C_{\text{бар}}} \frac{\omega^2 \tau_{\text{bt}}^2}{1 + \omega^2 \tau_{\text{bt}}^2} + \frac{1}{C_{\text{буф}}} \frac{\omega^2 \tau_{\text{буф}}^2}{1 + \omega^2 \tau_{\text{буф}}^2}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{бар}}$  — емкость барьерного слоя;  $C_t$  — емкость, связанная с захватом носителей заряда на ловушечные центры в барьерном слое и на границе AlGaIn—GaN;  $\omega$  — круговая частота,  $\omega = 2\pi f$ ;  $C_{\text{буф}}$ ,  $R_{\text{буф}}$  — емкость и сопротивление буферного слоя соответственно;  $\tau_{\text{bt}}$ ,  $\tau_{\text{буф}}$  — временные постоянные ловушечных центров в барьерном и буферном слоях,  $\tau_{\text{bt}} = (C_t + C_{\text{бар}})(R_t + R_{\text{бар}})$  и  $\tau_{\text{буф}} = R_{\text{буф}} C_{\text{буф}}$ .

В случае отсутствия свободных носителей и ловушечных центров в барьерном слое ( $C_t = 0$ ), а также утечек в барьерном слое ( $R_{\text{бар}} \rightarrow \infty$ ), согласно уравнению (1), барьерный слой можно рассматривать как диэлектрик с емкостью в аккумуляции  $C_{\text{сизм}} = C_{\text{бар}}$ . При этом  $C_{\text{бар}}$  равняется расчетной емкости барьерного слоя:

$$C_{\text{расч.}} = \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{d},$$

где  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость барьерного слоя;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $A$  — площадь зонда;  $d$  — толщина барьерного слоя.

В этом случае при измерении ВФХ при разных частотах по последовательной схеме (при отсутствии дисперсии емкости, когда  $C_{\text{max}_{\text{нч}}} = C_{\text{max}_{\text{вч}}} = C_{\text{сизм}}$ ) на всех частотах емкость в аккумуляции должна равняться расчетной емкости. Причем ВФХ имеют

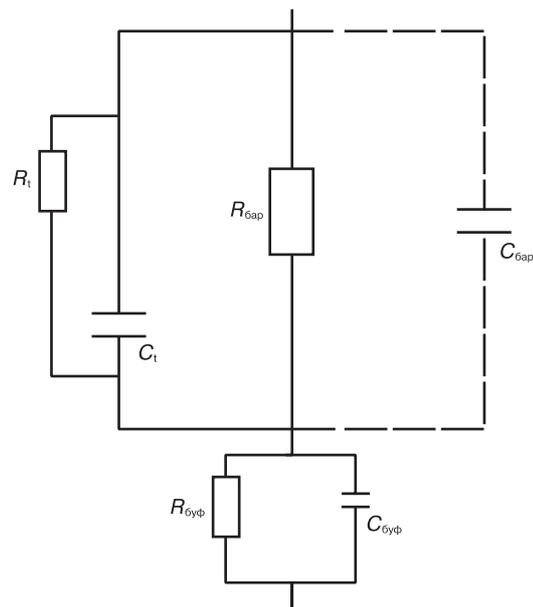


Рис. 1. Эквивалентная схема гетероструктуры AlGaIn/GaN:  $C_{\text{бар}}$ ,  $R_{\text{бар}}$  — емкость и активное сопротивление барьерного слоя;  $C_t$ ,  $R_t$  — емкость и сопротивление, связанные с захватом носителей заряда на ловушки на границах и в объеме барьерного слоя

Fig. 1. Equivalent circuit of AlGaIn/GaN heterostructure:  $C_{\text{бар}}$ ,  $R_{\text{бар}}$  are capacity and active resistance of barrier layer and  $C_t$ ,  $R_t$  are capacity and resistance related to capture of charge carriers by traps at interfaces and in bulk barrier layer

стандартный вид со сравнительно резким падением значения емкости при переходе от обогащения к обеднению. Для анализируемых гетероструктур и приборов на их основе при увеличении напряжения смещения (по абсолютной величине) в область обеднения основное падение напряжения происходит в барьерном слое. Канал в этом случае заполнен электронами и является проводящим электродом к барьерному слою. При увеличении  $U_{\text{смещ}}$  в область обеднения (обычно в районе  $U_{\text{смещ}} = -2 \dots -2,5$  В) из-за уменьшения концентрации электронов в квантовой яме происходит перераспределение падения напряжения между барьерным слоем и каналом.

В барьерном слое могут находиться ловушечные центры [9]. Если в процессе изменения напряжения смещения их заряд не изменяется, то их наличие приведет к сдвигу ВФХ по оси абсцисс без изменения емкости  $C_{\text{сизм}}$  в уравнении (1) (см. рис. 1). Если изменение напряжения в барьерном слое может приводить к перезарядке ловушек, то должно наблюдаться изменение в значении измеряемой емкости. Это возможно, если при изменении  $U_{\text{смещ}}$  наблюдается изменение тока, протекающего через структуру. По-видимому, часть потока свободных электронов может захватываться на ловушки и снова возвращаться в зону проводимости, создавая при этом дополнительный заряд на ловушках. Естественно предположить, что с изменением тока возможно изменение и дополнительного заряда на ловушках. Тогда при подаче тестового сигнала определенной частоты в структуре возникает переменный заряд на ловушках. В зависимости от значения постоянного тока, частоты тестового сигнала и соотношения времени захвата электронов на ловушки и времени эмиссии их в зону проводимости должно наблюдаться различное значение измеряемой дифференциальной емкости. При этом необходимо отметить, что ловушки могут находиться не только в объеме барьерного слоя, но и на границе AlGaIn—GaIn. На рис. 1 это отражено введением сопротивления  $R_{\text{бар}}$  (определяет постоянный ток утечки) и цепочкой  $R_t—C_t$  (определяет процессы перезарядки ловушек). Именно наличие влияющих на емкость ловушек при измерении и может приводить к ее нестабильности. Для анализа распределения ловушек можно использовать стан-

дартную емкостную методику определения профиля заряженных центров или свободных носителей с измерением по последовательной схеме замещения [1]. В области обратных смещений, где приложенное напряжение полностью падает в барьерном слое, при малой концентрации свободных носителей в нем для заряженных ловушек  $N_{(x)}^-$  можно записать:

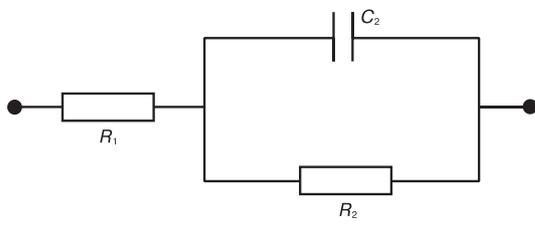
$$N_{(x)}^- = 2 \left( \epsilon \epsilon_0 q A^2 \frac{d \left( \frac{1}{C^2} \right)}{dU} \right)^{-1} \quad (2)$$

В случае слабого влияния утечек в барьерном слое уравнение (2) будет описывать распределение носителей заряда в канале квантовой ямы.

