

# ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СЛОИ И МНОГОСЛОЙНЫЕ КОМПОЗИЦИИ

EPITAXIAL LAYERS AND MULTILAYERED COMPOSITIONS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2022. Т. 25, № 3. С. 227—237.  
DOI: 10.17073/1609-3577-2022-3-227-237

УДК 621.315.592

## Влияние обработки в азотной плазме на электрические параметры гетероструктур AlGaIn/GaN

© 2022 г. К. Л. Енишерлова<sup>1</sup>✉, Л. А. Сейдман<sup>1</sup>, С. Ю. Боголюбова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> АО «НПП «Пульсар»,  
Окружной проезд, д. 27, Москва, 105187, Российская Федерация

✉ Автор для переписки: enisherlova@pulsarnpp.ru

**Аннотация.** Исследовано влияние глубоких уровней, образующихся на границе раздела SiON/AlGaIn при воздействии азотной плазмы в процессе осаждения пленки SiON, на электрические параметры структур SiON/AlGaIn/GaN. Проведены измерения концентрации и подвижности свободных носителей в 2DEG и емкостных параметров структур. Экспериментально установлено, что кратковременное воздействие азотной плазмы (25 и 50 с) не меняет концентрацию свободных носителей в 2DEG, но приводит к уменьшению величины их подвижности. Рассчитана величина заряда, который может образоваться на границе SiON/AlGaIn. С помощью C—V-измерений экспериментально показано, как изменяется заряд в системе SiON/AlGaIn/GaN в процессе одного цикла измерений при разных диапазонах напряжения. На основе рассмотрения зонных диаграмм системы предложены возможные объяснения процессов перераспределения заряда в анализируемой системе при определенных воздействиях.

**Ключевые слова:** HEMT-приборы, коллапс, дисперсия, глубокие уровни, точечные дефекты, плотность и подвижность свободных носителей заряда, зонные диаграммы, поляризационный заряд

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность за обсуждение результатов В.Г. Горячеву и Э.М. Темпер.

**Для цитирования:** Енишерлова К.Л., Сейдман Л.А., Боголюбова С.Ю. Влияние обработки в азотной плазме на электрические параметры гетероструктур AlGaIn/GaN. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2022; 25(3): 227—237. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-3-227-237>

# Effect of treatment in nitrogen plasma on the electrical parameters of AlGaN/GaN heterostructures

K. L. Enisherlova<sup>1</sup>✉, L. A. Seidman<sup>1</sup>, S. Yu. Bogolyubova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> JSC “S&PE “Pulsar”,  
27 Okruzhnoy Passage, Moscow 105187, Russian Federation

✉ Corresponding author: enisherlova@pulsarnpp.ru

**Abstract.** In this work, the influence of deep levels formed at the SiON/AlGaN interface under the nitrogen plasma action during the deposition of a SiON film on the electrical parameters of SiON/AlGaN/GaN structures were studied. The concentration and mobility of free carriers in 2DEG and the capacitance parameters of the structures were measured. It has been experimentally established that short-term action of nitrogen plasma (25 and 50 sec.) does not change the concentration of free carriers in 2DEG, but leads to a decrease in their mobility. The value of the charge that can form at the SiON/AlGaN interface has been calculated. With the help of C–V measurements, it was experimentally shown how the charge in the SiON/AlGaN/GaN system changes during one measurement cycle at different voltage ranges. Based on the consideration of the energy band diagrams of the system, possible explanations for the charge redistribution processes in the analyzed system under certain actions are proposed.

**Keywords:** HEMT devices, collapse, dispersion, deep levels, point defects, density and mobility of free carriers, band diagrams, polarization charge

**Acknowledgments.** The authors are grateful for the discussion of the results of V.G. Goryachev and E.M. Temper.

**For citation:** Enisherlova K.L., Seidman L.A., Bogolyubova S.Yu. Effect of treatment in nitrogen plasma on the electrical parameters of AlGaN/GaN heterostructures. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki* = *Materials of Electronics Engineering*. 2022; 25(3): 227–237. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-3-227-237>

## Введение

Тройные сплавы широкозонных нитридных материалов все больше используются при разработке и изготовлении мощных, высокочастотных HEMT-приборов [1]. Повышение рабочих частот транзисторов требует использования нитридных гетероструктур со все более тонкими барьерными слоями. Однако ультратонкие эпитаксиальные барьерные слои (AlGaN, AlN, InAlN) могут приводить к значительным токам утечки [1; 2, С. 186—206]. Оптимально в этом случае введение нанотонких слоев диэлектриков под затвором, что может препятствовать возникновению токов утечки, но приводит к созданию дополнительных интерфейсов, что, в свою очередь, может обуславливать возникновение дополнительного заряда под затвором транзистора. Слои диэлектриков в технологии HEMT-транзисторов используются также в качестве пассивирующих слоев поверхности областей между истоком и стоком. Выбор материала диэлектрика и технология формирования границы раздела диэлектрика с полупроводником

оказывают влияние на параметры транзистора и его деградацию [3].

