МИКРОЭЛЕКТРОНИКА, 2019, том 48, № 1, с. 47–55

ПРИБОРЫ

УДК 621.382

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ С ГЛУБОКИМИ УРОВНЯМИ НА *C-V*-ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЩНЫХ AlGaN/GaN/SiC HEMT

© 2019 г. К. Л. Енишерлова[1, *], Ю. В. Колковский[1], Е. А. Боброва[1], Э. М. Темпер[1], С. А. Капилин[1]

[1]АО "НПП Пульсар"
Россия, 105187, Москва, Окружной поезд 27
*E-mail: Enisherlova@pulsarnpp.ru

Поступила в редакцию 09.06.2018 г.
После доработки 09.06.2018 г.
Принята к публикации 09.06.2018 г.

Исследовались вольт-фарадные (*C-V*)-характеристики областей затвор–сток кристаллов мощных СВЧ HEMT транзисторов с большой периферией затвора *S*- и *X*-диапазона с пробивным напряжением исток-сток V_{DS} от 30 до 150 В, а так же тестовые диоды Шоттки, сформированные в едином технологическом цикле с HEMT. Методом емкостной релаксационной спектроскопии глубоких уровней (**DLTS**) исследовались структурные дефекты, формирующие глубокие уровни. В процессе исследования показано, что у кристаллов HEMT на *C-V*-кривых всегда наблюдались два участка изменения емкости с разными углами наклона и отсутствие таких перегибов у тестовых БШ. Методом DLTS у HEMT и тестовых БШ обнаружены электронно-подобные и дырочно-подобные ловушки, находящиеся, скорее всего, в буферном слое, а также обнаружен пик дырочного типа с аномальным поведением. Перегиб на *C-V*-кривых HEMT связан с высокими электрическими полями, возникающими на краю затвора транзисторных структур.

DOI: 10.1134/S0544126919010046

ВВЕДЕНИЕ

Для электронных приборов, сформированных на широкозонных нитридных гетероструктурах, весьма актуальна проблема захвата носителей заряда на различных структурных дефектах, создающих глубокие уровни (**ГУ**) в запрещенной зоне полупроводников. Интерес к дефектам такого рода в настоящее время возрос, так как захват носителей заряда вблизи канала транзистора на ловушках в структурах AlGaN/GaN может уменьшить уровень тока стока транзистора до 90% [1]. Захват носителей заряда на ГУ является одним из главных факторов, определяющих работоспособность и надежность HEMT-транзисторов при работе на высоких частотах и высоких мощностях [1–3]. На данном этапе имеется много работ по исследованию ловушечных состояний как на границе AlGaN/GaN, так и в объеме барьерного (AlGaN) и буферного (GaN) слоев, изменяющих плотность двумерного газа в канале; определены их основные параметры: энергия активации, сечение захвата, концентрация [1–6]. Значительные успехи достигнуты в изучении поведения собственных точечных дефектов и таких примесей, как углерод, кислород, водород, которые могут вводиться в материал в процессе эпитаксиального роста слоев AlGaN и GaN [6]. При высокой плотности дислокаций в таких эпитаксиальных слоях надо так же учитывать, что собственные точечные дефекты и многие примеси могут декорировать дислокации, формируя целый спектр дефектов. В частности считается, что дислокации, имеющие краевую компоненту, отрицательно заряжены, в то время как чистые винтовые дислокации, ответственные за токи утечек, не заряжены [6, 7]. Комплексы вакансии галлия с тремя атомами кислорода, сегрегирующие на выходах винтовых дислокаций, нейтральны и могут стабилизировать поверхность, в то же время вакансии галлия с кислородом, образуя комплекс $(V_{Ga}–O)^{-2}$, могут формировать ГУ в *n*-GaN с энергией активации E_V + (1.1–1.2 эВ) [6].

Наблюдение с использованием микроскопа атомных сил (C-ACM, conductive atomic force microscope) локальных участков высокой плотности дислокаций показали, что скопления краевых дислокаций окружены областью отрицательного заряда, а повышенная плотность винтовых дислокаций, как правило, приводит к более высоким токам утечки в гетероструктурах [7]. Надо учитывать, что процесс формирования современных HEMT и HEMT-MIS приборов – это сложный комплекс ряда технологических операций, вклю-