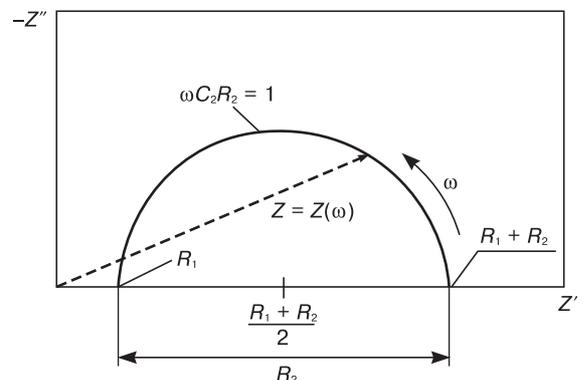
Если при протекании тока через барьерную структуру не происходит процесса перезарядки ловушек, то в эквивалентной схеме (см. рис. 1) и в уравнении (1) отсутствуют элементы  $C_t$  и  $R_t$ . Для анализа такой цепочки и понимания возможных причин появления нестабильности емкости полезно обратиться к известной взаимосвязи между активным и емкостными сопротивлениями высокоомных слоев в переменном электрическом поле. В частности, можно использовать построение годографа импеданса последовательной цепи [10, 11], т. е. зависимость

реактивного сопротивления  $Z'' = \frac{1}{\omega} C_{\text{сизм}}(\omega)$  от активного сопротивления  $Z' = R_{\text{сизм}}(\omega)$  при измерении в широком диапазоне частот.

На рис. 2 показан пример простейшей R—C—цепочки (а) и построенный для нее годограф (б) по последовательной схеме замещения при изменении частоты в диапазоне  $\omega = 0—\infty$ . В этом случае годографы имеют вид полуокружности, опирающейся на ось абсцисс (см. рис. 2, б). Если на годографе имеются участки  $Z''_i(Z')$  —  $Z''_{i+\Delta\omega}(Z')$ , которые можно рассматривать как дуги окружностей, то в этом диапазоне частот элементы эквивалентной цепи  $C_{\text{сизм}}$  и  $R_{\text{сизм}}$  и соответствующие  $R_{\text{бар}}$  и  $C_{\text{бар}}$  не зависят от частоты. Отклонение от формы дуги окружности может свидетельствовать о том, что указанные параметры цепи зависят от частоты или имеются дополнительные элементы цепи.



а



б

Рис. 2. Цепочка  $R_1—C_2—R_2$  (а) и годограф импеданса цепи при измерении в диапазоне  $\omega = 0$  до  $\infty$  (б)

Fig. 2. (а)  $R_1—C_2—R_2$  circuit and (б) hodograph of circuit impedance during measurement in range of  $\omega = 0$  to  $\infty$

### Образцы и методы исследования

Объектом исследования являлись как сами гетероструктуры AlGaN/GaN, так и кристаллы готовых НЕМТ–транзисторов, сформированные на нитридных гетероструктурах.

Исследовали гетероструктуры с верхним пассивирующим слоем  $i$ -GaN толщиной 1–2,5 нм. Толщина барьерного слоя AlGaN как принудительно легированного, так и нелегированного составляла 20–25 нм при мольном содержании Al 0,27–0,3. В качестве спейсерного слоя использовали слой AlN толщиной 1–2 нм, в качестве буферного — слой GaN толщиной 2,5–3 мкм. Изучали также кристаллы мощных AlGaN/GaN/SiC СВЧ–транзисторов X–диапазона с длиной затвора 0,25 мкм с разным числом пальцев и с металлизированным выводом области истока на обратную сторону подложки. В качестве исходных использовали гетероструктуры с верхним нелегированным слоем  $i$ -GaN (при толщине этого слоя от 2,0 до 5,0 нм) и слоями спейсеров разной толщины. Барьерным слоем является нелегированный слой AlGaN толщиной 15–20 нм. Эпитаксиальные слои всех гетероструктур AlGaN/GaN формировали MOCVD–технологией на подложках SiC с ориентацией рабочих поверхностей (0001). При формировании кристаллов приборов для создания омических контактов к областям стока и истока использовали композицию Ti–Al–Mo–Au или Ti–Al–Ni–Au. В качестве диэлектрических пассивирующих слоев применяли слои SiO<sub>2</sub> с отношением кислорода и азота в пределах 10–20 %.

Измерения ВФХ проводили на установке CSM/WIN System в диапазоне частот от 1 кГц до 1 МГц при планарном расположении измерительных зондов. В случае исследования исходных гетероструктур использовали ртутный зонд с диаметром 800 мкм. Площадь контакта второго зонда превышала площадь измерительного зонда в 38 раз. При емкостных измерениях на кристаллах приборов снимали ВФХ БШ областей затвор–сток и затвор–исток с помощью золотых зондов. Емкостные зависимости снимали как по параллельной (индекс «р»), так и по последовательной (индекс «s») схемам замещения с дополнительной оценкой изменения проводимости от частоты при параллельной схеме замещения и сопротивления от частоты при последовательной схеме замещения. По полученным ВФХ в ряде случаев с помощью уравнения (2) строили профили распределения заряда по глубине при разных частотах. Дополнительно, для уточнения расположения слоев по глубине в гетероструктурах и анализируемых кристаллах приборов проводили послойный элементный анализ основных элементов (Al, Ga, легирующей примеси Si) методом вторичной ионной масс–спектропии (ВИМС) на установке Cameca IMS 4f. При анализе диэлектрического барьерного слоя (при отсутствии легирования) для нейтрал-

зации заряда использовали низкоэнергетическую электронную пушку, в качестве первичных ионов — ионы Cs<sup>+</sup>. Глубину кратера распыления определяли с помощью оптического профилометра.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 3, а и 4, а показано полученное методом ВИМС распределение основных элементов (алюминия и галлия, а также кремния) по глубине в двух анализируемых гетероструктурах: стандартной с нелегированным слоем AlGaN и модельной с частично легированным кремнием барьерным слоем. На рис. 3, б и 4, б для этих двух структур показаны ВФХ, измеренные с помощью ртутного зонда на частотах от 10 кГц до 1 МГц. На рис. 3, в и 4, в приведено расположение по глубине структур проводящих каналов, полученных в соответствии с уравнением (2) из результатов  $C$ – $V$ –измерений. Для стандартной структуры с нелегированным барьерным слоем наблюдается хорошее совпадение расположения канала двумерного газа, полученного в результате обработки ВФХ и по данным ВИМС (см. рис. 3, а и в), а также хорошее соответствие толщины активных слоев гетероструктуры (ВИМС) толщинам этих слоев, указанным в сертификате. Анализ результатов емкостных измерений показал, что для структур с нелегированным барьерным слоем ВФХ имеют стандартный вид. Емкость барьерного слоя в аккумуляции составляет  $C_{\max} = 1900 \pm 2000$  пФ и практически равна  $C_{\text{расч}}$ , емкость в глубоком обеднении —  $C_{\min} = 2 \pm 3$  пФ (см. рис. 3, б).