Уже в самом начале разработки мощных, высокочастотных HEMT-транзисторов на основе нитридных гетероструктур возникшие проблемы с их деградацией, в частности, так называемый, коллапс, а также «сжатие» тока стока при работе с большими радиочастотными сигналами [4, 5] стали тормозить их широкое использование. Считается, что как коллапс, так и дисперсия тока в ВЧ-диапазоне происходят из-за наличия ловушек — глубоких уровней в запрещенной зоне полупроводника [5]. Источником возникновения таких состояний являются точечные дефекты материала, примеси и их комплексы вблизи границы раздела диэлектрик/AlGaN [5, 6]. Исследования показали, что, действительно, для этих эпитаксиальных гетероструктур характерно наличие большого количества собственных точечных дефектов, их комплексов и фоновых примесей, в частности кислорода [7].

Одним из эффективных средств очистки поверхности от атомарных загрязнений перед формированием слоя диэлектрика является об-

работка поверхности низкоэнергетическими ионами (25—100 эВ) аргона, азота или кислорода [8], которую проводят в вакуумной камере, например, непосредственно перед операцией формирования слоя диэлектрика. Вопрос о том, что происходит при такой обработке, обсуждается в работах [7, 8]. Высокая чувствительность сложных полупроводниковых материалов к воздействию ионов отмечалась, в частности, в работе [7], авторами которой было показано, что обработка поверхности GaAs ионами аргона с энергией 50 эВ может приводить к изменению ВАХ приборов, сформированных на этих структурах. Также в работе [3] экспериментально продемонстрировано как обработка в  $\text{Cl}_2/\text{Ar}$ -плазме при формировании углубления под затвор в MIS HEMT-транзисторах может приводить к коллапсу тока прибора и возникновению фликер-шумов из-за образования дефектов при такой обработке. Причем было показано, что изменение соотношения элементов в газовой смеси при травлении ионами плазмы газовой смеси  $\text{Cl}_2/\text{Ar}$  может приводить к увеличению количества ловушек [3].

С учетом сказанного выше, а также с учетом результатов, полученных в работах [3, 9], было решено провести более подробное исследование влияния обработки азотной плазмой поверхности гетероструктур AlGaIn/GaN на электрические параметры этих структур. Кроме того, одной из задач было определение оптимальных условий измерения  $C$ — $V$ -характеристик, которые наиболее наглядно демонстрируют влияние такой обработки на  $C$ — $V$ -характеристики гетероструктур.

### Образцы и методы исследования

Объектом исследования были гетероструктуры AlGaIn/GaN диаметром 52 мм, выращенные на сапфире методом MOCVD: «барьерный слой  $i$ -AlGaIn (20 нм) — буферный слой GaN (2—2,5 мкм)». В качестве подложки использовали пластины сапфира с ориентацией рабочей поверхности (0001). Молярное содержание алюминия в барьерном слое составляло 0,26—0,3.

Непосредственно перед загрузкой структур в рабочую камеру установки их подвергали обработке в течение 90 с в струе диметила, формируемой под давлением 80 атм при температуре 80 °С. Далее проводили обработку струей изопропилового спирта при температуре 30 °С с последующей сушкой в азоте.

Осаждение покрытия состава SiON толщиной 70—80 нм с коэффициентом преломления  $n = 1,77$ — $1,78$  проводили на установке Plasmalab System 100 ICP180. Режим осаждения подробно описан в работе [10]. Непосредственно перед осаждением этого покрытия в ректоре этой же установ-

ки ряд образцов подвергался воздействию азотной плазмы продолжительностью 25 или 50 с при рабочем потоке азота в реактор и без подачи смещения на образец. При обработке в плазме энергия ионов составляла 90 эВ, температура подложки при обработке в плазме и осаждении пленки —  $T = 200$  °С. После обработки азотной плазмой, не останавливая процесс, в камеру подавали поток моносилана для формирования на подложке слоя SiON.

В полученных образцах определяли плотность и подвижность свободных носителей заряда в двумерном газе (2DEG) гетероструктур, а также измеряли  $C$ — $V$ -характеристики.

Результаты измерения сопротивления  $R_s$  и коэффициента Холла  $R_H$  использовались для расчета плотности  $n_s$  и подвижности  $\mu$  свободных носителей заряда в 2DEG. Измерения проводили методом Ван-дер-Пау [11, С. 29—31] с использованием традиционной четырехконтактной геометрии. Контакты формировали напылением четырехслойной композиции: Ti—Al—Mo—Au и вжигали при  $T = 600$  °С. Для определения коэффициента Холла измерения выполняли с использованием постоянного магнита при фиксированном значении индукции магнитного поля ( $B = 0,136$  Тл). Относительная погрешность определения  $R_H$  не превышала  $\pm 7$  % [11, С. 29—31].