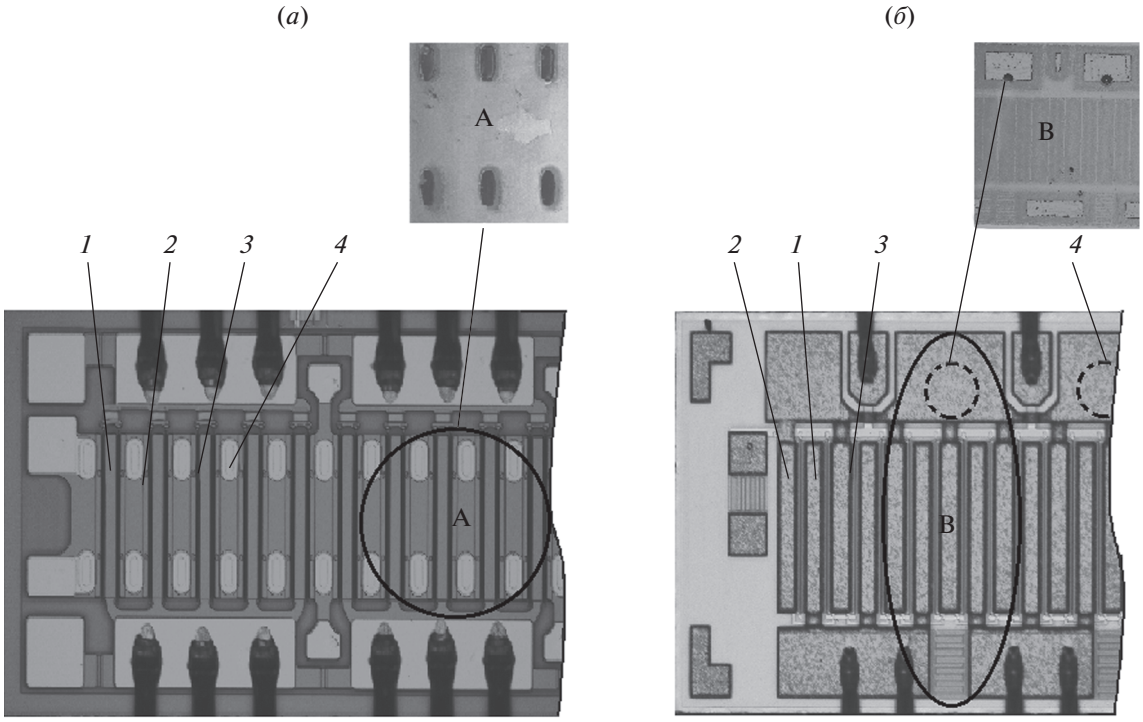

Рис. 1. Вид участков анализируемых структур: *а* – HEMT-1; *б* – HEMT-2. Вставка A и B: фрагменты рабочих областей транзисторов после удаления слоев металлизации и пассивации: *1* – сток; *2* – исток; *3* – затвор; *4* –металлизированные отверстия выводов контактов к истоку.

чая и высокотемпературные, которые могут приводить к возникновению новых структурных дефектов с ГУ, а также могут приводить к трансформации дефектов, имеющихся в слоях и на границах раздела слоев. Поэтому представляет интерес исследование возможной трансформации дефектов гетероструктур в процессе формирования элементов HEMT. Для оценки изменения зарядового состояния дефектов в приборных структурах, сформированных на нитридных эпитаксиальных слоях, обычно используется метод *C-V*-характеристик при различных частотах, позволяющий оценивать распределение электрического заряда в объеме и на границах слоев гетероструктур. Для определения параметров ловушечных состояний, связанных с ГУ, используются токовая и емкостная спектроскопия глубоких уровней (**DLTS**), а также оптическая спектроскопия глубоких уровней (**DLOS**) [6, 8].

Цель данной работы – исследование особенностей *C-V*-характеристик областей затвор–сток AlGaN/GaN/SiC HEMT транзисторов с учетом их конструктивно-технологических особенностей и тестовых диодов Шоттки, сформированных в едином технологическом цикле с HEMT, а также влияние на емкостные характеристики дефектов с ГУ в активных областях исследуемых приборных структур.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовались кристаллы мощных СВЧ-транзисторов с большой периферией затвора (long gate periphery) *S*- и *X*-диапазона с длиной затвора 0.4 мкм, с пробивным напряжением сток–исток V_{DS} от 80 до 150 В, шириной затвора одного пальца – 400 мкм, количеством пальцев (fingers) (от 60 до 80) и планарным расположением контактных окон к областям исток, затвор, сток. Транзисторы отличались конструктивно-технологическими особенностями, в частности, расположением металлизированных отверстий выводов контактов к областям истока (рис. 1), конструкцией полевых электродов (**FP**).

Транзисторы с металлизированными выводами на обратную сторону структур, расположенными практически в активных областях приборов (рис. 1*а*), условно были обозначены как HEMT-1; транзисторы с металлизированными выводами, вынесенными из активных областей приборов (рис. 1*б*), были обозначены как HEMT-2. Транзисторы были изготовлены на гетероструктурах GaN/AlGaN/GaN, выращенных MOCVD-технологией на подложках SiC с ориентацией рабочих поверхностей (0001), с барьерным слоем AlGaN толщиной 180–200 мкм при мольной доле алюминия 0.26–0.3 и спейсером толщиной 20–25 Å. Гетероструктуры этих двух видов транзисторов отличались толщиной слоев GaN: транзисторы HEMT-1

имели толщину буферного слоя – 2–2.5 мкм, HEMT-2 – 1.5–1.7 мкм.

В качестве объектов исследования были выбраны также тестовые круглые структуры с диодом Шоттки. Такие тестовые структуры формировались на тех же гетероструктурах, что и исследуемые HEMT транзисторы и в том же технологическом процессе при напылении металлов затвора (Ni/Ti/Au). Омические контакты к тестовым диодам формировались одновременно с изготовлением омических контактов к областям истока и стока HEMT. Площадь тестовых БШ составляла 7×10^{-5} см^2. В качестве пассивирующих слоев в исследуемых транзисторах и тестовых структурах использовались толстые слои Si_3N_4 и SiN_x.

В ходе исследования измерялись также HEMT-транзисторы с меньшими длиной (0.25 мкм), и шириной затвора (количеством пальцев от 6 до 40 штук).

Измерение вольт-фарадных характеристик проводилось на установке CSM/WIN System в диапазоне частот от 10 кГц до 1 МГц, при планарном расположении измерительных зондов на контактных окнах транзисторов и тестовых элементов. Емкостные зависимости снимались как по параллельной (индекс-*p*), так и по последовательной (индекс-*s*) схемам замещения с дополнительной оценкой изменения проводимости и сопротивления от частоты. При емкостных измерениях на кристаллах приборов записывались *C-V*-характеристики областей затвор–сток без приложения напряжения между истоком и стоком. Для некоторых исследуемых транзисторов *C-V*-характеристики записывались при разных температурах: 291, 323, 363, 473 K.