В случае измерения гетероструктур с частично легированным кремнием барьерным слоем AlGaN (см. рис. 4, а) на ВФХ, как правило, при частотах измерения  $f < 200$  кГц наблюдался дополнительный пик в области перехода из зоны обогащения в зону обеднения с ростом величины этого пика при дальнейшем уменьшении частоты измерения (см. рис. 4, б).

Аналогичный пик наблюдали на ВФХ БШ систем затвор–сток и затвор–исток анализируемых НЕМТ–транзисторов при измерении по последовательной схеме замещения, в частности для системы затвор–сток на частотах  $< 200$ – $3000$  Гц для разных приборов (рис. 5, а и б и рис. 6, а). Эти приборы формировали на гетероструктурах со сложным профилем, в частности часть гетероструктур имела «толстые» верхние слои  $i$ -GaN (5 нм). При исследовании кристаллов транзисторов методом ВИМС в активных областях (слои металлизации предварительно удаляли) действительно было зафиксировано сильное обеднение приверхностной области (10 нм) алюминием.

На рис. 5 показаны результаты измерения по последовательной и параллельной схемам измерения ВФХ БШ областей затвор–сток анализируемых 6–пальцевых транзисторов, сформированных на гетероструктурах с «толстым» верхним слоем  $i$ -GaN (5 нм) и спейсерным слоем AlN. Характери-

стики сняты в диапазоне частот от 10 кГц до 1 МГц при напряжении смещения от  $-3,5$  до  $0$  В. По параллельной схеме замещения снимали также зависимости проводимости от напряжения смещения на разных частотах (см. рис. 5, в), по последовательной схеме — изменение сопротивления  $R_s$  от напряжения  $U_{\text{смещ.}}$ . Как видно из рис. 5, а и 6, а, при снятии ВФХ по последовательной схеме измерения на низких частотах ( $f < 200$  кГц) при  $U_{\text{смещ.}}$  от  $-2,0$  до  $-2,8$  В

наблюдается также появление характерного пика, аналогичного пику, обнаруженному при измерении на гетероструктурах с легированным барьерным слоем (см. рис. 4, б). При этом величина пика также увеличивалась с уменьшением частоты измерения. При использовании параллельной схемы измерения  $C_p$ — $V$ —кривые имели стандартную форму на всех частотах измерения (см. рис. 5, б), и только на самых низких частотах ( $f < 10$  кГц) было зафиксировано по-

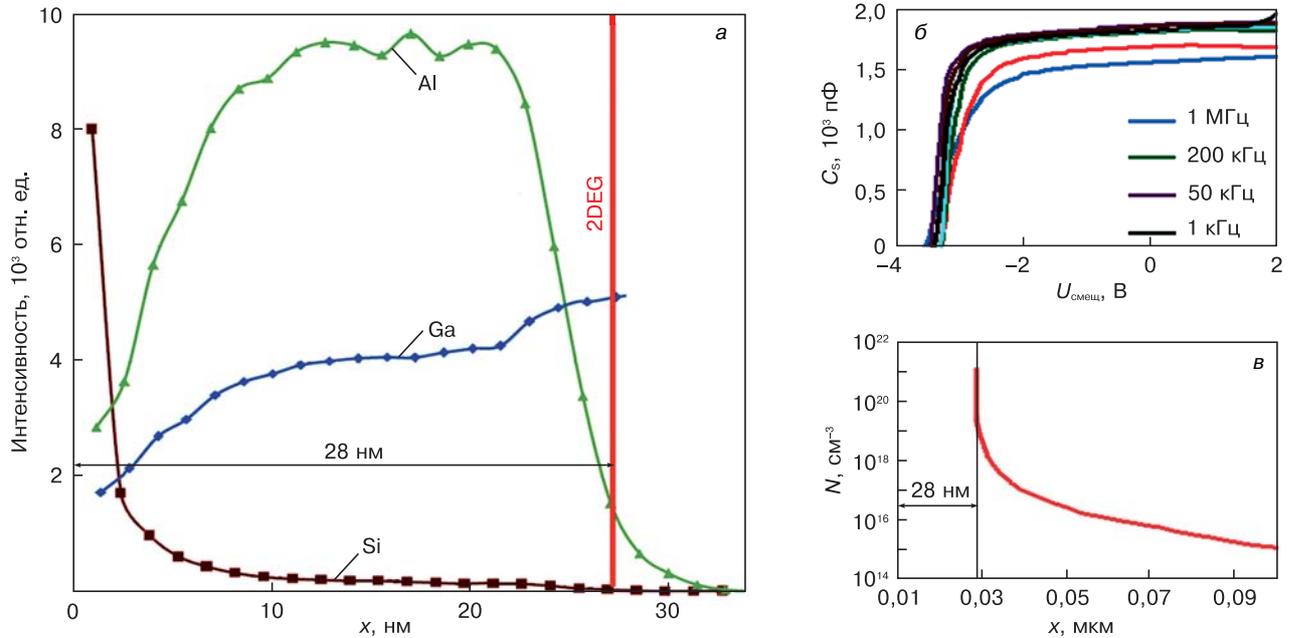


Рис. 3. Распределения Al, Ga и Si в стандартной гетероструктуре AlGaIn/GaN, полученные методом ВИМС (а), ВФХ гетероструктуры, измеренные при частотах от 1 кГц до 1 МГц (б) и распределение концентрации заряда по глубине (в)

Fig. 3. (a) Distributions of Al, Ga, and Si in standard AlGaIn/GaN heterostructure obtained using SIMS method, (б) CV of heterostructures measured at frequencies from 1 kHz to 1 MHz, and (в) charge depth profile

