

ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СЛОИ И МНОГОСЛОЙНЫЕ КОМПОЗИЦИИ

EPITAXIAL LAYERS AND MULTILAYERED COMPOSITIONS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2015. Т. 18, № 2. С. 137–145.
ISSN 1609-3577. DOI: 10.17073/1609-3577-2015-2-137-145

УДК 621.315.592

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАССИВИРУЮЩИХ СЛОЕВ НА ЕМКОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaIn/GaN

© 2015 г. К. Л. Енишерлова, В. Г. Горячев, Т. Ф. Русак, С. А. Капилин
ОАО «НПП «Пульсар»,
Окружной поезд, д. 27, Москва, 105187, Россия

Исследованы гетероструктуры AlGaIn/GaN, выращенные методом MOCVD на сапфировых и кремниевых подложках. Проведены измерения вольт-фарадных характеристик при планарном расположении ртутного зонда и второго электрода на поверхности образцов в диапазоне частот от 200 Гц до 1 МГц. Проанализирован вид типичных $C-V$ -характеристик для гетероструктур с верхними нелегированными слоями i -AlGaIn и i -GaN при толщине верхних слоев 1,5–2,5 нм. В ходе исследований при работе на низких частотах ($f < 50+200$ кГц) для ряда структур с толщиной слоя i -GaN 5,0 нм при переходе из области обеднения в область обогащения зафиксировано появление на $C-V$ -кривых характерного пика. Высота этого пика увеличивалась с уменьшением частоты. Экспериментально показано, что частота, при которой фиксировали этот пик, может зависеть от плотности дислокаций в гетероструктурах. Дано возможное объяснение причин появления пиков с учетом модификации зонной диаграммы таких структур при наложении внешних электрических полей. Показано, что использование пассивирующего слоя Si_3N_4 приводит к возникновению дополнительного положительного заряда в барьерном слое.

Ключевые слова: гетероструктуры AlGaIn/GaN, вольт-фарадные характеристики, зонная диаграмма, частотные измерения, пассивирующий слой, двумерный электронный газ, дислокация, резерфордовское обратное рассеяние.

Введение

Практика создания AlGaIn/GaN-HEMT-транзисторов (*high electron mobility transistor* — HEMT, транзистор с высокой подвижностью электронов) показала, что для приборов, сформированных на реальных гетероструктурах, характерно наличие ряда ограничений, которые препятствуют получению теоретически расчетных параметров приборов. В частности, в HEMT-транзисторах наблюдается снижение выходных токов из-за эффекта «отставание на затворе» (*gate-lag effect*). Для технологии AlGaIn/GaN-HEMT-транзисторов характерно нежелательное частотно-зависимое явление резкого падения или даже коллапса тока истока [1]. По мнению ряда исследователей, причиной этих недостатков является наличие медленных поверхностных состояний, в частности между затвором и истоком прибора [2]. Появление таких состояний может

быть обусловлено наличием поверхностных оборванных связей (*dangling bonds*), винтовых дислокаций, ионов, адсорбированных на поверхностях гетероструктур [2]. С этих ловушек электроны инжектируются затвором, и создается слой заряда на/или вблизи поверхности. Однако из-за малых временных постоянных ловушек электроны невозможно удержать в поверхностном слое для полной корректировки заряда в канале при большом сигнале ВЧ-диапазона. В результате и наблюдаются колебания тока и выходной мощности. Кроме того, возникающая проводимость и ионизация вдоль поверхности ограничивают пробивные напряжения приборов [1]. Помимо поверхностных состояний, электронные ловушки могут локализоваться и в самом объеме гетероструктуры, включая барьерный и каналные слои, а также на всех границах, в частности на границе металл-полупроводник в приборных структурах. Природа и

Енишерлова Кира Львовна — доктор техн. наук, начальник лаборатории, e-mail: Enisherlova@pulsarnpp.ru; **Горячев Владимир Глебович** — старший научный сотрудник, e-mail: wlg2_17@rambler.ru; **Русак Татьяна Федоровна** — старший научный сотрудник; **Капилин Семен Андреевич** — техник.

формирование таких мест зависят от качества исходной гетероструктуры и уровня технологии [2].

Для решения проблемы поверхностных ловушек в технологии AlGaIn/GaN–HEMT–транзисторов используют пассивирующие слои. На данном этапе уже известен эффект от применения некоторых пассивирующих технологий. В частности, используют ряд поверхностных слоев (SiO_2 , Si_3N_4), а также так называемые *cap*–слои (*i*–GaIn на AlGaIn/GaN и InGaIn на AlGaIn/GaN). Наличие этих слоев может улучшить такие транзисторные характеристики, как уровень тока насыщения, повышение пробивных напряжений, снижение уровня шумов [3, 4]. В настоящее время также используют *in situ* способ формирования пассивирующего слоя Si_3N_4 в процессе эпитаксиального роста самой гетероструктуры методом MOCVD [5]. Такая технология позиционируется как средство, ослабляющее механизм влияния поверхностных состояний, которые могут ограничивать ток насыщения и уменьшать напряжение пробоя [1]. Хотя технологический эффект от использования пассивирующих слоев уже известен, некоторые детали самого механизма улучшения (влияние различных технологических особенностей, например толщины пассивирующего слоя) еще продолжают дискутироваться.

Снятие вольт–фарадных характеристик (ВФХ) продолжает оставаться наиболее эффективным методом оценки электрофизических особенностей нитридных гетероструктур. Метод дает возможность получать информацию о количестве заряда, захваченного в канале, о наличии положительного заряда в барьерном слое и концентрации легирующей примеси в канальном слое [6].

Ниже рассмотрены результаты исследования влияния верхних слоев *i*–GaIn и Si_3N_4 на частотные емкостные параметры гетероструктур AlGaIn/GaN с целью большего понимания механизма работы таких слоев.

Образцы и методы исследования

Анализируемые гетероструктуры с верхним нелегированным слоем *i*–AlGaIn и *i*–GaIn выращивали методом газофазной эпитаксии MOCVD с буферным слоем GaN толщиной 2–3 мкм. В качестве подложек использовали сапфировые пластины с ориентацией рабочих поверхностей (0001). В качестве барьерного у этих анализируемых структур выступал слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{(x-1)}\text{N}$ толщиной 25–30 нм с $x = 0,25+0,3$, причем особенности этого слоя варьировали. В частности, выращивали структуры с нелегированным барьерным слоем AlGaIn (табл. 1). Гетероструктуры на сапфире в основном имели следующий состав:

- спейсер толщиной 2,5–5,0 нм;
- барьерный легированный слой толщиной 10–20 нм с уровнем легирования кремнием $(0,1+1,5) \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$;

- верхний нелегированный слой *i*–AlGaIn или *i*–GaIn толщиной 2,5–5 нм.

Кроме того, анализировали еще гетероструктуры AlGaIn/GaN, выращенные на пластинах кремния с ориентацией (111) и с верхним пассивирующим слоем Si_3N_4 толщиной 50 нм. В табл. 1 показаны особенности строения анализируемых гетероструктур.