Кроме того, измерения этих параметров проводили СВЧ-методом на установке «Измерительная система подвижности серии LEI-1600 Series User Guide» с маломощным микроволновым источником, работающим на частоте 10 ГГц (длина волны 3 см), соединенным с волноводом, который направляет СВЧ-волну на поверхность измеряемого образца. Падающая волна в установке используется для генерации двух типов отраженных волн. При измерении слоевого сопротивления  $R_s$  измеряются мощности падающего и отраженного от образца излучения, по полученным сигналам рассчитывается сопротивление. При измерении коэффициента Холла отраженная от образца волна под действием дополнительного магнитного поля поворачивается на 90°, при этом с помощью специального зонда измеряется мощность этой поляризованной волны. В нашем случае при измерении  $R_H$  магнитное поле составляло 0,3 Тл. Полученные тензорные коэффициенты проводимости и коэффициента Холла затем используются для расчета подвижности и плотности свободных носителей [12]. Измерения на структурах выполняли в пяти точках за счет перемещения концевой волновода диаметром 20 мм в плоскости структуры.

Измерения  $C$ — $V$ -характеристик проводили для оценки изменения заряда в анализируемых структурах до и после обработки в азотной плазме и последующего осаждения слоя SiON. Для оптимальной оценки влияния условий осаждения SiON

измерения емкостных характеристики проводили в трех разных диапазонах напряжений как в прямом (от «+» к «-»), так и обратном (от «-» к «+») направлении: от -8 до +2 В, от -4 до +5 В и от -2 до +8 В. Скорость развертки была одинаковой (1 В/с).

C—V-характеристики снимали на установке CSM/WIN System в основном при частоте 1 МГц с помощью капиллярного ртутного зонда площадью 0,005 см<sup>2</sup>, причем измерения проводили при планарном расположении на поверхности образцов измерительного зонда и второго электрода в виде ртутного кольца. C—V-зависимости снимали по параллельной (индекс-р) схеме замещения.

Необходимо заметить, что в работе использовалась не обычно применяемая при измерениях

C—V-характеристик схема с одним барьером Шоттки (**БШ**) [14], второй контакт — омический, а схема с двумя БШ разной площади (рис. 1): первый БШ — капиллярный ртутный зонд, второй БШ — ртутный зонд, площадь которого в 40 раз превышает площадь измерительного зонда. Благодаря этому емкость конденсатора, образованного вторым БШ, в 40 раз превышает емкость первого БШ. При измерении C—V-характеристик эти конденсаторы соединены последовательно, и поэтому емкость второго БШ не влияет на значение измеряемой емкости.

Использование такой схемы, прежде всего, позволяет исключить дополнительные технологические воздействия на результаты измерений,