Методом емкостной релаксационной спектроскопии глубоких уровней исследовался спектр ГУ. Для выбора режима измерений спектра ГУ HEMT-структур и тестовых барьеров Шоттки измерялись *C-V*-характеристики при температурах 80, 300, 380 K.

При записи спектров DLTS использовалось стробирование сигнала релаксации емкости в моменты времени 4–8–16–32–64 мс при однократном сканировании по температуре. Энергия активации и сечение захвата определялись по зависимости Аррениуса. На основе *C-V*-характеристик выбиралось исходное смещение на структуре. Использовались импульсы инжекции с разной полярностью, так как возможны разные механизмы заполнения ловушек (туннелирование и др.) в зависимости от режима записи. Импульс инжекции имел длительность не более 89 мс.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Практически у всех исследуемых транзисторов ($C_{мах}$ от 2.5 до 75 пФ) на *C-V*-кривых в области перехода от обогащения к обеднению наблюдались ступенька и два участка изменения емкости с разными углами наклона кривой (рис. 2). Использование двух схем измерения *C-V*-характеристик показало совпадение величин емкости C_s и C_p (рис. 2) и отсутствие частотной дисперсии на верхнем плато в интервале напряжений от 0 до –1.5 В, что свидетельствует об отсутствии влияния на результаты этих измерения поверхностных состояний на границе раздела полупроводник/пассивация [9]. При измерении на низких частотах (<200 кГц) для многих транзисторов характерно появление на C_S-*V*-кривых дополнительных пиков (рис. 2*а*, 2*в*).

При охлаждении структур от $T_{ком}$ до $T_{аз}$ наблюдался сдвиг *C-V*-кривых в сторону положительных напряжений (рис. 3, кривые *1* и *2*), что свидетельствует об уменьшении положительного заряда в барьерном слое или на границе AlGaN/GaN.

На тестовых БШ не наблюдается каких-либо перегибов на *C-V*-характеристиках при измерении на тех же частотах, что и транзисторные структуры (рис. 3, кривая *3*). Охлаждение тестовых БШ до температуры азота приводило к более резкому наклону *C-V*-кривых и сдвигу кривых в сторону положительных значений напряжения.

Нагрев при измерениях от $T = 290$ до 473 K в большинстве случаев приводил к незначительному изменению формы *C-V*-кривых (рис. 4*а*), за исключением участка со ступенькой на кривой (рис. 4*а*, вставка). У транзисторов HEMT-1 происходило резкое уменьшению изгиба *C-V*-кривой, так что углы наклона двух участков кривой (выше и ниже ступеньки) становились близки друг к другу (рис. 4*б*), при этом необходимо отметить, что максимальные изменения формы происходили на нижнем участке *C-V*-кривой (рис. 4*б*).

При исследовании методом DLTS в транзисторных структурах HEMT-1 и тестовых БШ наблюдались электронно-подобные ловушки с энергией активации 0.59–0.6 эВ и сечением захвата $\sigma \approx 1 \times 10^{-14}$ см^2 (рис. 5*а*, кривая *1*). На спектрах пики электронных ловушек показаны с положительной полярностью, а дырочных с отрицательной. Перезарядка ловушек в HEMT-1 структурах наблюдалась при выборе режима со смещением, соответствующим положению вблизи ступеньки на *C-V*-характеристике (рис. 2) или ниже и с отрицательным импульсом инжекции, как и в работе [8]. В этом случае захват электронов на ловушки во время импульса может происходить при туннелировании электронов через барьерный слой или при их перемещении по дислокациям в барьерном слое [10].

Для транзисторов типа HEMT-2 в спектре DLTS наблюдался широкий пик, который, учитывая его положение по температуре, связан с той же ловушкой, что и в HEMT-1 и с другой ловушкой с пиком близким к первому, что не позволило их разделить (рис. 5*а*, кривые *2* и *3*). Присутствие