Измерение ВФХ проводили на установке CSM/WIN System в диапазоне частот от 200 Гц до 1 МГц с помощью ртутного зонда. Основные измерения выполняли при планарном расположении измерительного зонда и второго электрода в виде ртутного кольца на поверхности образцов. Площадь контакта этого электрода значительно превышала (в 38 раз) площадь ртутного зонда. Емкостные зависимости снимали как по параллельной (индекс–р), так и по последовательной (индекс–s) схемам замещения. Для оценки влияния пассивирующего слоя непосредственно на емкостные характеристики гетероструктур последовательно послойно утоняли пассивирующий слой Si_3N_4 с удалением на каждом этапе слоя толщиной 2,5–3 нм. После каждого удаления снимали высокочастотные (ВЧ) *C–V*–характеристики.

Поверхностные слои *i*–AlGaIn и *i*–GaIn, а также особенности границы раздела Si_3N_4 –AlGaIn исследовали с помощью спектроскопии резерфордского обратного рассеяния (РОР–метод). Этот метод основан на измерении энергораспределения обратнорассеянных ионов [7]. В качестве первичных частиц использовали ионы гелия He^{++} с энергией 2 МэВ. Спектры РОР снимали в скользящей геометрии. Для анализа тонких приповерхностных слоев детектор был расположен относительно падающего пучка под углом 100–110°. Толщина слоя, с которого снимали информацию, составляла 0,5–0,6 мкм. Энергетическое распределение рассеянных ионов гелия измеряли при двух ориентациях образца относительно падающего пучка:

- при произвольном направлении падающего пучка ионов относительно кристаллографической оси образца;
- при направлении движения входящих ионов, совпадающем с осью высокой симметрии кристалла (эффект каналирования).

Результаты и их обсуждение

Структуры с верхним слоем *i*–GaIn. На рис. 1 представлены типичные ВЧ ВФХ гетероструктур при стандартных измерениях по последовательной схеме замещения, снятые на разных частотах при расположении двух ртутных электродов на поверхности гетероструктуры.

Такой характер *C–V*–кривых наблюдается для гетероструктур как с легированным, так и с нелегированным барьерным слоем AlGaIn. Необходимо отметить, что $C_{s_{\max}}$ практически равна расчетной

Таблица 1

Характеристики подложки анализируемых гетероструктур
[Table 1. Parameters of Test Heterostructures]

Образец	Толщина пассивирующего слоя, нм		Параметры барьерного и буферного слоев гетероструктур					Материал подложки
	Si ₃ N ₄	<i>i</i> -GaN	<i>i</i> -Al _{<i>x</i>} Ga _{1-<i>x</i>} N	Al _{<i>x</i>} Ga _(1-<i>x</i>) N	<i>i</i> -Al _{<i>x</i>} Ga _{1-<i>x</i>} N-спейсер	AlN, нм	Канальный и буферный слой	
V-1009(4)	—	—	4,7 нм, <i>x</i> = 0,28	20,7 нм, <i>x</i> = 0,28, <i>N</i> _{Si} = 1,5 · 10 ¹⁸ см ⁻³	2,6 нм, <i>x</i> = 0,28	—	GaN, 3 мкм	Al ₂ O ₃ (0001)
V-1486-1	—	2,5	—	13,0 нм, <i>x</i> = 0,26, <i>N</i> _{Si} = 3,0 · 10 ¹⁸ см ⁻³	2,0 нм, <i>x</i> = 0,26	1,3	GaN, 2,5 мкм	
V-1000(6)	—	—	4,8 нм, <i>x</i> = 0,28	21,5 нм, <i>x</i> = 0,28, <i>N</i> _{Si} = 1,5 · 10 ¹⁸ см ⁻³	2,7 нм, <i>x</i> = 0,28	—	GaN, 2,5 мкм	
V-1124(2)	—	5,0	—	20,0 нм, <i>x</i> = 0,26, <i>N</i> _{Si} = 2,0 · 10 ¹⁸ см ⁻³	3,0 нм, <i>x</i> = 0,26	1,0	GaN, 2—3 мкм	
V-1001(3)	—	—	4,5 нм, <i>x</i> = 0,28	20,0 нм, <i>x</i> = 0,28, <i>N</i> _{Si} = 1,5 · 10 ¹⁸ см ⁻³	2,5 нм, <i>x</i> = 0,28	—	GaN, 2—3 мкм	
V-1121(1)	—	5,0	—	20,0 нм, <i>x</i> = 0,26, <i>N</i> _{Si} = 1,5 · 10 ¹⁸ см ⁻³	3,0 нм, <i>x</i> = 0,26	1,0	GaN, 2—3 мкм	
EP12201286	50,0	—	—	20,0 нм, <i>x</i> = 0,25, нелегированный	—	—	150,0 нм GaN (канальный слой) + 2,5 мкм AlGaN (базовый буферный слой) + зародышевый слой	Si (111)
EP12201286	50,0	—	—	23,0 нм, <i>x</i> = 0,26, нелегированный	—	—	150,0 нм GaN (канальный слой) + 2,5 мкм AlGaN (базовый буферный слой) + зародышевый слой)	

*N*_{Si} — концентрация легирующей примеси.

величине емкости барьерного слоя AlGaN: $C_{s_{max}} = C_{s_{расч}}$. Расчетное значение емкости барьерного слоя определяли по формуле

$$C_{s_{расч}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{AlGaN} S_{зонда}}{h},$$

где *h* — толщина слоя AlGaN.

Для всех анализируемых структур, у которых толщина слоя AlGaN составляла 25—30 нм, $C_{s_{max}} = (1,3 \div 1,5) \cdot 10^3$ пФ. При смещении в сторону отрицательных значений для всех структур характерно наличие на *C*—*V*-кривой отрезка практически с постоянным значением емкости *C*_{s1} (квазипостоянная емкость), где поле, формируемое зарядом электронов двумерного газа, компенсируется приложенным полем. Таким образом, в емкости структуры преобладает емкостная составляющая, связанная с двумерным электронным газом (2DEG) в канале [8]. Кроме того, определен вклад в *V*_{нас}(0), вероятно, могут давать заряды дефектов в барьерном слое. Наконец, при сильном отрицательном смещении на *C*—*V*-кривой наблюдается участок, где измеряемая емкость минимальна. В данном случае рассматривали гетероструктуры, выращенные на сапфире и частично связанные паразитными емкостями, у которых $C_{s_{min}} = 2 \div 3$ пФ при всех частотах. Эти данные

подтверждают тот факт, что при малых напряжениях смещения 2DEG выступает в качестве второго электрода, а прикладываемое напряжение почти полностью падает на барьерном слое AlGaN.