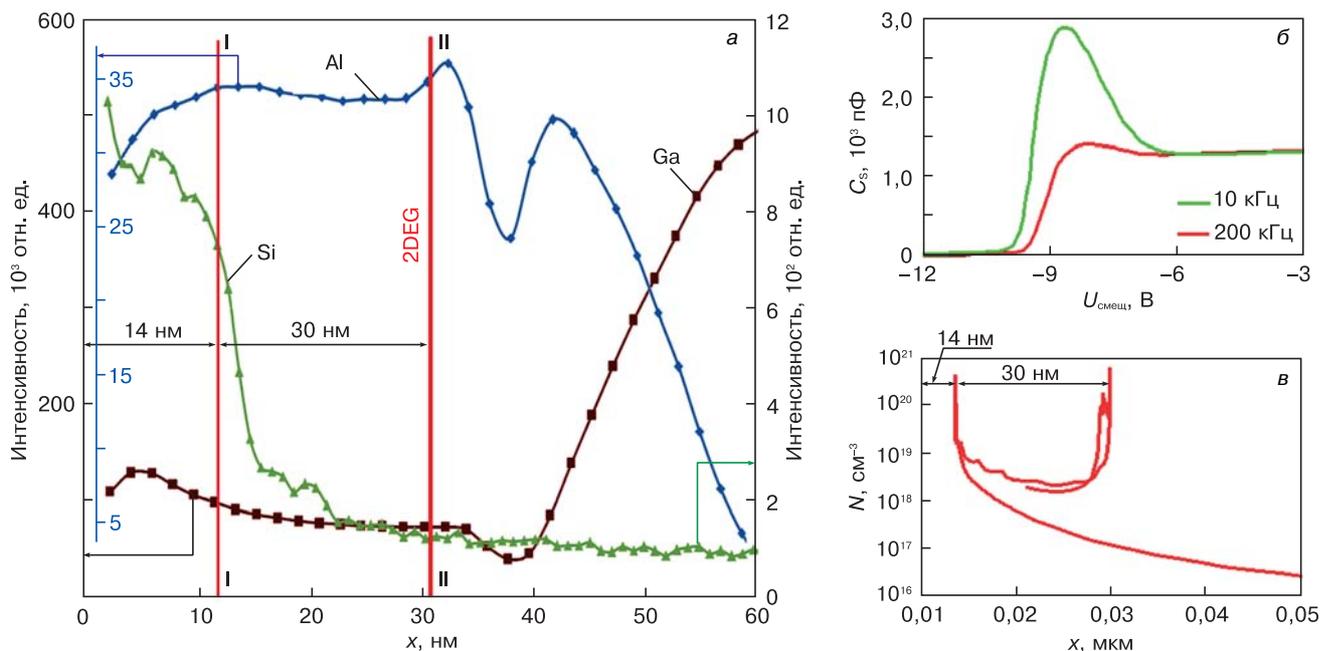


Рис. 4. Распределение Al, Ga и Si в модельной гетероструктуре AlGaIn/GaN с частично легированным барьерным слоем, полученное методом ВИМС (а), ВФХ гетероструктуры, измеренные при частотах от 10 до 200 кГц (б) и распределение концентрации заряда по глубине гетероструктуры (в)

Fig. 4. (a) Distributions of Al, Ga, and Si in model AlGaIn/GaN heterostructure with partially doped barrier layer obtained using SIMS method, (б) CV of heterostructure measured at frequencies from 10 to 200 kHz, and (в) charge depth profile of heterostructure.

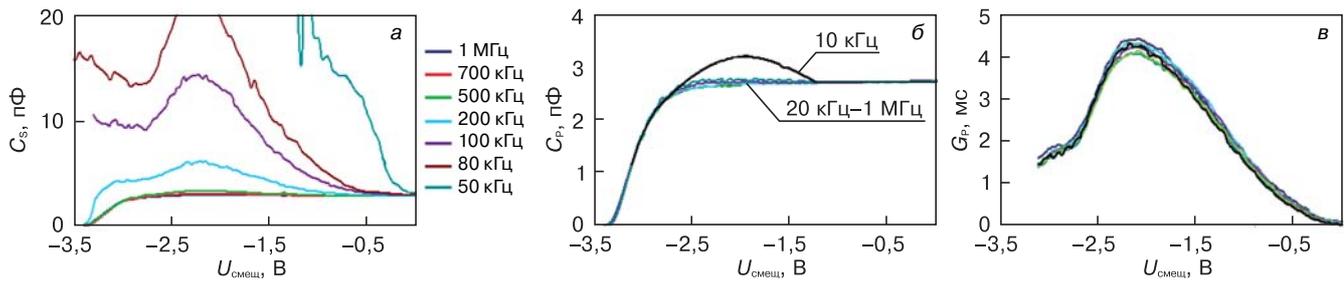


Рис. 5. ВФХ БШ системы затвор—сток кристалла 6–пальцевого HEMT–транзистора, измеренные по последовательной схеме в диапазоне частот от 50 кГц до 1 МГц (а), по параллельной схеме в диапазоне частот от 10 кГц до 1 МГц (б) и зависимость проводимости от напряжения смещения в диапазоне частот от 10 кГц до 1 МГц (в)

Fig. 5. (a) CV of gate–drain system of crystal of 6–finger HEMT–transistor measured according to sequential scheme in frequency range from 50 kHz to 1 MHz and (б) according to parallel scheme in frequency range from 10 kHz to 1 MHz and (в) dependence of conductivity on bias voltage in frequency range from 10 kHz to 1 MHz

явление характерных пиков. Однако в этом случае на кривых зависимости проводимости от напряжения смещения в этом же диапазоне частот фиксировали пик, высота которого у некоторых кристаллов приборов не менялась с частотой (см. рис. 5, в), а у некоторых, наоборот, резко возрастала с ростом частоты измерения (см. рис. 6, б). Наличие пиков проводимости при измерениях по параллельной схеме замещения наблюдали в работе [12]. Кроме того, при работе с транзисторами с большей шириной затвора (40–пальцевые транзисторы), помимо характерного пика на низких частотах, при использовании последовательной схемы измерения в области сильного обеднения ( $U_{\text{смещ}} = -7 \dots -3$  В) наблюдали рост емкости. Следует отметить также, что при частотах  $f = 6 \div 30$  кГц значение емкости, как правило, превышало значение емкости в режиме обогащения  $C_{s\text{max}}$  (см. рис. 6, а).

На рис. 7 показаны два вида годографов, построенные по экспериментальным результатам измерения  $C_s - V(f)$ – и  $R_s - V(f)$ –характеристик двух структур в диапазоне частот от 3 кГц до 1 МГц при различных напряжениях смещения. На рис. 7, а представлен годограф для одного из кристаллов транзисторов с малой высотой дополнительного пика нестабильности емкости, а на рис. 7, б — для структуры с большой высотой пика.

Как видно из рис. 7, для годографа на рис 7, а экспериментальные точки достаточно хорошо описываются элементами окружностей для напряжений

смещения в диапазоне  $U_{\text{смещ}} = -2 \dots -3$  В, т. е. в области пика нестабильной емкости. Однако у годографа на рис. 7, б для кристалла транзистора с высоким уровнем нестабильности емкости только до частот выше 50 кГц зависимости  $Z''$  ( $Z'$ ) достаточно хорошо описываются элементами окружностей, для низких частот наблюдается значительное отклонение от элементов дуги.