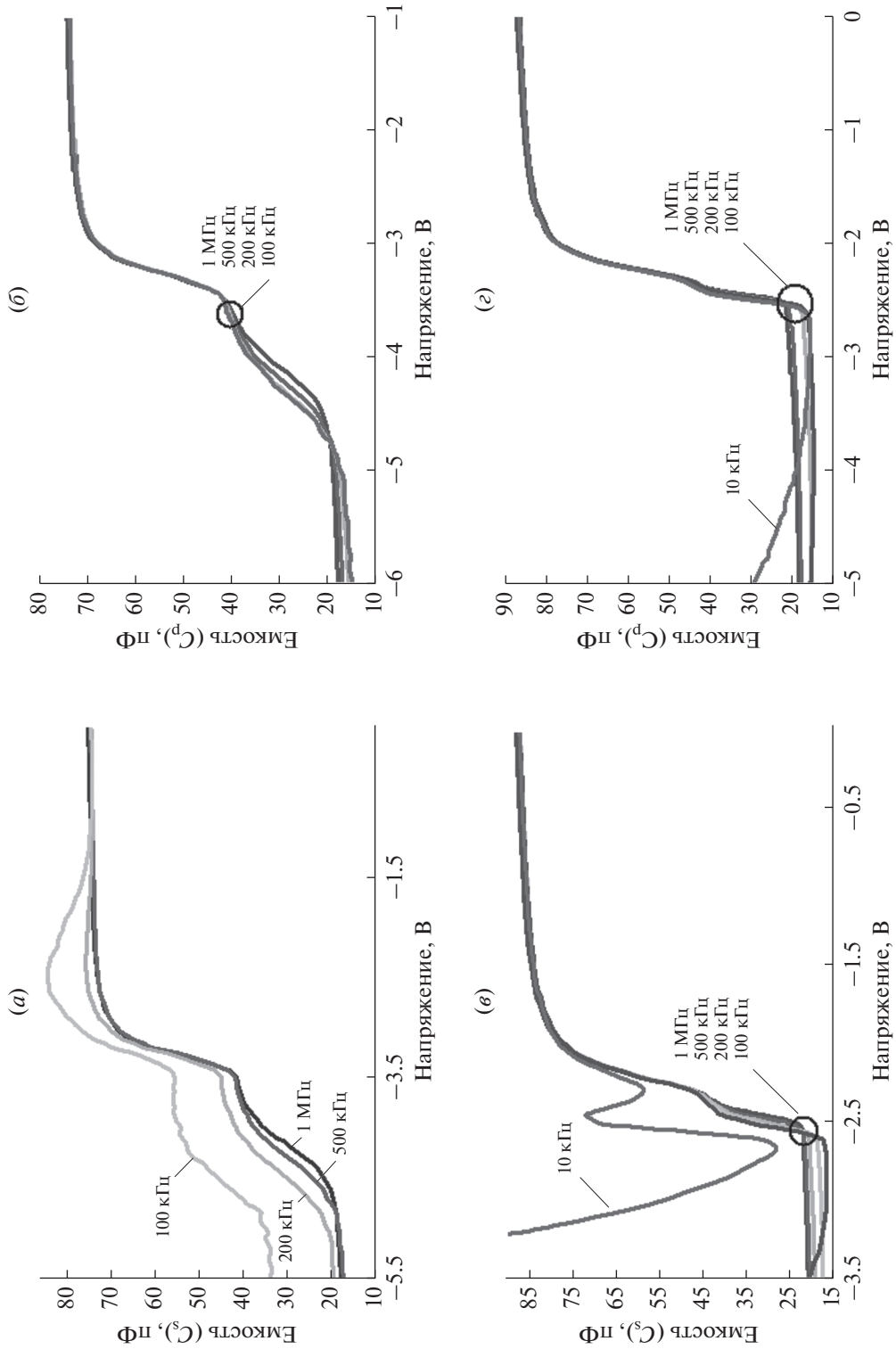

Рис. 2. *C-V*-характеристики областей затвор–сток при f = 10 кГц–1 МГц; *а*, *б* – НЕМТ-1; *в*, *г* – НЕМТ-2; *а*, *в* – последовательная схема измерения; *б*, *г* – параллельная схема измерения.

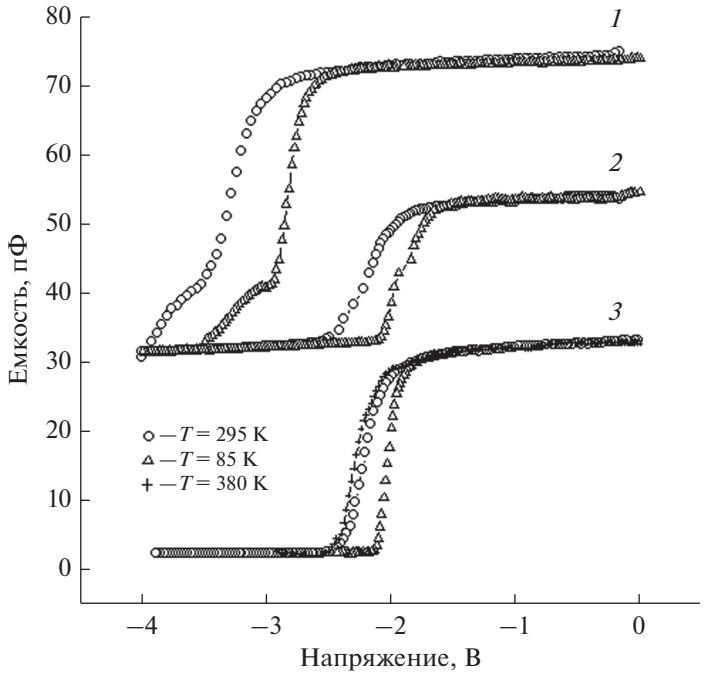

Рис. 3. *C-V*-характеристики транзисторных структур HEMT-1, HEMT-2 и тестовых БШ; $f = 500$ кГц, при разных температурах (*C-V* для HEMT-2 смещена на 15 пФ вверх): *1* – HEMT-1; *2* – HEMT-2; *3* – диод Шоттки.

второго уровня в HEMT-2, по-видимому, определяется выбранным технологическим циклом и конструкцией прибора. При большом отрицательном импульсе напряжения наблюдалась также дырочная ловушка с энергией активации ≈1.1 эВ (рис. 5*б*, кривая *2*) и существенное возрастание сигнала от электронных ловушек.

При подаче положительного импульса инжекции в транзисторных структурах наблюдался центр дырочного типа с аномальным поведением. Положение пиков для этого центра при используемых в записи 4-х окнах скорости эмиссии практически совпадало по температуре (рис. 5*б*, кривые *3*, *4*, *5*). Изменение режима записи (исходного смещения или длительности импульса инжекции) приводило к смещению пиков по температуре и изменению их амплитуды. Энергия активации в данном случае не постоянна, и релаксация емкости имеет не экспоненциальный характер. При использовании большого отрицательного смещения также наблюдался аномальный пик небольшой амплитуды (рис. 5*б*, кривая *5*).