Практически для всех анализируемых гетероструктур с верхним нелегированным слоем *i*-AlGaN на высоких частотах наблюдается более пологий подъем емкостной кривой при напряжениях смещения *V*_{смещ} от *V*_{отс} до *V*_{нас} — так называемая дисперсия емкости (рис. 2, а). Для гетероструктур с верхним нелегированным слоем *i*-GaN той же толщины (2 нм) свойственно резкое уменьшение, а для некоторых структур почти полное отсутствие дисперсии емкости при частотных измерениях (рис. 2, б). Однако проведенные исследования показали, что при измерении на более низких частотах при больших толщинах верхнего слоя *i*-GaN (5 нм) характер емкостных зависимостей может меняться. В частности, для ряда гетероструктур с толщиной слоя *i*-GaN 5 нм при работе на частотах *f* < 70÷500 кГц на *C*—*V*-кривых при переходе из области обеднения в область обогащения (*V*_{смещ} = -7 ... -3 В) фиксировали появление характерного пика, причем с уменьшением частоты высота пика возрастала (рис. 3, четвертая стр. обложки). При этом при *V*_{смещ} = 0 на низких и высоких частотах

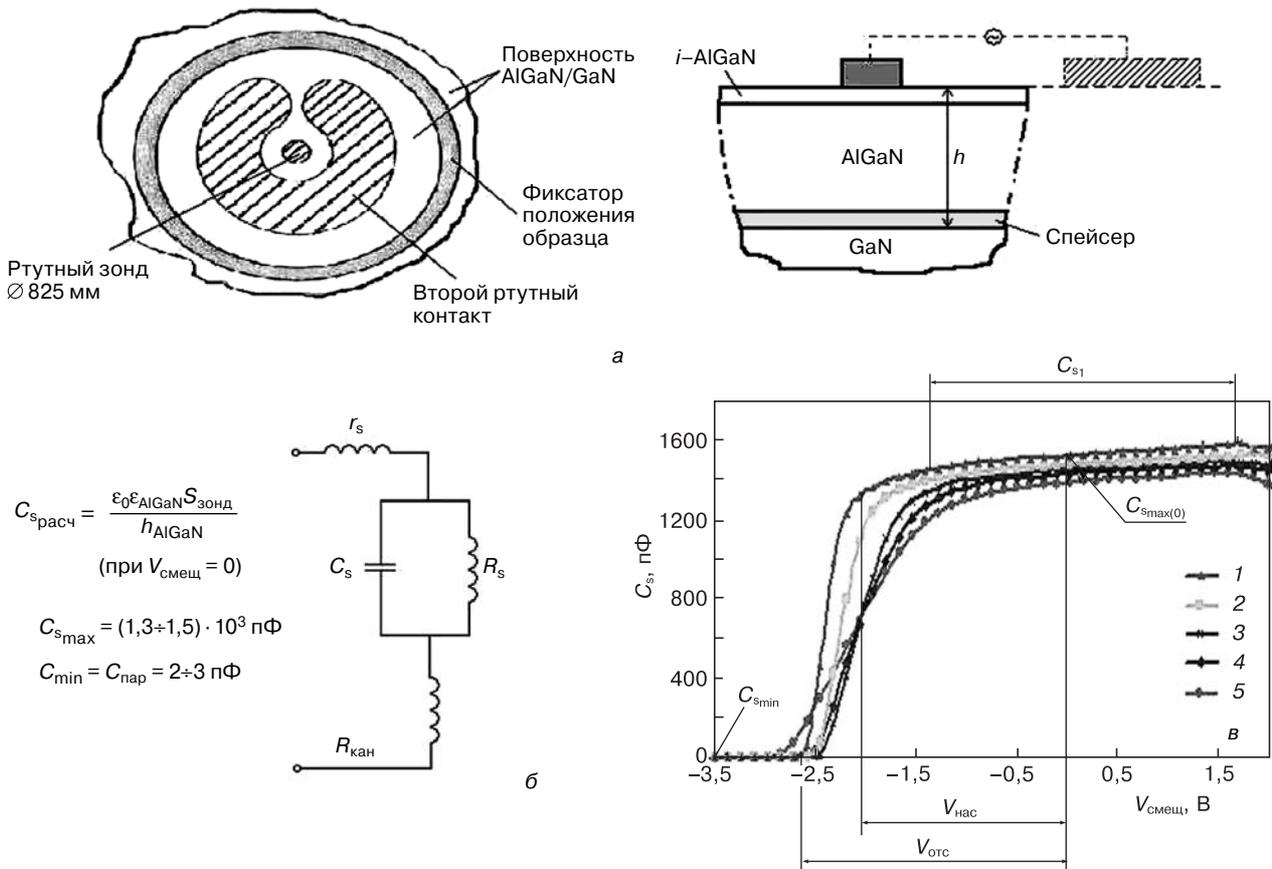


Рис. 1. Используемая (а) и эквивалентная (б) схема замещения при измерении ВФХ и типичные C–V-характеристики структур AlGaIn/GaN при разных частотах (в): 1 – $f = 10$ кГц; 2 – 50; 3 – 100; 4 – 200; 5 – 500.

C_{smin} — постоянная емкость в области глубокого обеднения; $V_{отс}$ — напряжение отсечки — напряжение смещения $V_{смещ}$, когда начинается рост измеряемой емкости; $V_{нас}$ — напряжение насыщения — напряжение смещения, соответствующее выходу из области обогащения; C_{smax} — емкость в области обогащения; $C_{smax(0)}$ — емкость в области обогащения при $V_{смещ} = 0$

Fig. 1. (a) Experimental and (b) Equivalent Substitution Diagram for Capacity–Voltage Characteristics and (c) Typical C–V Curves of the AlGaIn/GaN Structures at Different Frequencies: $f = (1) 10$ kHz, (2) 50 kHz, (3) 100 kHz, (4) 200 kHz and (5) 500 kHz

C_{smin} is the constant capacity in the deep depletion region, V_{cut} is the cutoff voltage, which is the bias voltage V_{bs} when the measured capacity starts growing, V_{sat} is the saturation voltage which is the bias voltage at which the accumulation region ends, C_{smax} is the capacity in the accumulation region and $C_{smax(0)}$ is the capacity in the accumulation region at $V_{bs} = 0$