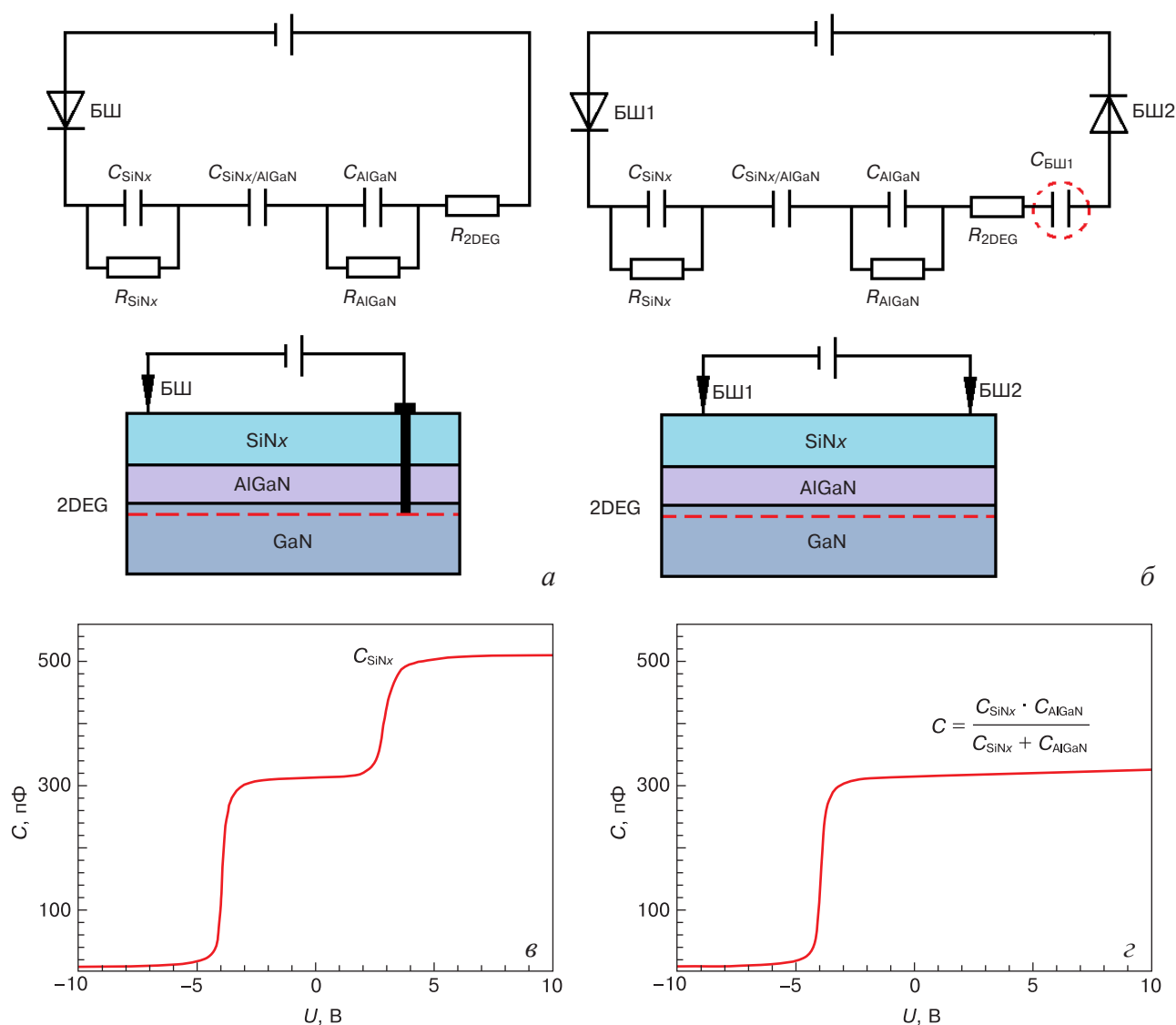


Рис. 1. Эквивалентные схемы замещения для C—V-измерений по схеме: а — БШ1/SiON/AlGaH/GaN/Me; б — БШ1/SiON/AlGaH/GaN/БШ2; в, г — характерный вид C—V-кривых при измерении по схеме «а» и «б» соответственно.

Емкость  $C_{BШ2}$  влияет на характер C—V-кривых при измерении по схеме «б» только в режиме сильного обогащения

Fig. 1. Equivalent equivalent circuits for C—V measurements according to the scheme: (a) BSh1/SiON/AlGaH/GaN/Me; (б) BSh1/SiON/AlGaH/GaN/BSh2; (в, г) typical shape of the C—V curves when measured according to scheme “a” and “б”, respectively. The capacitance of  $C_{BШ2}$  affects the nature of the C—V curves when measured according to scheme “б” only in the mode of strong enrichment

в частности, температурную обработку образцов при формировании омического контакта. В режиме обеднения, электрические схемы замещения для этих двух вариантов практически одинаковые. Однако надо учитывать, что в обогащении для варианта с металлическим контактом при смещении напряжения в сторону положительных значений на  $C-V$ -кривой, как правило, появляется вторая более высокая ступень, где емкость на плато определяется емкостью изолятора (см. рис. 1, а). При использовании схемы с двумя БШ в режиме сильного обогащения в результате образования области обеднения под вторым зондом большой площади на результаты измерения может влиять большая емкость второго зонда (см. рис. 1, б). Это, в свою очередь, может ограничить диапазон измерения по напряжению.

### Результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведены усредненные значения сопротивления  $R_s$ , измеренные двумя методами (СВЧ-методом и Ван-дер-Пау) и рассчитанные по ним следующие величины: плотность  $n_s$  и подвижность  $\mu$  свободных носителей заряда как для исходных гетероструктур, так и для этих же структур после воздействия на их поверхность азотной плазмы и формирования слоя SiON.

Как видно из табл. 1, после воздействия плазмы (25 с) и формирования слоя диэлектрика наблюдается рост слоевого сопротивления  $R_s$  относительно исходных гетероструктур, причем увеличение продолжительности обработки до 50 с приводит к росту значения  $R_s$  (почти в два раза). При этом наблюдается уменьшение подвижности электронов в 2DEG, а плотность свободных носителей в 2DEG практически не меняется, так же, как при нанесении SiON без предварительного воздействия плазмы.

На рис. 2, а показано семейство  $C-V$ -кривых, полученных при измерении исходных гетеро-

структур AlGaIn/GaN после осаждения на них слоя диэлектрика SiON без предварительного воздействия азотной плазмы. Кривые снимались, как указано выше, при разных диапазонах развертки по напряжению: от  $-8$  В до  $+2$  В и от  $-3$  В до  $+6$  В (см. рис. 2, а и б); в большинстве случаев измерения производились при развертке в прямом направлении (от « $-$ » к « $+$ »). Как видно из рис. 2, а, в этом случае максимальная величина измеренной емкости в области обогащения ( $C_{изм}$  на плато) при всех диапазонах развертки практически не меняется и близка к величине  $C_{расч}$  ( $1/C_{расч} = 1/C_{SiON} + 1/C_{AlGaIn}$ ;  $C_{расч} = 260$  пФ,  $C_{изм} = 245 \div 250$  пФ). При прямой и обратной развертке по напряжению наблюдается небольшой гистерезис.

Полученные экспериментальные результаты (см. рис 2, а) показывают зависимость напряжений отсечки  $V_p$  (на  $C-V$ -характеристике это напряжение соответствует напряжению, при котором  $C_{изм} = 0$ ) от начального значения напряжений при развертке: при сдвиге начала развертки в положительные значения наблюдается сдвиг напряжений  $V_p$  также в сторону положительных значений. Для анализируемых структур  $C-V$ -измерения проводились, главным образом, в области положительных значений напряжений (рис. 3). При анализе результаты, полученные при напряжении более  $+4$  В, не рассматривались в обсуждении, поскольку изменение  $C$  при этих напряжениях определяется емкостью БШ2 (см. рис. 1).