Такая же аномалия наблюдалась для отрицательного пика в спектре тестового БШ, но при отрицательном импульсе инжекции и при температуре около 100 K. При положительном импульсе инжекции у тестовых БШ появлялся положительный пик, соответствующий уровню с энергией 0.6 эВ близкому к наблюдаемому в структуре HEMT-1.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При измерении на тестовых БШ область пространственного заряда (W) может быть определена с помощью известной аппроксимации области обеднения:

$$W = (\varepsilon_0 \varepsilon S)/C,$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная вакуума, ε – диэлектрическая постоянная GaN при $T_{ком}$, S – общая площадь затвора, C – емкость слоя AlGaN.

Расчет показывает, что в области верхнего плато при $U_{изм} \to 0$ область пространственного заряда “перекрывает” весь барьерный слой, т.е. $W = d_{AlGaN}$. Говорить о глубине проникновения поля в объем кристалла транзисторных структур сложно, поскольку “пальцы” затвора транзистора включены параллельно друг другу, и образующееся общее электрическое поле под всем затвором может быть неоднородно. Использование стандартного расчета области объемного заряда будет неточным.

Методом DLTS обнаружены два глубоких центра – электронный и дырочный, а также электронный центр, пик от которого не удалось разделить с пиком центра с $E_a = 0.59$–0.6 эВ у HEMT-2; этот пик также может быть связан с дислокационной структурой транзисторных кристаллов.

Отметим, что уровень электронной ловушки с $E_a = 0.59$–0.6 эВ наблюдался и при смещении к более отрицательному напряжению относитель-

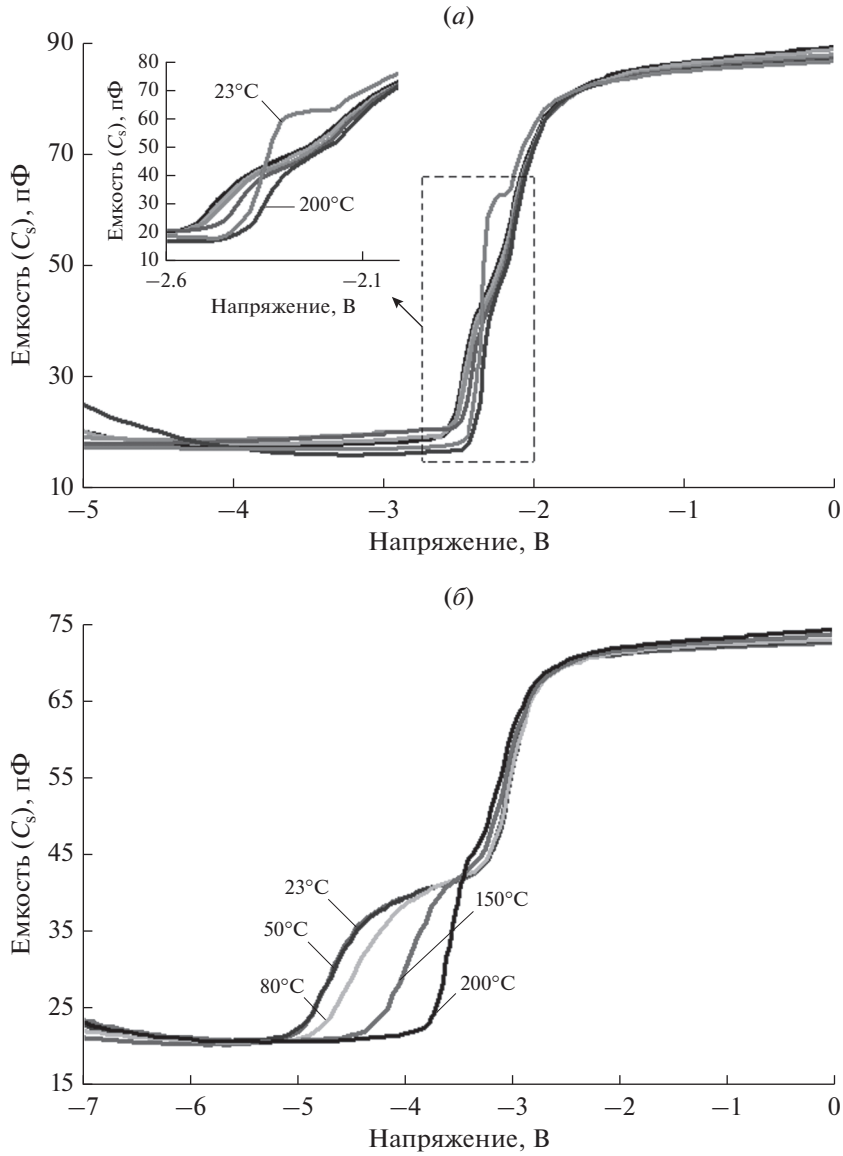

Рис. 4. *C-V*-характеристики областей затвор–сток транзисторных структур при $f = 500$ кГц; *а* – HEMT-2; *б* – HEMT-1 при нагреве от 293 до 473 К. Вставка – участок *C-V*-кривой в области ступеньки при $T = T_{ком}$.

но ступеньки на *C-V*-характеристике. По-видимому, связанные с этим уровнем дефекты, распределены в объеме GaN.