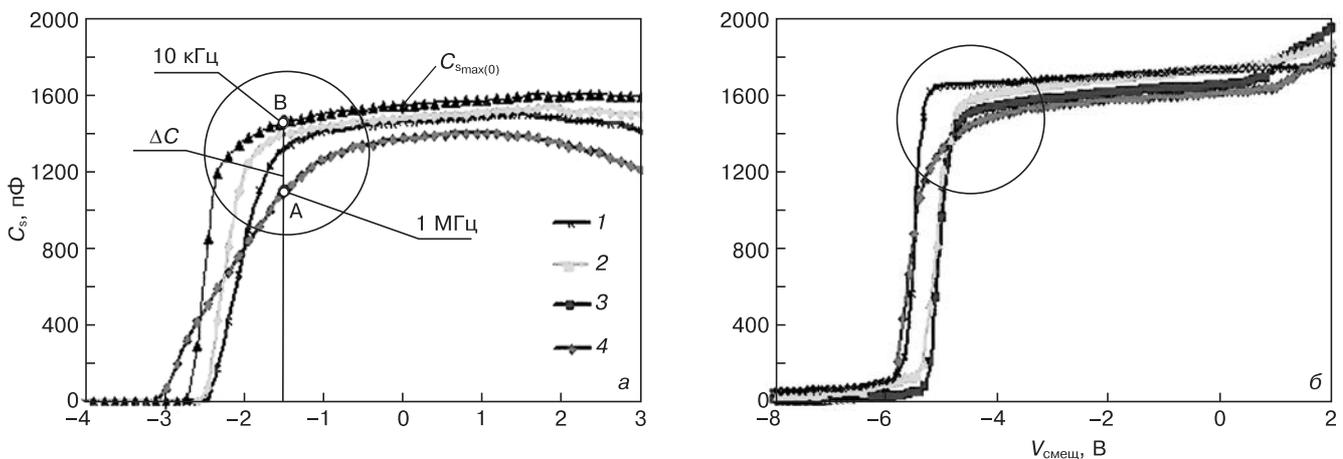


Рис. 2. C–V-характеристики, полученные для гетероструктур $i\text{-AlGaIn/AlGaIn(Si)/GaN}$ (а) и $i\text{-GaN/AlGaIn(Si)/GaN}$ (б) при разных частотах измерения: 1 – $f = 10$ кГц; 2 – 50; 3 – 100; 4 – 1000.

Толщина верхних слоев $i\text{-AlGaIn}$ и $i\text{-GaN}$ составляет 2,0 нм

Fig. 2. C–V Curves of (a) $i\text{-AlGaIn/AlGaIn(Si)/GaN}$ and (b) $i\text{-GaN/AlGaIn(Si)/GaN}$ Heterostructures at Different Frequencies: $f = (1) 10$ kHz, (2) 50 kHz, (3) 100 kHz and (4) 1000 kHz.

The thickness of the upper $i\text{-AlGaIn}$ and $i\text{-GaN}$ layers is 2.0 nm

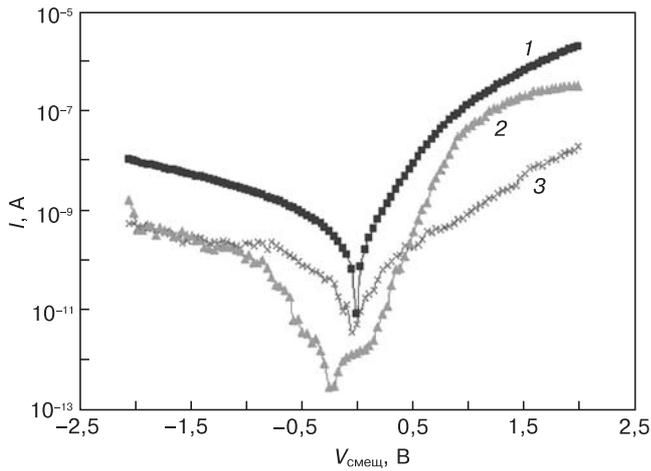


Рис. 4. ВАХ барьеров Шоттки «ртутный зонд — поверхность гетероструктур» с верхним слоем *i*-GaN при различной толщине верхнего слоя *d*:
 1 — *d* = 5 нм, плотности дислокаций $N_d = 2 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$;
 2 — *d* = 5 нм, $N_d = 5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$; 3 — *d* = 2 нм

Fig. 4. I-A Curves of Mercury Probe / Heterostructure Surface Shottky Barriers with Different Thicknesses of Upper *i*-GaN Layer *d*:
 (1) *d* = 5 nm, dislocation density $N_d = 2 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$;
 (2) *d* = 5 nm, $N_d = 5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}$; (3) *d* = 2 nm

значения $C_{s_{max}}$ совпадали. Для двух анализируемых гетероструктур, выращенных на одной установке МOCVD с одинаковым по составу и толщине верхним слоем *i*-GaN (5 нм), частота, при которой фиксировали появление характерного пика на *C*—*V*-кривых, оказалась разной. В одном случае пик появлялся при частоте 60 кГц и ниже (см. рис. 3, а), в другом — при 700 кГц и ниже (см. рис. 3, б). Дальнейшие исследования показали, что гетероструктуры отличаются по плотности дислокаций на порядок (см. рис. 3, в и г).

Анализ барьеров Шоттки, формируемых ртутным зондом с поверхностью гетероструктуры, не выявил ощутимой разницы в вольт-амперных характеристиках (ВАХ) для гетероструктур с верхними нелегированными слоями *i*-GaN и *i*-AlGaN ни в характере кривых, ни в значениях токов утечек. При смещениях менее $V < 0,2$ В практически у всех анализируемых кривых прямая и обратная ветви совпадали; наблюдали ВАХ как симметричного, так и несимметричного вида (рис. 4). Ощутимая разница, в частности в значениях обратных токов, была зафиксирована только для гетероструктуры с верхним слоем *i*-GaN толщиной 5 нм, у которой характерный пик при смещениях $V_{смещ} = -10 \dots -4$ В появлялся уже при высоких частотах измерения (см. рис. 3, б) и для которой характерна более высокая плотность дислокаций (см. рис. 3, д).

В табл. 2 приведены результаты расчетов по спектрам POP количества атомов, находящихся в смещенных позициях относительно узлов кристаллической решетки приповерхностных областей гетероструктур с верхними слоями *i*-AlGaN и *i*-GaN для таких элементов, как Ga, Al, N, O. Указанные в табл. 2 величины оценивали по количеству ионов гелия, рассеянных смещенными из узлов решетки

атомами. Они определяются в основном смещенными атомами в самых верхних слоях гетероструктур (1—2 нм). Как видно из данных табл. 2, для гетероструктур с разными верхними слоями характерна разная степень упорядоченности кристаллической решетки и разная «насыщенность» кислородом приповерхностных областей. В частности, для гетероструктур с «сар» *i*-GaN характерно более упорядоченное строение верхних субмикронных слоев. Кроме того, поверхность такой гетероструктуры менее обогащена кислородом (см. табл. 2).

Структуры со слоем Si_3N_4 . На рис. 5 (четвертая стр. обложки) представлены ВФХ гетероструктур с пассивирующим слоем Si_3N_4 при послойном удалении пассивирующего слоя травлением со снятием 3 нм на каждом этапе. Емкость C_{max} исходной структуры определяется из соотношения

$$\frac{1}{C_{max}} = \frac{1}{C_{AlGaN}} + \frac{1}{C_{Si_3N_4}}$$

При этом наблюдается хорошее соответствие полученных величин расчетным. По мере удаления пассивирующего слоя значение C_{max} структуры растет. Сдвиг *C*—*V*-характеристик в сторону положительных значений при травлении свидетельствует о наличии в пассивирующем слое или на границе раздела Si_3N_4 —AlGaN положительного заряда (см. рис. 5). Однако измерение концентрации носителей заряда по глубине в барьерном и канальном слое показывает, что характер распределения и плотность заряда в 2DEG не меняются. Меняется только место расположения 2DEG относительно поверхности структуры (см. рис. 5, вставка).