В случае опытного модельного образца с частично легированным барьерным слоем при измерении на низких частотах ( $f < 200$  кГц) на ВФХ в области перехода от обогащения к обеднению наблюдается характерный пик (см. рис. 4, б), высота которого растет с уменьшением частоты.

Ранее отмечали определенные сложности в интерпретации результатов по численной обработке ВФХ с использованием формулы (2). Тем не менее проведенная обработка ВФХ модельного образца показала наличие двух пиков концентрации зарядов, один из которых (с точностью  $\pm 1$  нм) совпадает с расположением границы легированного и нелегированного кремнием слоев AlGaIn (см. рис. 4, а, граница I—I). Расположение второго пика совпадает с расположением канала двумерного электронного газа в соответствии с данными ВИМС (см. рис. 3, граница II—II). Таким образом, проведенный совместный анализ исходных гетероструктур методом ВИМС и с помощью емкостных измерений подтвердил экспериментально, что наличие в барьерном слое области, легированной кремнием, приво-

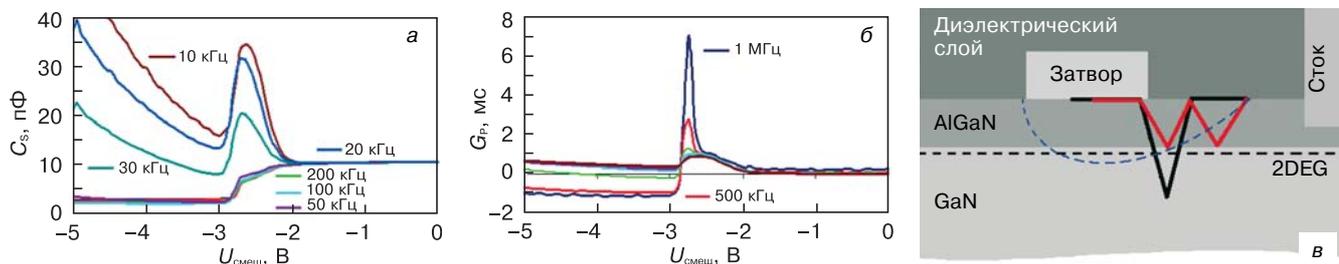


Рис. 6. ВФХ БШ системы затвор—сток 40–пальцевого кристалла HEMT–транзистора, измеренные по последовательной схеме замещения в диапазоне частот от 20 кГц до 1 МГц (а), зависимости проводимости от напряжения смещения в том же диапазоне частот (б) и схематическое изображение распределения электрического поля на краю затвора HEMT–транзистора (в). Пунктир — латеральное расширение области пространственного заряда под затвором по направлению к стоку

Fig. 6. (a) CV of gate–drain system of crystal of 40–finger HEMT–transistor measured according to sequential scheme in frequency range from 20 kHz to 1 MHz and (б) according to parallel scheme in same frequency range and (в) diagram of electric field distribution at edge of gate of HEMT–transistor. Dashed line represents lateral expansion of space charge field under gate towards drain

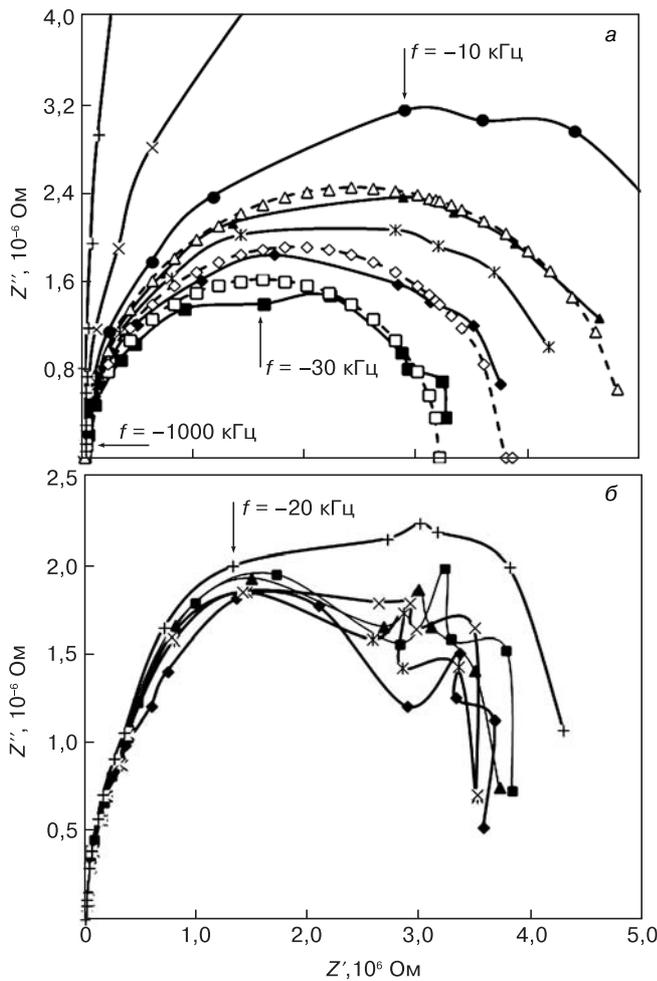


Рис. 7. Годографы импеданса последовательной  $C_sR_s$ -цепочки при различном напряжении смещения, построенные по экспериментальным результатам для БШ системы затвор—сток для двух кристаллов 6-пальцевого HEMT-транзистора:  
 а: ■ —  $U_{смещ} = -3,1$  В; ◆ —  $-2,79$  В; ▲ —  $-2,201$  В; \* —  $-2,387$  В; ● —  $-1,984$  В; □ —  $y_1 = -3,1$  В; ◇ —  $y_2 = -2,79$  В; △ —  $y_3 = -2,2$  В; × —  $y_4 = -1,581$  В; + —  $y_5 = -0,992$  В;  
 б: ◆ —  $U_{смещ} = -3$  В; ■ —  $-2,8$  В; ▲ —  $-2,6$  В; \* —  $-2,418$  В; × —  $-2,17$  В; + —  $-2,015$  В.  
 ■, ◆, ▲, \*, ● — годографы при различных напряжениях смещения; □, ◇, △, ×, + — расчетные элементы окружностей (подгонка по начальным частотным токам)

Fig. 7. Impedance hodographs of sequential  $C_sR_s$ -circuit at various bias voltages plotted according to experimental results for gate-drain SB system for two crystals of 6-finger HEMT-transistor: (a) ■ —  $U_{bias} = -3,1$  V; ◆ —  $-2,79$  V; ▲ —  $-2,201$  V; \* —  $-2,387$  V; ● —  $-1,984$  V; □ —  $y_1 = -3,1$  V; ◇ —  $y_2 = -2,79$  V; △ —  $y_3 = -2,2$  V; × —  $y_4 = -1,581$  V; + —  $y_5 = -0,992$  V; (b) ◆ —  $U_{bias} = -3$  V; ■ —  $-2,8$  V; ▲ —  $-2,6$  V; \* —  $-2,418$  V; × —  $-2,17$  V; + —  $-2,015$  V. ■, ◆, ▲, \*, ● are hodographs at various bias voltages and □, ◇, △, ×, + are calculated elements of circumferences (adjustment by initial frequency currents)

дит к появлению второго пика зарядов (см. рис. 4, в), по-видимому, связанного с ловушками, на границе легированной и нелегированной областей барьерного слоя (см. рис. 4, а, граница II—II). Наличие этого пика приводило к появлению при измерении на низких частотах характерного пика на ВФХ в области перехода от обогащения к обеднению (см. рис. 4, в). В данном случае появление у образца, легированного кремнием, пика концентрации ловушек можно объяснить следующим образом.