Перезарядка глубокой дырочной ловушки в спектре DLTS происходила при большом отрицательном импульсе напряжения (рис. 5, кривая *2*, $V_p = -7$ В), вызывавшем, по-видимому, генерацию дырок в GaN и захват их ловушкой. При использовании импульса напряжения –3 В и начальном смещении –2.1 В пик ловушки не виден, т.е. напряжение импульса еще не достаточно для перезарядки центра. В таком случае при измерении *C-V*-характеристик необходимо приложить отрицательное напряжение $U < -5$ В, чтобы произошла презарядка данного дефекта. Эта точка на *C-V*-кривой попадает на нижнее плато, где наблюдать уровень невозможно. Таким образом, из зарегистрированных в спектре DLTS уровней, со ступенькой на *C-V*-кривых исследуемых HEMT-транзисторов, по-видимому, связаны дефекты с $E_a = 0.59$–0.6 эВ.

Можно предположить, что наличие центра дырочного типа с аномальным поведением связано с изменениями заселенности электронами уровней двумерного газа. Полярность сигнала релаксации соответствует тому, что положительный импульс напряжения обедняет слой 2DEG электронами, уменьшая ширину ОПЗ в GaN и увеличивая общую емкость структуры. Обеднение слоя двумерного газа может быть связано с туннелированием электронов в барьерный слой.

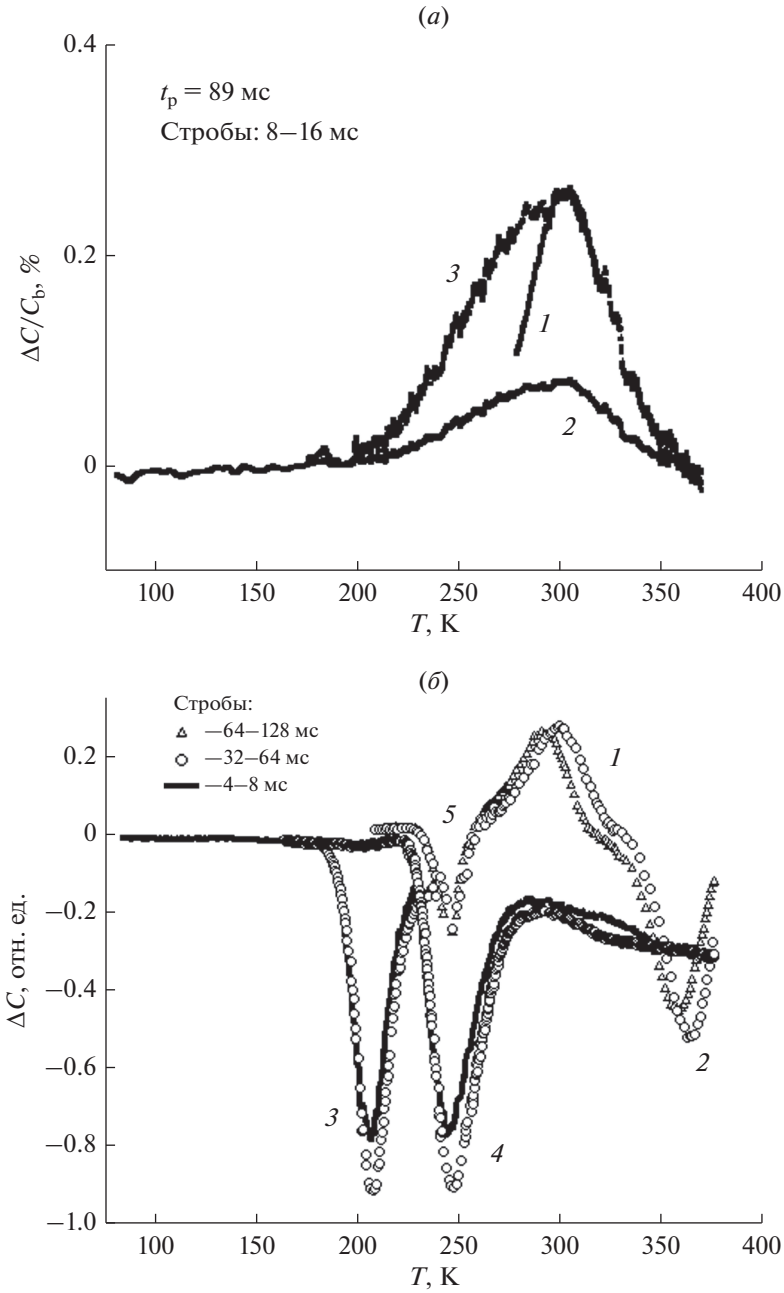

Рис. 5. Спектры DLTS областей затвор–сток транзисторов HEMT-1 и HEMT-2: *а* – $\Delta C_{t=0}/C_b$ = 1% *1* – HEMT-1; *2*, *3* – HEMT-2; ΔC/C (*3*) = 2.9 × ΔC/C (*2*); *б* – $\Delta C_{t=0}/C_b$ = 2.4% HEMT-2 *1* – электронно-подобная ловушка, *2*– дырочно-подобная ловушка, *3*, *4*, *5* – аномальные пики: режимы измерения: *1*, *2*, *5* – V_b = –2.1 В, V_p = –7 В; *3* – V_b = –2.1 В, V_p = +3 В; *4* – V_b = –2.3 В, V_p = +3 В.