Исследование гетероструктур со слоем Si_3N_4 методом POP показало, что выращенный непосредственно в процессе эпитаксиального роста (*in-situ*) слоев AlGaN/GaN пассивирующий слой нитрида — псевдомоноткристалл. После химического удаления этого слоя получается строго упорядоченная поверхность AlGaN, где плотность смещенных атомов как основных элементов материала, так и кислорода

Таблица 2

Количество смещенных атомов в приповерхностных слоях анализируемых структур с верхними нелегированными слоями *i*-GaN и *i*-AlGaN
 [Table 2. Number of Shifted Atoms in Superficial Layers of Test Structures with Upper Undoped *i*-AlGaN and *i*-GaN Layers]

Верхний слой структуры	Концентрация основных и примесных элементов, 10^{15} см^{-2}			
	Ga	Al	O	N
<i>i</i> -GaN	1,9	2,2	1,5	2,0
<i>i</i> -AlGaN	3,5	5,4	6,5	41,0

ниже разрешающей способности метода POP при использовании канализованного пучка.

Определяющим в образовании 2DEG в структурах AlGaIn/GaN является, помимо разрыва зон, постоянно действующее электрическое поле, возникающее благодаря наличию в таких структурах неэкранированного поляризованного диполя (рис. 6, а). Если барьерный слой AlGaIn имеет Ga-полярность (как выращены практически все анализируемые гетероструктуры), то поляризованные действующие поля как в барьерном слое, так и в канальном GaN имеют направленность, показанную на рис. 6, а [9]. Согласно работам [9–11], источником электронов в 2DEG являются поверхностные донороподобные состояния барьерного слоя, которые нейтральны, когда они заняты электронами, и положительны, когда не заняты из-за перехода электронов в GaN. Электрическое поле, вызванное спонтанной и пьезоэлектрической поляризацией, может уменьшать среднюю работу выхода электронов из барьерного слоя. Это проявляется в значительном изгибе зон и переходе части инжектируемых электронов, оказавшихся выше уровня Ферми, в зону проводимости GaN с образованием эффективной квантовой ямы. Таким образом, необходимое значение изгиба зон определяется (косвенно) поляризационным зарядом, который, в свою очередь, зависит от толщины и мольной составляющей алюминия в слое AlGaIn. В результате в AlGaIn формируется положительно заряженный слой, а в GaN у границы раздела — электронный газ (см. рис. 6, а). В работе [12] было высказано предположение, что нежелательная дисперсия емкости гетероструктур AlGaIn/GaN, которая в ВЧ-диапазоне является причиной эффекта «отставания на затворе» (*gate-lag effect*), не может быть объяснена действием традиционного ловушечного механизма (наличие электрически активных примесей). Наличие дисперсии можно объяснить с помощью модели релаксации пьезоэлектрических поляризованных полей в слое AlGaIn. Авторы работы [12] утверждают, что когда переориентация пьезоэлектрического поля происходит достаточно быстро и успевает следовать за изменяющимся приложенным электрическим полем при частотах измерений $f_{\text{изм}} < f_{\text{поляр}}^*$, пьезоэлектрическая поляризация дает полный вклад в появление поляризованного заряда. В этом случае значения емкости при ВЧ- и НЧ-измерениях совпадают. Если же переориентация «пьеэополя» в этом слое занимает большее время, т. е. $f_{\text{изм}} > f_{\text{поляр}}^*$, то наблюдается уменьшение ВЧ ВАХ относительно НЧ ВАХ. Таким образом, по мнению авторов работы [12], имеет место частотная зависимость диэлектрической проницаемости материала.

По-видимому, полученные авторами результаты в определенной степени согласуются с утверждениями, высказанными в работе [12]. В частности, наблюдаемое резкое уменьшение дисперсии у гете-

роструктур с верхним слоем *i*-GaN можно связать с изменением эпюры механических напряжений в барьерном слое AlGaIn из-за наличия верхнего слоя из другого материала. Это, в свою очередь, приводит к частичной компенсации и уменьшению пьезоэлектрического поляризованного заряда и, как следствие, к уменьшению C_{max} . Скорее всего при толщине верхнего слоя *i*-GaN порядка 1,5–2,0 нм из-за большой разницы значений поляризованных пьезосоставляющих в барьерном слое и верхнем слое *i*-GaN образование слоя электронов у второй гетерограницы может не происходить или происходит очень слабо. Однако при толщине верхнего слоя *i*-GaN порядка 5 нм, соизмеримой с толщиной барьерного слоя, может происходить образование второго канала (диполя) на верхней границе AlGaIn-*i*-GaN. Тогда зонная диаграмма при нулевом смещении будет иметь вид, показанный на рис. 6, б [11].

Зонная диаграмма с учетом перераспределения внутренних электрических полей в процессе наложения внешнего напряжения смещения различной величины должна меняться, как показано на рис. 7. Возможен вариант, когда суммарные электрические поля (внутреннее поляризованное и внешнее приложенное в процессе смещения $V_{\text{смещ}}^*$) в слоях AlGaIn и *i*-GaN окажутся равными по модулю слева и справа (см. рис. 7, точка В-4). В этом случае центр оси диполя у верхней гетерограницы совпадет с геометрической границей гетероструктур. Тогда из-за равенства по модулю внутренних суммарных электрических полей на границе *i*-GaN—AlGaIn (E_1 и E_2), по-видимому, может наблюдаться возрастание эффективного поляризованного заряда диполя при понижении частотных колебаний для частот $f_{\text{изм}} \leq f_{\text{поляр}}^*$. Это, в свою очередь, может приводить к характерному возрастанию емкости при $V_{\text{смещ}} = V_{\text{смещ}}^*$ на C — V -кривых при измерении на этих частотах. При дальнейшем изменении внешнего поля относительно $V_{\text{смещ}}^*$ нарушается равенство $|E_1| = |E_2|$, центр диполя смещается относительно границы раздела гетероструктуры, частота колебаний снижается и значение измеряемой емкости уменьшается.

Возможно также и другое объяснение факта появления характерных пиков на C — V -кривых при измерении гетероструктуры с верхним, более толстым слоем *i*-GaN за счет работы двух каналов 2DEG на двух гетерограницах. Таким образом, происходит как бы наложение двух встречных C — V -характеристик. Это, в свою очередь, при определенных смещениях может приводить к появлению наблюдаемых пиков. Дополнительным подтверждением того, что трансформация поляризованных зарядов практически определяет электронные свойства структур, являются экспериментальные данные, приведенные на рис. 3 (см. четвертую стр. обложки). Исследовали две одинаковые по составу и толщине слоев структуры с верхним слоем *i*-GaN толщиной 5 нм, выращенные на одной установке при одинаковых режимах. Частот-