Как известно [13], ионное легирование может создавать в материале опережающий фронт собственных точечных дефектов. Наличие таких дефектов при последующих активирующих отжигах гетероструктур может приводить к формированию цепочки дефектных образований. Эти дефектные центры в барьерном слое могут быть глубокими ловушечными центрами. Временная постоянная этих центров такая, что они начинают проявляться на низких частотах измерения, формируя в барьерном слое заряд, обеспечивающий приращение емкости.

Наблюдаемый спад емкости при возрастании обеднения, вероятно, связан с перераспределением напряжения между каналом и барьерным слоем. По мере возрастания обедняющего напряжения (по абсолютной величине) скорее всего происходит обеднение канала свободными носителями, увеличение падения напряжения в области пространственного заряда квантовой ямы, уменьшение тока через структуру и, следовательно, уменьшение дополнительного заряда. Если ловушки являются глубокими центрами, то их вклад в измеряемую емкость должен приводить к частотной зависимости измеряемых сопротивлений и емкости.

С другой стороны, причиной появления пика нестабильности емкости при измерении по последовательной схеме замещения могут быть токи утечки в барьерном слое, которые могут быть связаны с наличием цепочки тех же самых дефектов на границе легированный—нелегированный слой в барьерном слое. Эти дефекты могут выступать в качестве токопроводящих прослоек или приводить к возникновению прыжковой проводимости в слое AlGaIn.

Как уже отмечалось выше, построение годографа импеданса  $RC$ -цепи позволяет понять взаимосвязь изменения активного и реактивного сопротивлений структур при измерении по последовательной схеме замещения при разных частотах и разном напряжении смещения. При этом можно оценить степень влияния генерационно-рекомбинационных процессов на значения  $R_{бар}$  и  $C_{бар}$ , т. е. определить зависимости этих параметров эквивалентной схемы от частоты. Как видно из рис. 7, а, для одной из структур в диапазоне от 3 кГц до 1 МГц годографы хорошо описываются элементами окружности для напряжений смещения, при которых наблюдается пик нестабильности. Следовательно, в появлении пика основную роль играют токи утечки. Как видно из рис. 7, б, на высоких частотах от 30 кГц до 1 МГц годографы достаточно хорошо описываются элементами окружности, и здесь преобладающую роль играют токи утечки. Следовательно эти параметры не зависят от частоты, но в диапазоне частот  $f = 3-30$  кГц возможно влияние генерационно-рекомбинационных процессов в барьерном слое.

Таким образом, появление пика нестабильности на высоких частотах связано в большей степени с наличием токов утечки в барьерном слое. На более

низких частотах дефекты в барьерном слое в зависимости от качества гетероструктур могут как приводить к появлению токов утечки, так и влиять на генерационно–рекомбинационные процессы. В работе [14] показано, что глубокие уровни могут даже приводить к гистерезису ВФХ нитридных гетероструктур.

Формирование аналогичного характерного пика на  $C-V$ -кривых было зафиксировано также при измерении гетероструктур  $i-GaN/AlGaN/GaN$  с «толстым» ( $>5$  нм) верхним слоем  $i-GaN$ , что, по-видимому, связано с формированием второго встречного канала двумерного электронного газа на границе  $i-GaN/AlGaN$ . На этой границе имеется масса локализованных граничных состояний, которыми могут быть в области интерфейса  $i-GaN-AlGaN$ : дефекты структуры, атомы примеси, границы зерен в GaN. Известно, например, что дислокации и границы зерен в GaN отрицательно заряжены [15]. Также известно о сегрегации кислорода на протяженных дефектах в GaN [15]. В работе [16] указывается, что плотность таких локализованных состояний в области границ может достигать  $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , а в работе [17] рассмотрено явление захвата электронов в барьерный слой из пассивирующего слоя диэлектрика с образованием дополнительного канала проводимости. Однако причины появления нестабильности емкости у гетероструктур с «толстым» слоем  $i-GaN$  до сих пор не понятны и требуется дальнейший анализ.

Наблюдаемое резкое возрастание емкости на ВФХ БШ систем затвор–сток и затвор–исток на более низких частотах при очень сильном обеднении ( $U_{\text{смещ}} > -5$  В) (см. рис. 6, а) было зафиксировано только на БШ кристаллов приборов и никогда не наблюдалось при емкостных измерениях исходных гетероструктур. Причем значение емкости при измерении на более низких частотах ( $f < 100$  кГц) могло превышать значение емкости в обогащении (см. рис. 6, а). По-видимому, это связано с латеральным расширением области пространственного заряда при сильном обеднении от затвора в сторону областей стока. В транзисторах это может приводить к резкому возрастанию электрического поля на краю затвора по направлению к области стока (см. рис. 6, в). Однако для корректного объяснения факта возрастания емкости в сильном обеднении при низких частотах при  $C-V$ -измерениях необходимо проведение дальнейших исследований.

### Заключение

Проанализированы возможные причины появления нестабильности емкости в виде возникновения на ВФХ характерного пика возрастания емкости у гетероструктур с легированным кремнием барьерным слоем и у структур с «толстым» нелегированным верхним слоем  $i-GaN$ , а также у ряда кристаллов НЕМТ–транзисторов.

Показано, что одной из возможных причин возникновения нестабильности емкости при измерении на частотах более 30 кГц являются утечки в виде сквозных токов через барьерный слой. Другой возможной причиной, особенно при измерении на частотах менее 20 кГц, могут являться ловушки (генерационно–рекомбинационные центры) в барьерном слое и на границе  $AlGaN-GaN$ , дающие вклад в емкостные измерения.

Экспериментально продемонстрирована возможность использования годографа импеданса  $RC$ -цепи для определения причин появления нестабильности при емкостных измерениях.