При введении дополнительной обработки азотной плазмой даже в течение 25 с наблюдается изменение вида  $C-V$ -кривых при одинаковых диапазонах развертки, в частности, наблюдается более сильный сдвиг напряжения  $V_p$  в сторону положительных значений (рис. 2, в, кривые 1 и 2) и уменьшение значения  $C_{изм}$  (с 245 до 236 пФ, табл. 2). Увеличение продолжительности воздействия плазмы с 25 до 50 с приводит к еще более резкому уменьшению  $C_{изм}$  (см. табл. 2) и более сильному сдвигу  $C-V$ -кривой в сторону положительных значе-

Таблица 1

**Параметры структур, измеренные СВЧ-методом и методом Ван-дер-Пау**  
Structure parameters measured by the microwave method and the Van der Pauw method

№ образца	Параметры исходных гетероструктур				Параметры после обработки и осаждения пленки				
	Анализируемая структура	$R_s$ , Ом/□	$\mu_s$ , см <sup>2</sup> /(В·с)	$n_s$ , 10 <sup>12</sup> см <sup>-2</sup>	Анализируемая структура	Время обработки плазмой, с	$R_s$ , Ом/□	$\mu_s$ , см <sup>2</sup> /(В·с)	$n_s$ , 10 <sup>12</sup> см <sup>-2</sup>
1	AlGaIn/ GaN	296	1800	13	SiON <sub>x</sub> / AlGaIn/ GaN ( $d_{SiONx} = 80$ нм)	0	287	1600	14
2		307	2320	9,6		25	440	1550	11,5
3		300	2280	9,6		50	585	1340	11,3

Примечание: В таблице приведены усредненные значения параметров, полученные при использовании метода Ван-дер-Пау и СВЧ-метода.



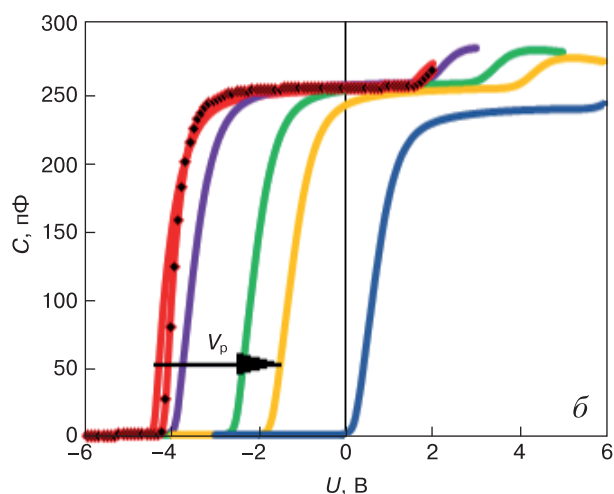
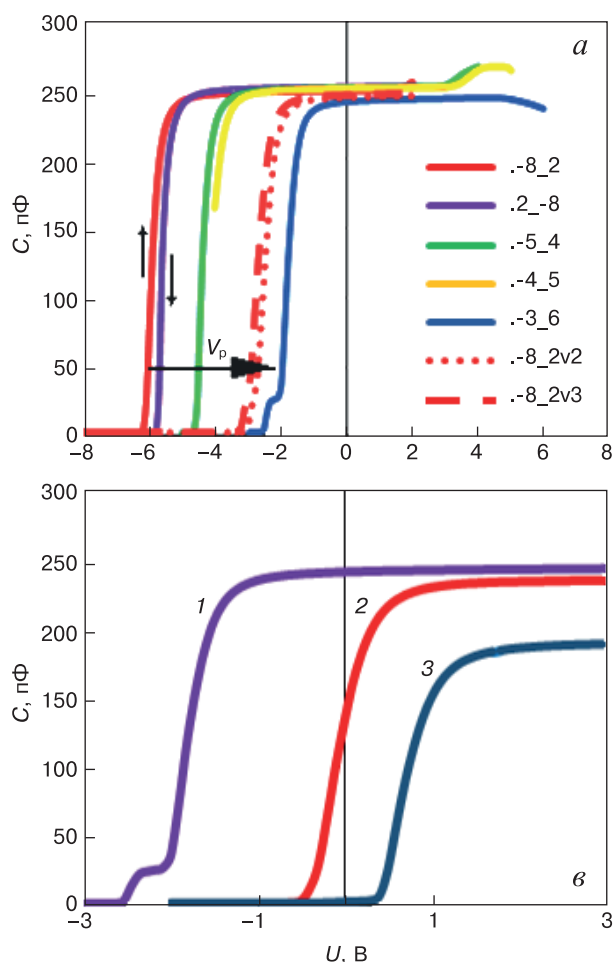


Рис. 2.  $C$ — $V$ -характеристики при прямой развертке в различных диапазонах напряжений структур SiON/AlGaIn/GaN: а — без воздействия азотной плазмы; б — с воздействием азотной плазмы; в — фрагменты  $C$ — $V$ -характеристик при развертке от  $-3$  В до  $+8$  В (1 — без воздействия плазмы; 2, 3 — с воздействием плазмы в течение 25 и 50 с соответственно)