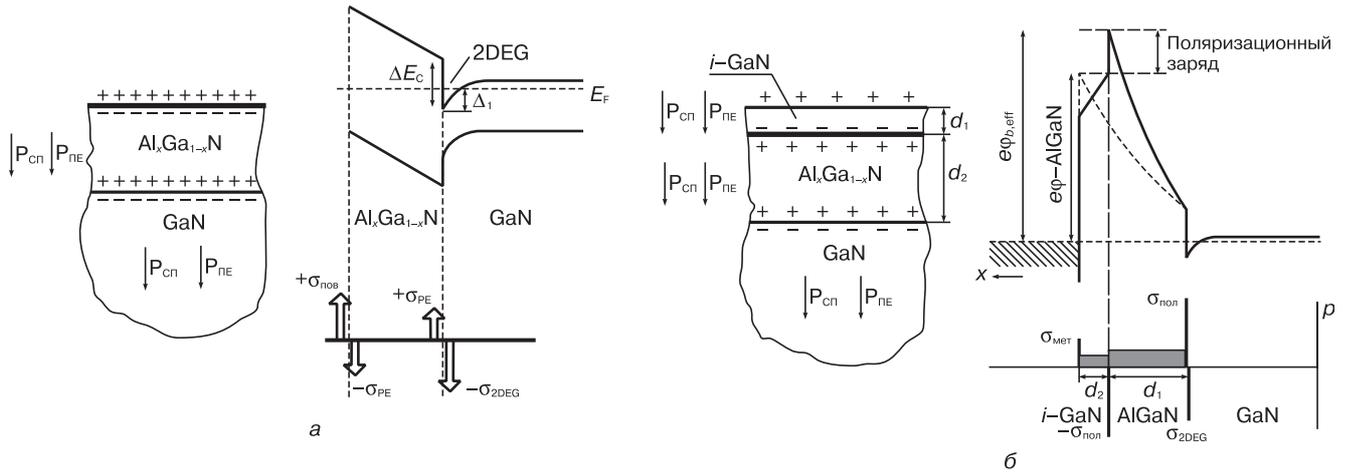


Рис. 6. Зонные диаграммы гетероструктур: а — $Al_xGa_{(1-x)}N(Si)/GaN$ [9, 10]; б — $i-GaN/Al_xGa_{(1-x)}N(Si)/GaN$ с толщиной верхнего слоя 5 нм [11]

Fig. 6. Zone Diagrams of Heterostructures: (a) $Al_xGa_{(1-x)}N(Si)/GaN$ [9, 10]; (b) $i-GaN/Al_xGa_{(1-x)}N(Si)/GaN$ with 5 nm upper layer [11]

ты, при которых фиксировали появление характерного пика на $C-V$ -кривых, оказались разными. Для одной пик появлялся при частотах 100 кГц и ниже, для другой — при 100—500 кГц и ниже (см. рис. 3, а и б). Как указывалось выше, исследования показали, что эти структуры отличаются плотностью дислокаций (см. рис. 3, в и г) практически на порядок. Известно, что с дислокациями связано наличие упругих локальных полей, которые могут менять эпору

напряжений в барьерном слое [9]. Более высокая плотность дислокаций свидетельствует о том, что в данных эпитаксиальных слоях произошла более сильная релаксация упругих напряжений. То есть для этих двух гетероструктур (см. рис. 3) характерна разная по величине трансформация упругих полей и, как следствие, может быть разная трансформация пьезоэлектрического поляризованного заряда. Это может приводить к разной картине семейства

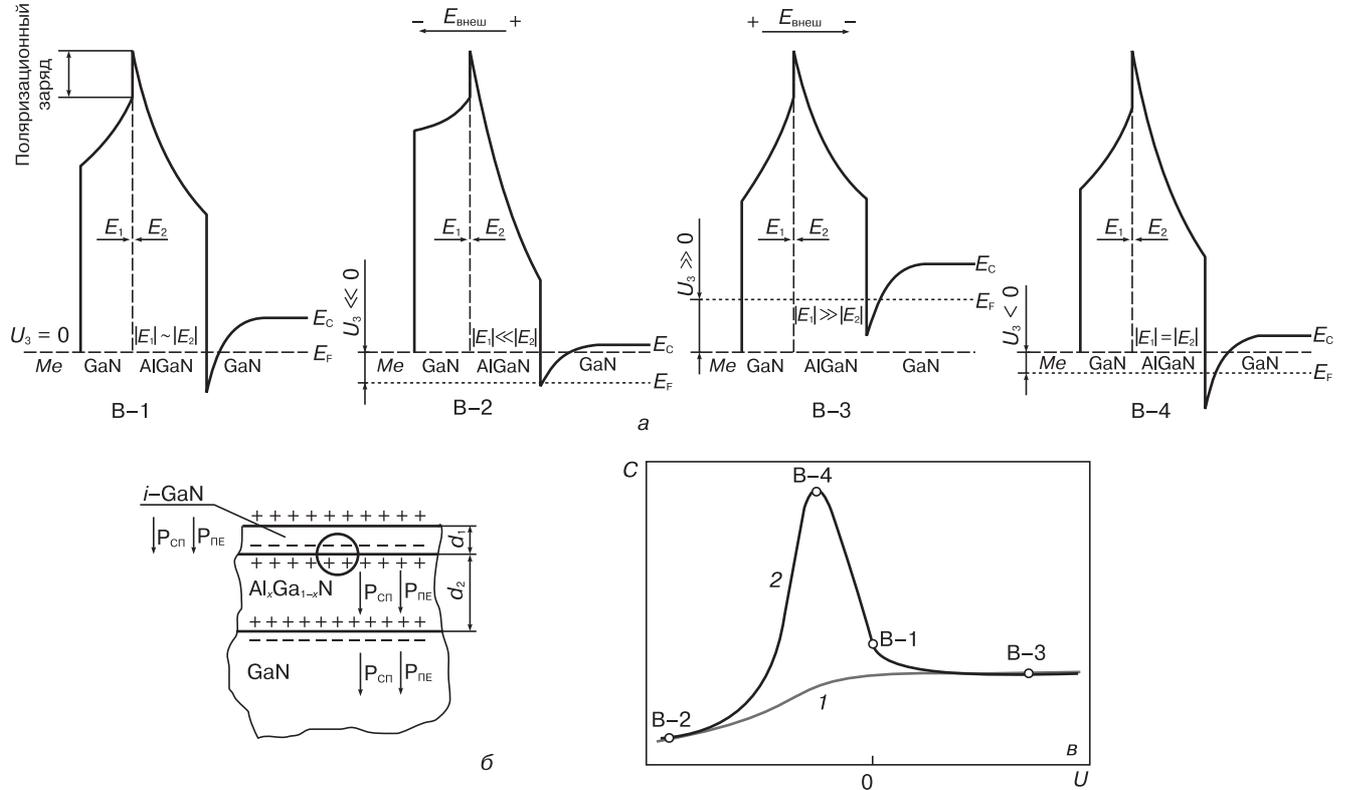


Рис. 7. Зонные диаграммы гетероструктуры $i-GaN/Al_xGa_{(1-x)}N(Si)/GaN$ с толщиной верхнего слоя 5 нм при различных напряжениях смещения (а), строение гетероструктуры (б) и ВАХ (в):

в: 1 — ВЧ-измерения; 2 — НЧ-измерения

Fig. 7. (a) Zone Diagrams of $i-GaN/Al_xGa_{(1-x)}N(Si)/GaN$ Heterostructures with 5 nm upper layer for Different Bias Voltages, (b) Appearance of Heterostructures and (c) I-A Curves: (1) HF Measurements and (2) LF Measurements

частотных $C-V$ -характеристик для этих двух гетероструктур. Кроме того, упругие поля отдельных дислокаций, по-видимому, могут компенсировать друг друга. Однако для более аргументированного объяснения наблюдаемой модуляции емкостей у этих образцов на низких частотах требуется проведение дальнейших исследований.