### Библиографический список

1. **Зубков, В. И.** Диагностика гетероструктур с квантовыми ямами  $In_xGa_{1-x}As/GaAs$  методом вольт–фарадных характеристик: разрыв зон, уровни квантования, волновые функции / В. И. Зубков // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41, вып. 3. – С. 331–337.
2. **Солтанович, О. А.** Частотные и температурные зависимости вольт–фарадных характеристик светоизлучающих структур  $InGaN/GaN$  с множественными квантовыми ямами / О. А. Солтанович, Н. М. Шмидт, Е. Б. Якимов // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45, вып. 2. – С. 226–229.
3. **Солтанович, О. А.** Анализ температурных зависимостей вольт–фарадных характеристик светоизлучающих структур  $InGaN/GaN$  с множественными квантовыми ямами / О. А. Солтанович, Е. Б. Якимов // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46, вып. 12. – С. 1597–1603.
4. **Liu, W. L.** Capacitance–voltage spectroscopy of trapping states in  $GaN/AlGaN$  heterostructure field–effect transistors / W. L. Liu, Y. L. Chen, A. A. Balandin, K. L. Wang // J. Nanoelectron. Optoelectron. – 2006. – V. 1, N 2. – P. 258–263. DOI: 10.1166/jno.2006.212
5. **Антонова, И. В.** Глубокие уровни и электронный транспорт в гетероструктурах  $AlGaN/GaN$  / И. В. Антонова, В. И. Поляков, А. И. Руковишников, В. Г. Мансуров, К. С. Журавлев // Физика и техника полупроводников. – 2008. – Т. 42, вып. 1. – С. 53–59.
6. **Енишерлова, К. Л.** Исследование влияния пассивирующих слоев на емкостные характеристики гетероструктур  $AlGaN/GaN$  / К. Л. Енишерлова, В. В. Горячев, Т. Ф. Русак С. А. Капилин // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2015. – Т. 18, № 2. – С. 137–145. DOI: 10.17073/1609-3577-2015-2-137-145
7. Gallium Nitride (GaN): Physics, Devices and Technology / Ed. by F. Medjdoub. – Boca Raton; London; New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. – 388 p.
8. **Subramani, N. K.** A Physics based analytical model and numerical simulation for current–voltage characteristics of microwave power  $AlGaN/GaN$  HEMT / N. K. Subramani, J.–C. Nallatamby, A. K. Sahoo, R. Sommet, R. Quéré, B. Bindu. URL: [https://www.researchgate.net/profile/Nandhakumar\\_Subramani/publication/312377111\\_A\\_Physics\\_Based\\_Analytical\\_Model\\_and\\_Numerical\\_Simulation\\_for\\_Current-Voltage\\_Characteristics\\_of\\_Microwave\\_Power\\_AlGaNGaN\\_HEMT/links/587c852808ae4445c06733c0.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Nandhakumar_Subramani/publication/312377111_A_Physics_Based_Analytical_Model_and_Numerical_Simulation_for_Current-Voltage_Characteristics_of_Microwave_Power_AlGaNGaN_HEMT/links/587c852808ae4445c06733c0.pdf)
9. **Брудный, В. Н.** Электронные свойства и глубокие ловушки облученного электронами  $n-GaN$  / В. Н. Брудный, С. С. Веревкин, А. В. Говорков, В. С. Ермаков, Н. Г. Колин, А. В. Корулин, А. Я. Поляков, Н. Б. Смирнов // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46, вып. 4. – С. 450–456.
10. **Поклонский, Н. А.** Основы импедансной спектроскопии композиций: курс лекций / Н. А. Поклонский, Н. И. Горбачук.– Минск: БГУ, 2005. – 103 с.
11. **Гусев, В. А.** Основы диэлектрической спектроскопии: учебное пособие / В. А. Гусев. – Казань: КГУ, 2008. – 112 с.
12. **Polyakov, A. Y.** Admittance spectra studies of quantum well states in  $AlGaN/AlN/GaN$  heterojunctions / A. Y. Polyakov, N. B. Smirnov, A. V. Govorkov, E. A. Kozhukhova, S. J. Pearson, F. Ren, S. Yu. Karpov, K. D. Shchepochev, W. Lim // ECS J. Solid State Sci. Technol. – 2012. – V. 1, N 3. – P. P152–P156. DOI: 10.1149/2.019203jss

13. Комаров, Ф. Ф. Дефекты структуры в ионноимплантированном кремнии / Ф. Ф. Комаров, А. П. Новиков, В. С. Соловьев, С. Ю. Ширяев. – Мн: Университетское, 1990. – 320 с. (С. 21—47).

14. Polyakov, A. Y. Deep traps responsible for hysteresis in capacitance–voltage characteristics of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructure transistors / A. Y. Polyakov, N. B. Smirnov, A. V. Govorkov, A. V. Markov, A. M. Dabiran, A. M. Wowchak, A. V. Osinsky, B. Cui, P. P. Chow, S. J. Pearton // *Appl. Phys. Lett.* – 2007. – V. 91, iss. 23. – P. 232116–1–3. DOI: 10.1063/1.2823607

15. Бочкарева, Н. И. Влияние состояний на границах раздела на емкость и эффективность электролюминесценции InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>–световодов / Н. И. Бочкарева, Е. А. Жирнов, А. А. Ефремов,

Ю. Т. Ребане, Р. И. Горбунов, А. В. Клочков, Д. А. Давринович, Ю. Г. Шпретер // *Физика и техника полупроводников.* – 2005. – Т. 39, вып. 7. – С. 829—833.

16. Morkoc, H. Handbook of Nitride Semiconductors and Devices. Vol. 1: Materials Properties, Physics and Growth / H. Morkoc. – Weinheim: Wiley–VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, 2008. – 1311 p. (P. 817—1010). DOI: 10.1002/9783527628438

17. Stradiotto, R. On the fly characterization of charge trapping phenomena at Ga<sub>N</sub>/dielectric and Ga<sub>N</sub>/AlGa<sub>N</sub>/dielectric interfaces using impedance measurements / R. Stradiotto, G. Pobegen, C. Ostermaier, T. Grasser // 45th European Solid State Device Research Conference (ESSDERC). – Graz (Austria): IEEE, 2015. – P. 72—75. DOI: 10.1109/ESSDERC.2015.7324716

ISSN 1609–3577 *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronic Technics.* 2016, vol. 19, no. 2, pp. 115–123.

**The instability of the CV characteristics capacitance when measuring AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>–heterostructures and the HEMT–transistors based on them**

K. L. Enisherlova<sup>1\*)</sup>, V. G. Goryachev<sup>1</sup>, V. V. Saraykin<sup>1</sup>, S. A. Kapilin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC «S&PE «Pulsar»,  
27 Okružnoi proezd, Moscow 105187, Russia

**Abstract.** A complex of studies of the AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructures and the AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>/SiC HEMT–transistors Schottky barriers has been carried out by the C–V method and the SIMS method in order to determine the causes of the capacitance instability in some cases was made. It is shown that in most cases, the appearance of a capacitance peak on the C–V curves at frequencies 20–500 kHz was associated with the presence of leakage currents in the barrier layer and at low frequencies 1–20 kHz with generation–recombination centers.