Fig. 2.  $C$ — $V$  characteristics with direct sweep in different voltage ranges of SiON/AlGaIn/GaN structures: (a) without exposure to nitrogen plasma; (б) with exposure to nitrogen plasma; (в) fragments of  $C$ — $V$  characteristics during a sweep from  $-3$  V to  $+8$  V (1 — without plasma exposure; 2, 3 — with plasma exposure for 25 and 50 s, respectively)

ний (см. рис. 2, в, кривая 3). Кроме того, обработка плазмой приводит к незначительному изменению наклона  $C$ — $V$ -кривых в области перехода из обеднения в обогащение (см. рис. 2, в). Сравнительный анализ  $C$ — $V$ -кривых структур SiON/AlGaIn/GaN с обработкой в азотной плазме и без нее (см. рис. 2, а и б) показал, что влияние обработки плазмой на емкостные параметры структур наиболее сильно

проявляется в области положительных значений напряжения. Это важно, так как этот диапазон напряжений — область рабочего участка стоковой характеристики HEMT-транзисторов.

На рис. 3 показаны  $C$ — $V$ -характеристики анализируемых структур SiON/AlGaIn/GaN с воздействием азотной плазмы продолжительностью 25 и 50 с при прямой и обратной развертке в диапазоне

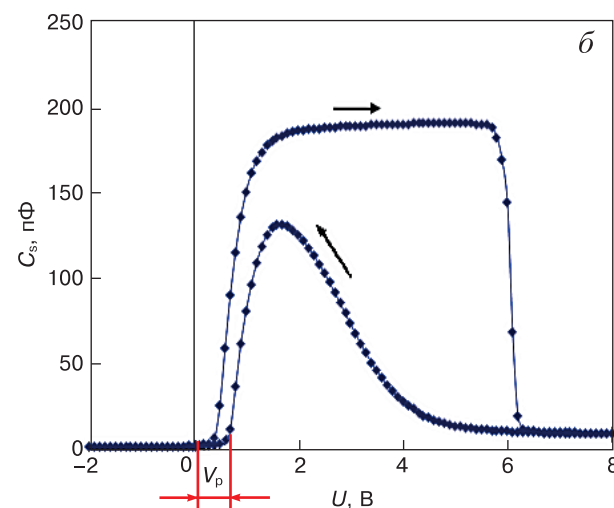
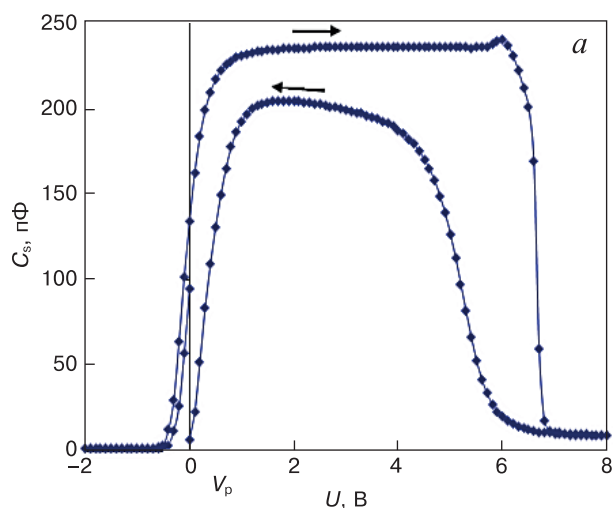


Рис. 3.  $C$ — $V$ -характеристики при прямой и обратной развертке структур SiON/AlGaIn/GaN при воздействии азотной плазмы в течение 25 (а) и 50 (б) с

Fig. 3.  $C$ — $V$  characteristics during forward and reverse scanning of SiON/AlGaIn/GaN structures exposed to nitrogen plasma for 25 (a) and 50 (б) s

напряжений от  $-2$  В до  $+8$  В. Из рис. 3 видно что, если значение сдвига напряжения  $V_p$  изменяется незначительно при прямой и обратной развертке в двух вариантах, то величина емкости  $C_{изм}$  на плато в зависимости от продолжительности воздействия плазмы при прямой развертке изменяется существенно (от 236 до 190 пФ), а при обратной развертке наблюдается резкое падение емкости  $C_{изм}$  в максимуме.

### Обсуждение результатов

При  $C-V$ -измерениях гетероструктур AlGaIn/GaN знак и величина напряжения отсечки  $V_p$  определяются значением компенсирующего поляризационного заряда  $Q_{pol}^+$  (рис. 4), равного  $Q_{-k}^- = n_s q$ , где  $n_s$  — плотность свободных носителей в 2DEG;  $q$  — заряд электрона [5, 12, 16]. В системе SiON/AlGaIn/GaN появление дополнительной границы раздела SiON/AlGaIn с определенной плотностью электронных состояний приводит к нестабильности напряжения  $V_p$ . Нестабильность объясняется тем, что электронные состояния на границе изолятор/AlGaIn могут захватывать или выбрасывать электроны, в результате чего в системе, помимо заряда  $Q_{pol}^+$ , равного отрицательному заряду  $Q_{-k}^-$ , формируемому «канальными» электронами, появляется заряд  $Q_{it}$ , формируемый состояниями на границе SiON/AlGaIn (см. рис. 4, а). Кроме того, возникает отрицательный поляризационный заряд  $Q_{pol}^-$  в слое AlGaIn и заряд в слое изолятора. Однако именно из-за появления заряда  $Q_{it}$  величина на-

пряжения  $V_p$  будет изменяться во время измерения в зависимости от знака и величины приложенного напряжения. В частности, в работах [5, 16] экспериментально показано влияние заряда  $Q_{it}$  на  $V_p$  и то, как это влияние может изменяться в течение одного цикла  $C-V$ -измерений при развертке по напряжению. Влиянием этого заряда объясняется сдвиг напряжения  $V_p$  в сторону положительных значений при изменении приложенного напряжения (см. рис. 2, а и б), причем независимо от того, было воздействие азотной плазмой на образец или нет.