Таким образом, наличие «сар» i -GaN может быть полезно в борьбе с таким негативным явлением, как дисперсия емкости при высокочастотных измерениях. При этом толщина такого слоя не должна превышать 2,0–2,5 нм. Экспериментально установлено, что наличие слоя «сар» i -GaN приводит к очень незначительному уменьшению плотности поляризационного заряда в канале двумерного электронного газа. Кроме того, как видно из данных табл. 2, приповерхностные слои i -AlGaN имеют менее упорядоченную структуру по сравнению с поверхностью слоя i -GaN: имеют большее количество смещенных атомов галлия и алюминия, а главное — азота (соотношение смещенных атомов Ga : N = 1 : 5) и сильнее обогащены кислородом. Большое количество азотных вакансий может приводить к росту донороподобных поверхностных ловушек. К тому же с учетом большего количества кислорода в качестве доноров могут выступать атомы кислорода, севшие в вакансии азота O_N из-за низкой энергии их образования [3]. Таким образом, структуры с так называемым сар-слоем i -GaN имеют меньшую плотность поверхностных состояний и должны быть более устойчивы к различным внешним воздействиям.

Что касается пассивирующего слоя Si_3N_4 , формируемого непосредственно в процессе эпитаксиального выращивания гетероструктур, то прежде всего необходимо отметить в этом слое наличие большого положительного заряда (см. рис. 5). Эти заряды могут формировать как поверхностные состояния на границах Si_3N_4 —воздух и Si_3N_4 —AlGaN, так и дефекты в объеме самого слоя. Исследования методом POP показали, что после химического удаления слоя Si_3N_4 обнажившаяся поверхность барьерного слоя AlGaN оказывается структурно упорядоченной с минимальным присутствием кислорода. Следовательно, сильной химической связи в процессе роста пассивирующего слоя между Si_3N_4 и AlGaN не образуется, поскольку такое состояние поверхности барьерного слоя на границе Si_3N_4 —AlGaN должно, по-видимому, исключать или уменьшать плотность медленных ловушечных поверхностных состояний. Эти состояния, как было показано выше [2], могут являться, находясь между затвором и истоком прибора, причиной коллапса тока истока. Из-за временных постоянных этих ловушек (временная постоянная этих ловушечных состояний) электроны невозможно удерживать в поверхностном слое для полной коррекции заряда в канале в течение большего сигнала в ВЧ-диапазоне.

Таким образом, использование пассивирующего слоя Si_3N_4 может позволить контролировать нежелательные частотные зависимости тока прибора и приводить к уменьшению пробивных напряжений, связанных со слоем ловушечных электронов вблизи поверхности. Также было показано, что концентрация электронов в канале 2DEG при удалении пассивирующего слоя практически не меняется, а большой положительный заряд на границе Si_3N_4 —AlGaN приводит к еще более высокой слоевой концентрации носителей заряда в канале. Считается также, что пассивация слоем Si_3N_4 меняет термостойкость прибора в достаточной степени, что обеспечивает возможность роста тока насыщения [5].

Заключение

Показано, что наличие верхнего слоя i -GAN в гетероструктурах AlGaN/GaN может быть полезно в борьбе с таким негативным явлением, как дисперсия емкости в ВЧ-диапазоне. При этом толщина этого слоя не должна превышать 1,5–2,5 нм. Наличие такого слоя, практически, не приводит к уменьшению плотности поляризационного заряда в канале 2DEG.

Установлено, что увеличение толщины верхнего слоя i -GaN до толщин, соизмеримых с толщиной барьерного слоя гетероструктур, может приводить к появлению на ВФХ, измеряемых на низкой частоте, характерного пика емкости при переходе из области обеднения в область обогащения. Высказано предположение, что этот эффект связан с влиянием внутренних электрических полей на положение центра диполя поляризационного заряда относительно гетерограницы i -GaN—AlGaN.

Выявлено, что высокие плотности дислокаций в барьерном и канальном слоях гетероструктур приводят к более резкому изменению емкостных характеристик и получению более высоких обратных токов барьеров Шотки, формируемых на таких структурах.

Показано, что формируемый в процессе эпитаксиального роста пассивирующий слой вносит большой положительный заряд. Такой слой может ослаблять отрицательное влияние медленных поверхностных состояний барьерного слоя, не уменьшая при этом концентрации носителей заряда в канале двумерного газа.

Библиографический список

1. Green, B. M. The effect of surface passivation on the microwave characteristics of undoped AlGaIn/GaN HEMTs / B. M. Green, K. K. Chu, E. M. Chumbes, J. A. Smart, J. R. Shealy, L. F. Eastman // IEEE Electron Device Lett. – 2000. – V. 21, N 6. – P. 268–270. DOI: 10.1109/55.843146
2. Liu, W. L. Capacitance–voltage spectroscopy of trapping states in GaN/AlGaIn heterostructure field–effect transistors / W. L. Liu, Y. L. Chen, A. A. Balandin, K. L. Wang // J. Nanoelectronics and Optoelectronics. – 2006. – V. 1. – P. 258–263.
3. Arulkumaran, S. Studies on the influences of i -GaIn, n -GaIn, p -GaIn and InGaIn cap layers in AlGaIn/GaN high–electron–mobility

transistors/ S. Arulkumaran, T. Egawa, H. Ishikawa // *Jap. J. Appl. Phys.* – 2005. – V. 44. – P. 2953–2960.

4. Vertiachikh, A. V. Effect of the surface and barrier defects on the AlGa_N/Ga_N HEMT low-frequency noise performance / A. V. Vertiachikh, L. F. Eastman // *IEEE Electron Dev. Lett.* – 2003. – V. 24, N 9. – P. 535–537. DOI: 10.1109/LED.2003.816588

5. Derluyn, J. Improvement of AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistor structures by in situ deposition of a Si₃N₄ surface layer/ J. Derluyn, S. Boeykens, K. Cheng, R. Vandersmissen, J. Das, W. Ruythooren, S. Degroote, M. R. Leys, M. Germain, G. Borghs // *J. Appl. Phys.* – 2005. – V. 98. – P. 054501–1–5

6. Kroemer, H. Measurement of isotype heterojunction barriers by C–V profiling/ H. Kroemer, Wu–Yi Chien, J. S. Harris (Jr), D. D. Edwall // *Appl. Phys. Lett.* – 1980. – V. 36, N 4. – P. 295–297. DOI: 10.1063/1.91467

7. Enisherlova, K. L. AlGa_N/Ga_N heterostructure study using Rutherford backscattering spectrometry / K. L. Enisherlova, V. S. Kulikauskas, V. V. Zatekin, T. F. Rusak, N. B. Gladysheva, I. I. Razguleyev // *J. Surf. Investigation, X-ray, Synchrotron and Neutron Techniq.* – 2011. – V. 5, N 4. – P. 626–635.