**Keyword:** AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructures, Schottky barriers, HEMT–transistors, C–V method, sequential and parallel substitution schemes, hodograph of the circuit impedance, generation–recombination centers.

*References*

1. Zubkov V. I. Characterization of In<sub>x</sub>Ga<sub>1–x</sub>As/GaAs quantum–well heterostructures by C–V measurements: Band offsets, quantum–confinement levels, and wave functions. *Semiconductors.* 2007, vol. 41, no. 3, pp. 320—326. DOI: 10.1134/S1063782607030153

2. Soltanovich O. A., Yakimov E. B., Shmidt N. M. Frequency and temperature dependences of capacitance–voltage characteristics of InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> light–emitting structures with multiple quantum wells. *Semiconductors.* 2011, vol. 45, no. 2, pp. 221—224. DOI: 10.1134/S1063782611020205

3. Soltanovich O. A., Yakimov E. B. Analysis of temperature dependence of capacitance–voltage characteristics of InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> multiple quantum well light–emitting structures. *Semiconductors.* 2013, vol. 47, no. 1, pp. 162—168. DOI: 10.1134/S1063782612120147

4. Liu W. L., Chen Y. L., Balandin A. A., Wang K. L. Capacitance–voltage spectroscopy of trapping states in Ga<sub>N</sub>/AlGa<sub>N</sub> heterostructure field–effect transistors. *J. Nanoelectron. Optoelectron.* 2006, vol. 1, no. 2, pp. 258—263. DOI: 10.1166/jno.2006.212

5. Antonova I. V., Mansurov V. G., Zhuravlev K. S., Polyakov V. I., Rukavishnikov A. I. Deep levels and electron transport in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructures. *Semiconductors,* 2008, vol. 42, no. 1, pp. 52—58. DOI: 10.1007/s11453-008-1007-z

6. Enisherlova K. L., Goryachev V. G., Rusak T. F., Kapilin S. A. Investigation of the passivation layers influence on capacitance characteristics of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructures. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering.* 2015, vol. 18, no. 2, pp. 137—145. (In Russ.). DOI: 10.10703/1609-3577-2015-2-137-145

7. Gallium Nitride (Ga<sub>N</sub>): Physics, Devices and Technology. Ed.

by F. Medjdoub. Boca Raton; London; New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. 388 p.

8. Subramani N. K., Nallatamby J.–C., Sahoo A. K., Sommet R., Quéré R., Bindu B. A physics based analytical model and numerical simulation for current–voltage characteristics of microwave power AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT. Available at: [https://www.researchgate.net/profile/Nandhakumar\\_Subramani/publication/312377111\\_A\\_Physics\\_Based\\_Analytical\\_Model\\_and\\_Numerical\\_Simulation\\_for\\_Current-Voltage\\_Characteristics\\_of\\_Microwave\\_Power\\_AlGaN-GaN\\_HEMT/links/587c85280ae4445c06733c0.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Nandhakumar_Subramani/publication/312377111_A_Physics_Based_Analytical_Model_and_Numerical_Simulation_for_Current-Voltage_Characteristics_of_Microwave_Power_AlGaN-GaN_HEMT/links/587c85280ae4445c06733c0.pdf)

9. Brudnyi V. N., Verevkin S. S., Ermakov V. S., Kolin N. G., Korulin A. V., Govorkov A. V., Polyakov A. Y., Smirnov N. B. Electronic properties and deep traps in electron–irradiated n–Ga<sub>N</sub>. *Semiconductors,* 2012, vol. 46, no. 4, pp. 433—439. DOI: 10.1134/S1063782612040045

10. Poklonskii N. A., Gorbachuk N. I. *Osnovy impendansnoi spektroskopii kompozitov* [Fundamentals of impedance spectroscopy of composites]. Minsk: BGU, 2005. 103 p. (In Russ.)

11. Gusev V. A. *Osnovy dielektricheskoi spektroskopii* [Fundamentals of dielectric spectroscopy]. Kazan: KGU, 2008. 112 p. (In Russ.)

12. Polyakov A. Y., Smirnov N. B., Govorkov A. V., Kozhukhova E. A., Pearton S. J., Ren F., Karpov S. Yu., Shchebachev K. D., Lim W. Admittance spectra studies of quantum well states in AlGa<sub>N</sub>/Al<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterojunctions. *ECS J. Solid State Sci. Technol.,* 2012, vol. 1, no. 3, pp. P152—P156. DOI: 10.1149/2.019203jss

13. Komarov F. F., Novikov A. P., Solov'ev V. S., Shiryaev S. Yu. *Defekty struktury v ionnoimplantirovanom kremnii* [Defects of the structure in ion–implanted silicon]. Minsk: Universitetskoe, 1990. 320 p. (In Russ.)

14. Polyakov A. Y., Smirnov N. B., Govorkov A. V., Markov A. V., Dabiran A. M., Wowchak A. M., Osinsky A. V., Cui B., Chow P. P., Pearton S. J. Deep traps responsible for hysteresis in capacitance–voltage characteristics of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructure transistors. *Appl. Phys. Lett.,* 2007, vol. 91, no. 23, pp. 232116–1–3. DOI: 10.1063/1.2823607

15. Bochkareva N. I., Rebane Yu. T., Gorbunov R. I., Klouchkov A. V., Lavrinovich D. A., Shreter Yu. G., Zhirnov E. A., Efremov A. A. The effects of interface states on the capacitance and electroluminescence efficiency of InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> light–emitting diodes. *Semiconductors,* 2005, vol. 39, no. 7, pp. 795—799. DOI: 10.1134/1.1992637

16. Morkoc H. *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices.* Vol. 1: Materials Properties, Physics and Growth. Weinheim: Wiley–VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, 2008. 1311 p. DOI: 10.1002/9783527628438.ch4

17. Stradiotto R., Pobegen G., Ostermaier C., Grasser T. On the fly characterization of charge trapping phenomena at Ga<sub>N</sub>/dielectric and Ga<sub>N</sub>/AlGa<sub>N</sub>/dielectric interfaces using impedance measurements. *45th European Solid State Device Research Conference (ESSDERC).* Graz (Austria): IEEE, 2015. Pp. 72—75. DOI: 10.1109/ESSDERC.2015.7324716

**Information about authors:**

**Kira L. Enisherlova<sup>1\*)</sup>** — Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory (Enisherlova@pulsarnpp.ru); **Vladimir G. Goryachev<sup>1</sup>** — Senior Researcher; **Vladimir V. Saraykin<sup>1</sup>** — Senior Researcher; **Semen A. Kapilin<sup>1</sup>** — Engineer.

\*) Corresponding author