После окончания импульса заселенность уровней в 2DEG восстанавливается, и емкость структуры релаксирует с положительной полярностью к равновесному значению.

Авторы работы [8] считают, что верхний участок *C*-*V*-кривой транзисторных структур до ступеньки (рис. 2) связан с дефектами в барьерном слое и у верхней границы канала двумерного газа (непосредственно на границе AlGaN/GaN), а нижний участок кривой – с нижней границей канала и прилегающей подканальной частью слоя GaN. Это предположение подтверждают результаты измерений *C*-*V*-характеристик транзисторных структур при нагреве: изменения формы *C*-*V*-кривых при нагреве до T = 150–200°C происходят, в основном, или на участке, где при $T_{ком}$ присутствует ступенька на *C*-*V*-кривой (рис. 4*а*, вставка) или при сильном обеднении на нижнем участке

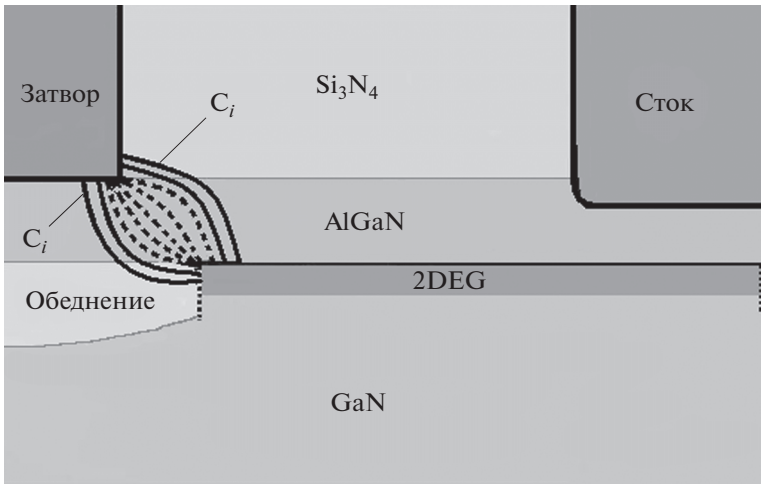

Рис. 6. Схематическое изображение поперечного сечения области края затвор – сток HEMT.

C-V-кривой (рис. 4*б*). Восстановление *C-V*-кривых после нагрева происходит за время более 2–3-х часов, что свидетельствует об участии в процессе медленных состояний, связанных с дефектами в GaN. Появление непосредственно ступеньки, возможно, связано с моментом, когда ОПЗ распространяется в область канала двумерного газа.

Разница в спектре электронных состояний в исследуемых HEMT структурах связана с конструкторско-технологическими особенностями изготовления приборов, а также с наличием разных поставщиков исходных гетероструктур. Электронная ловушка с энергией активации E_a = (0.59–0.6 эВ) хорошо известный центр, часто наблюдаемый в структурах AlGaN/GaN. Ловушка с E_a = 0.6 эВ чаще всего наблюдается в *n*-типе GaN [6, 11]. В данной работе наиболее четко эта ловушка фиксируется в HEMT-1. В литературе упоминается так же дырочная ловушка с энергией активации ≈1 эВ [6]. Появление других ловушечных центров в HEMT-2 (рис. 5*б*) объясняется разницей технологии и конструкции приборов, например, изменением расположения металлизированных отверстий в приборе HEMT-2 по сравнению с HEMT-1 (рис. 1).

В тестовых БШ методом DLTS наблюдался тот же уровень с энергией 0.6 эВ, что и в транзисторных структурах, и аномальный пик, который появлялся при более низких температурах (100 K). Однако они наблюдались при импульсах инжекции с другой полярностью по сравнению с HEMT структурами. Это свидетельствует о различных механизмах заполнения центров в БШ и HEMT. Кроме того, в отличие от транзисторных структур, у тестовых БШ на *C-V*-кривых не наблюдалось характерных ступенек, которые не появлялись также и при охлаждении или нагреве образцов.

Появление характерных ступенек на *C-V*-характеристиках при измерениях транзисторных структур и отсутствие их у тестовых БШ связано, по нашему мнению, с малыми размерами и формой затвора транзисторных структур. Дело в том, что на краях затвора возникают сильные электрические поля (краевые эффекты из-за соизмеримости длины затвора и толщины барьерного слоя). Известно, что максимальные продольные поля в объеме HEMT транзисторов возникают при приложении обратного смещения на краю затвора, обращенного к стоку [12], что может приводить к перезарядке дефектов с ГУ, расположенных в зоне действия поля. На факт возможной перезарядки дефектов на краю затвора из-за возникновения высоких электрических полей при обратном смещении уже указывали некоторые исследователи [13]. Более того, под затвором может быть и более высокая плотность дефектов, формирующих ГУ, например, из-за действия обратного пьезоэффекта в процесс импульсного воздействия при работе транзисторов.

Разный наклон на двух участках *C-V*-кривой у транзисторных структур можно объяснить еще и тем, что в процессе измерения при сильном обеднении может изменяться электрическая цепочка схемы замещения, связанная с емкостями, возникающими при перезарядке ловушечных центров (рис. 6). В частности, в работе [13] предложено схематичное изображение поперечного сечения края затвора при сильном обеднении с указанием группы дополнительных емкостей, которые могут возникать в результате сложного перераспределения электрического заряда на краю затвора транзистора. Вся эта сложная картина развертывается практически только под затвором [13, 14].