8. Брунков, П. Н. Емкостная спектроскопия электронных состояний в гетероструктурах с квантовыми ямами и квантовыми точками. Дисс. ... докт. физ.–мат. наук / П. Н. Брунков. – СПб., 2007.

9. Ambacher, O. Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-gate AlGa_N/Ga_N heterostructures/ O. Ambacher, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu, M. Murhy, W. J. Schaff, L. F. Eastman // *J. Appl. Phys.* – 1999. – V. 85, N 6. – P. 3222–3233.

10. Ibbetson, J. P. Polarization effects, surface states, and the surface of electrons in AlGa_N/Ga_N heterostructure field effect transistor/ J. P. Ibbetson, P. T. Fini, K. D. Ness, S. P. DenBaars, J. S. Speck, U. K. Mishra // *Appl. Phys. Lett.* – 2000. – V. 77, N 2. – P. 250–252

11. Yu, E. T. Spontaneous and piezoelectric polarization effects in III–V nitride heterostructures / E. T. Yu, X. Z. Dang, P. M. Asbeck, S. S. Lau // *J. Vac. Sci. Technol. B.* – 1999. – V. 17, N 4. – P. 1742–1749.

12. Dawei, Y. Capacitance and conduction dispersion in AlGa_N/Ga_N heterostructure/ Yan Dawei, Wang Fuxue, Zhu Zhaomin, Cheng Jianmin, Gu Xiaofeng // *J. Semiconductors.* – 2013. – V. 34, N 1. – P. 014003–1–4.

Статья поступила в редакцию 31 марта 2015 г.

ISSN 1609–3577 *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki = Materials of Electronic Technics.* 2015, vol. 18, no. 2, pp. 137–145.

Investigation of the Passivation Layers Influence on Capacitance Characteristics of AlGa_N/Ga_N Heterostructures

Kira L. Enisherlova¹ — Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory (Enisherlova@pulsarnpp.ru); Vladimir G. Goryachev¹ — Senior Researcher (wlg2_17@rambler.ru); Tatyana F. Rusak¹ — Senior Researcher; Semen A. Kapilin¹

¹JSC «S&PE «Pulsar»,
27 Okružhnoi proezd, Moscow 105187, Russia

Abstract. AlGa_N/Ga_N heterostructures grown by MOCVD method on sapphire and silicon substrates were test subjects. The capacity–voltage characteristic measurements have been run in 200Hz – 1MHz frequency range at planar disposition of mercury and second probe on the sample surface. The shape of typical C–V curves for the heterostructures with the upper undoped i-AlGa_N and i-Ga_N layers at thickness 15–25 Å have been analyzed. The appearance of a typical peak on the C–V curves at changing from depletion region to accumulation region has been registered for some structures with thickness of i-Ga_N layer 50 Å at low frequencies ($f < 50–200$ kHz). The height of this peak increased with reduction of frequency. It has been found experimentally that frequency at which the peak is registered can depend on the dislocation density in heterostructures. Possible explanation of the peak formation and band diagram modifications in these structures under an applied electric field have been presented. We show that using a Si₃N₄ passivation layer results in the formation of additional positive charge.

Keywords: AlGa_N/Ga_N heterostructures, capacity–voltage characteristic, frequency measurement, band diagram, 2D electron gas, dislocation, Rutherford backscattering.

References

- Green, B. M., Chu K. K., Chumbes E. M., Smart J. A., Shealy J. R., Eastman L. F. The effect of surface passivation on the microwave characteristics of undoped AlGa_N/Ga_N HEMTs. *IEEE Electron Dev. Lett.* 2000, vol. 21, no. 6, pp. 268–270. DOI: 10.1109/55.843146
- Liu W. L., Chen Y. L., Balandin A. A., Wang K. L. Capacitance–Voltage spectroscopy of trapping states in Ga_N/AlGa_N heterostructure field–effect transistors. *J. Nanoelectronics and Optoelectronics.* 2006, vol. 1, pp. 258–263.
- Arulkumaran S., Egawa T., Ishikawa H. Studies on the influences of i-Ga_N, n-Ga_N, p-Ga_N and InGa_N cap layers in AlGa_N/

Ga_N high–electron–mobility transistors. *Jap. J. Appl. Phys.* 2005, vol. 44, pp. 2953–2960.

4. Vertiachikh A. V., Eastman L. F. Effect of the surface and barrier defects on the AlGa_N/Ga_N HEMT low-frequency noise performance. *IEEE Electron Dev. Lett.* 2003, vol. 24, no. 9, pp. 535–537. DOI: 10.1109/LED.2003.816588

5. Derluyn J., Boeykens S., Cheng K., Vandersmissen R., Das J., Ruythooren W., Degroote S., Leys M. R., Germain M., Borghs G. Improvement of AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistor structures by in situ deposition of a Si₃N₄ surface layer. *J. Appl. Phys.* 2005, vol. 98, pp. 054501–1–5

6. Kroemer H., Chien Wu–Yi, Harris (Jr) J. S., Edwall D. D. Measurement of isotype heterojunction barriers by C–V profiling. *Appl. Phys. Lett.* 1980, vol. 36, no. 4, pp. 295–297. DOI: 10.1063/1.91467

7. Enisherlova K. L., Kulikauskas V. S., Zatekin V. V., Rusak T. F., Gladysheva N. B., Razguleyev I. I. AlGa_N/Ga_N heterostructure study using Rutherford backscattering spectrometry. *J. Surf. Investigation, X-ray, Synchrotron and Neutron Techniq.* 2011, vol. 5, no. 4, pp. 626–635.

8. Brunkov P. N. *Emkostnaya spektroskopiya elektronnykh sostoyanii v geterostrukturakh s kvantovymi yamami i kvantovymi tochkami.* Diss. dokt. fiz.–mat. nauk [Capacitive spectroscopy of electronic states in heterostructures with quantum wells and quantum dots. Diss. Dr. Sci. (Phys.–Math.)]. Saint–Petersburg, 2007. (In Russ.)

9. Ambacher O., Smart J., Shealy J. R., Weimann N. G., Chu K., Murhy M., Schaff W. J., Eastman L. F. Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-gate AlGa_N/Ga_N heterostructures. *J. Appl. Phys.* 1999, vol. 85, no. 6, pp. 3222–3233.

10. Ibbetson J. P., Fini P. T., Ness K. D., DenBaars S. P., Speck J. S., Mishra U. K. Polarization effects, surface states, and the surface of electrons in AlGa_N/Ga_N heterostructure field effect transistor. *Appl. Phys. Lett.* 2000, vol. 77, no. 2, pp. 250–252

11. Yu E. T., Dang X. Z., Asbeck P. M., Lau S. S. Spontaneous and piezoelectric polarization effects in III–V nitride heterostructures. *J. Vac. Sci. Technol. B.* 1999, vol. 17, no. 4, pp. 1742–1749.

12. Dawei Yan, Fuxue Wang, Zhaomin Zhu, Jianmin Cheng, Xiaofeng Gu. Capacitance and conduction dispersion in AlGa_N/Ga_N heterostructure. *J. Semiconductors.* 2013, vol. 34, no. 1, pp. 014003–1–4.

Received March 31, 2015