Результатом воздействия азотной плазмы является не только смещение значения  $V_p$  при прямой развертке с  $-2,5$  до  $-0,5$  В (см. рис. 3, табл. 2), но и изменение величины емкости  $C_{изм}$  на плато (см. рис. 2, в, табл. 2), причем увеличение продолжительности воздействия плазмы приводит к дальнейшему уменьшению емкости и к дальнейшему смещению  $V_p$  в сторону положительных значений (см. рис. 3). При обратной развертке характер  $C-V$ -кривых меняется еще более радикально (см. рис. 3). Все это свидетельствует о том, что после воздействия азотной плазмы происходит перераспределение в зарядовой системе. В связи с этим представляет интерес оценить величину заряда, который может сформироваться на границе раздела SiON/AlGaIn.

В работах [5, 16] предложено оценивать величину заряда на границах раздела в таких сложных структурах, как металл/диэлектрик/AlGaIn/GaN при напряжении на зонде, равном  $V_p$ . При этом край зоны проводимости  $E_c$  для GaN у интерфейса AlGaIn/GaN лежит выше уровня Ферми  $E_F$  (см. рис. 4). С учетом локального падения напряжения на различных участках цепи (см. рис. 4) и закона непрерывности электрического потока вместе с границами AlGaIn/GaN и SiON/AlGaIn можно записать следующее уравнение [5, 16]:

$$\begin{aligned} -qV_p + \phi_b - q\Delta V_{SiON} - \Delta E_{c1} - \\ - q\Delta V_{AlGaIn} - \Delta E_{c2} - \phi_F = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

С помощью уравнения (1) авторы работ [5, 16] выводят следующее уравнение для расчета напряжений  $V_p$ :

$$\begin{aligned} V_p = \left( \frac{\phi_b - \Delta E_{c1} - \Delta E_{c2} - \phi_F}{q} \right) - \frac{d_{SiON}}{\epsilon_{SiON}} (Q_{sum}) - \\ - \left( \frac{\epsilon_{AlGaIn} d_{SiON} + \epsilon_{SiON} d_{AlGaIn}}{\epsilon_{AlGaIn} \epsilon_{SiON}} \right) Q_{pol}^+, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\phi_b$  — работа выхода для материала зонда (для Hg — 4,5 эВ);  $\Delta E_{c1}$  — сдвиг зоны проводимости на границе изолятор/AlGaIn (для SiON/AlGaIn  $-0,5$  эВ);  $\Delta E_{c2}$  — сдвиг зоны проводимости на границе AlGaIn/GaN (0,23 эВ);  $\phi_F = E_c - E_F$  (0,4 эВ);  $Q_{pol}^+$  — положительный заряд из-за суммы

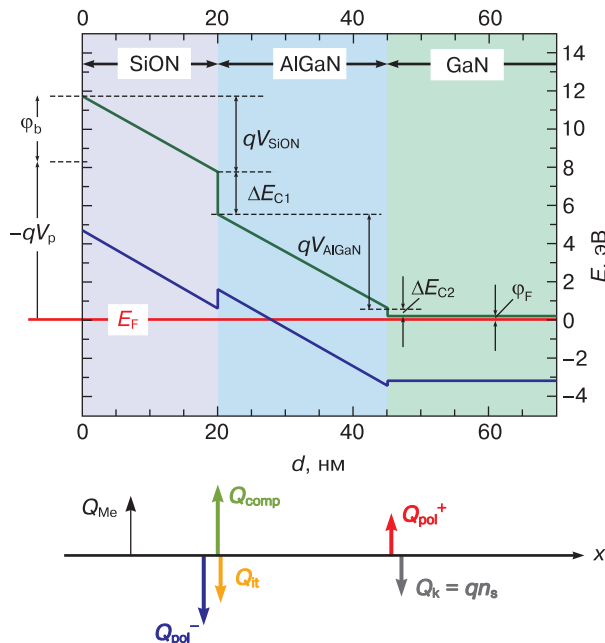


Рис. 4. Зонная диаграмма системы SiON/AlGaIn/GaN при отрицательном напряжении на зонде и распределение зарядов [5]

Fig. 4. Band diagram of the SiON/AlGaIn/GaN system at a negative probe voltage and charge distribution [5]

Таблица 2

**Емкостные параметры и величины зарядов в анализируемых структурах**  
 Capacitance parameters and charges in the structures under analysis