В случае измерения *C-V*-характеристик тестовых диодов Шоттки из-за выбранной конструкции тестов и несоизмеримости продольных и по-

перечных размеров (диаметр БШ – 100 мкм, а толщины слоев гетероструктуры – наномикроны, в частности, толщина барьерного слоя AlGaN – 200 Å) при приложении в процессе измерения тех же по величине напряжений не возникает сильных электрических полей (краевые эффекты не играют определяющую роль) и, скорее всего, этим объясняется отсутствие ступеньки при измерении *C-V*-характеристик барьеров Шоттки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом DLTS для всех исследуемых структур, включая тестовые БШ, обнаружены электронно-подобная ловушка с энергией активации 0.59–0.6 эВ и дырочная ловушка с энергией активации ≈1.1 эВ, находящиеся, скорее всего, в буферном слое. Экспериментально показано, что набор дефектов с ГУ в транзисторных структурах определяется их технологически-конструкторскими особенностями и особенностями исходных гетероструктур.

Ступенька на *C-V*-кривых HEMT-транзисторов, в отличие от тестовых БШ, связана с ролью больших электрических полей, которые возникают на краю затвора транзисторных структур при приложении одинаковых по величине напряжений на затвор транзистора и БШ.

Центр дырочного типа с аномальным поведением при измерении методом DLTS, как у транзисторных структур, так и у тестовых БШ, по нашему мнению, связан с особенностями процессов в слое двумерного электронного газа на границе AlGaN/GaN и требует дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Binari S.C., Ikossi K., Roussos J.R., Kruppa W., Park D., Dietrich H., Koleske D.D., Wickenden A.E., Henry R.L.* Trapping effects and microwave power performance in AlGaN/GaN HEMTs // IEEE Trans. Electron Dev. 2001. V. 48. P. 565.
2. *Fang Z.-Q., Look D.C.* Traps in AlGaN/GaN/SiC heterostructures studied by deep level transient spectroscopy // Applied Physics Letters. 2005. V. 87. P. 182115-1–1822115-5.
3. *Tirado Lose Maria, Sanchez-Rojas Jose Luis, Izpura Ignacio.* Trapping effects in the transient response of AlGaN/GaN HEMT devices // IEEE Transactions on electron Devices 2007. V. 54. № 3. P. 410–417.
4. *Balandin A.A., Lui W.L., Chen Y.L., Wang K.L.* Capacitance-Voltage Spectroscopy of trapping states in GaN/AlGaN heterostructure field-effect transistors // J. Nanoelectronics and Optoelectronics. 2006. V. 1. P. 258–263.
5. *Lo C.F., Ren Fan, Pearton S.J., Polyakov A.Y., Smirnov N.B., Govorkov A.V., Belogorokhov I.A., Belogorokhov A.I., Reznik V.Y.* Deep traps and thermal measurements on AlGaN/GaN on Si trasistors // J. Vac. Sci. Technol. B 29(4), Jul./Aug 2011. P. 042201-1–042201-5.
6. *Polyakov A.Y., Lee I.-H.* Deep traps in GaN-based structures as affecting the performance of GaN devices // Mater. Sci. and Eng. 2015. V. 94. P. 1–56.
7. *Simpkins B.S., Yu E.T., Waltereit P., Speck J.S.* Correlated scanning Kelvin probe and conductive atomic force microscopy studies of doslocations in gallium nitride // J. Appl. Phys. 2003. V. 94. P. 1448–1453.
8. *Polyakov A.Y., Smirnov N.B., Dorofeev A.A., Gladysheva N.B., Kondratyev E.S., Shemerov I.V., Turutin A.V., Ren F., Pearton S.J.* Deep Traps in AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistors on SiC // ECS J. Solid State Science and Technology. 2016. V. 5. № (10). P. Q260–Q265.
9. *Yatabe Zenji, Asubar Joel T., Hashizume Tamotsu.* Insulated gate and surface passivation structures for GaN-based power transistors // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. V. 49. 393001. P. 1–20.
10. *Zhang H., Miller E.J., Yu E.T.* Analysis of leakage current mechanisms in Schottky contacts to GaN and grown by molecular-beam epitaxy // J. Applied Physics 2006. V. 99. P. 023703-1–0223703-6.
11. *Lee I.-H., Polyakov A.Y., Smirnov N.B., Hahn C.-K., Pearton S.J.* Spatial location of the E_c-0.6 eV electron trap in AlGaN/GaN heterojunctions // J. Vac. Sci. Technol. 2014. B 32. 050602.
12. *Ando Y., Okamoto Y., Miyamoto H., Nakamyama T., Inoue T. Kuzuhara M.* 10-W/mm AlGaN-GaN HFET with a Field Modulatine Plate // IEEE Electron Device Letters". 2003. V. 24. № 5. P. 289–291
13. *Zhang Aixi, Zhang Lining, Tang Zhikai, Cheng Xiaoxu, Wang Yan, Chen Kevin J., Chan Mansun.* Analytical Modeling of Capacitances for GaN HEMTs, Including Parasitic Components // IEEE Transactions on electron Devices. March 2014. V. 61. № 3. P. 755–761.
14. *Hayashi Kazuo, Yamaguchi Yutaro, oishi Toshiyiki, Otsuka Hiroshi, Yamanaka Koji, Nakayama Masatoshi, Miuamoto Yasuyuki.* Mechanism Study of Gate Leakage Current for AlGaN/GaN High Electron Transistor Structure Under High Reverese Bias by Thin Surface Barrier Model and Technology Computer Aided Design Simulation // Japanese J. Applied Phisics. 2013. V. 52. P. O4CF12 1-5.