№ струк- туры	Состав структуры	Время воздей- ствия азотной плазмы	$C_{изм},$ пФ	$V_p,$ В	$n_s,$ $10^{12} \text{ см}^{-2}$	$Q_k^{-},$ $10^{-6} \text{ Кл/см}^2$	$Q_{sum}^{-},$ $10^{-6} \text{ Кл/см}^2$
Исходные гетероструктуры							
2	AlGaIn/GaN	0	1400	−4,5	9,6	1,5	—
3		0	1550	−4,2	9,6	1,54	—
С воздействием азотной плазмы и с пленкой SiON							
2	SiON/AlGaIn/GaN	25	236	−0,5	11,5	1,84	−1,6
3	$d_{SiON} = 80 \text{ нм}$	50	190	+0,5	11,3	1,18	−1,7
Примечание: При расчете суммарного заряда на границе SiON/AlGaIn использовали $C$ — $V$ —кривые, полученные при прямой развертке по напряжению. $Q_k^{-}$ — заряд канальных электронов $n_s q$ ; $Q_{sum}^{-}$ — заряд на границе SiON/AlGaIn (расчет).							

спонтанной и пьезоэлектрической поляризации на границе AlGaIn/GaN;  $Q_{sum}^-$  — суммарный заряд, связанный с границей SiON/AlGaIn;  $Q_{sum}^- = Q_{it} + Q_{pol}^-$ , где  $Q_{pol}^-$  — отрицательный поляризационный заряд в AlGaIn;  $Q_{it}$  — заряд на состояниях границы SiON/AlGaIn;  $d_{SiON}$  — толщина слоя SiON;  $\epsilon_{SiON}$  — диэлектрическая постоянная SiON (7,2),  $\epsilon_{AlGaIn}$  — диэлектрическая постоянная AlGaIn (9,5).

На основе полученных при прямой развертке значений напряжения  $V_p$  из экспериментальных C—V-кривых для структур SiON/AlGaIn/GaN с помощью уравнения (2) было рассчитано суммарное значение заряда, связанного с границей SiON/AlGaIn (см. табл. 2). В табл. 2 также дана величина заряда, сформированного «канальными» электронами в 2DEG, рассчитанная на основе плотности электронов (см. табл. 1).

Итак, процесс формирования изолятора приводит к образованию на границе раздела SiON/AlGaIn заряда противоположного знака по сравнению с зарядом, образующимся в результате поляризации в системе AlGaIn/GaN и близкого по величине этому заряду (см. табл. 2). В рассматриваемом случае рассчитывался только вариант прямой развертки по напряжению для двух образцов, которые подвергались воздействию плазмы (образцы 2 и 3). Близость величин этих зарядов позволяет утверждать, что этот заряд на границе SiON/AlGaIn близок к поляризационному заряду слоя AlGaIn (см. рис. 4).

Для анализа возможного перераспределения зарядов в этой системе необходимо рассмотреть происходящие изменения в энергетических зонных диаграммах таких систем (рис. 5). Диаграммы подобных систем рассматривались ранее [16], в основном, при отрицательных напряжениях на зонде. При отрицательном напряжении энергетические уровни дефектов на границе SiON/AlGaIn располо-

жены выше уровня Ферми  $E_F$  (см. рис. 5, в). В том случае заряд определяют акцептороподобные состояния с большими временными константами, с совокупным зарядом  $Q_{it}^-$  [16]. Однако, мы проводили анализ при положительном напряжении на зонде. В этом случае в формировании заряда участвуют состояния с энергией, близкой к уровню Ферми. При определенном напряжении на зонде часть акцептороподобных состояний оказывается ниже  $E_F$ , в частности при  $U_G = +2 \text{ В}$  (см. рис. 5). При дальнейшем смещении напряжения к положительным значениям часть состояний заполняется электронами, поступающими, по предположению авторов работы [5], с другой границы раздела системы AlGaIn/GaN. При этом  $Q_{it}^-$  является основной составляющей, как указывалось выше, суммарного заряда  $Q_{sum}^-$ ; этот заряд и был рассчитан с помощью уравнения (2) (см. табл. 2).

При обратной развертке (от «+» к «-»), часть электронов, захваченных на уровнях, которые находятся ближе к зоне проводимости, могут снова попасть в 2DEG; часть электронов, находящихся на состояниях, расположенных близко к середине запрещенной зоны, остаются на этих уровнях.

Как было показано выше, увеличение продолжительности обработки в плазме с 25 до 50 с приводит не только к увеличению плотности состояний на границе SiON/AlGaIn (см. табл. 2), но, возможно, и к изменению вида дефектов, формирующих ловушки на границе SiON/AlGaIn. Естественно, чем выше плотность состояний на этой границе раздела, тем более нестабильным будет ряд параметров MIS—HEMT [3, 17].

Предположение о возможном перебросе электронов из 2DEG на ловушки на границе SiON/AlGaIn анализировалось рядом авторов [5, 13, 18]. Реальность такого переброса, на наш взгляд, подтверждает близость величины заряда, который



формирует «канальные» электроны, к величине заряда на граничных состояниях, рассчитанной с помощью уравнения (2) (см. табл. 2). Близость этих значений указывает также на то, что рассчитанные величины заряда определяются, в основном, зарядом  $Q_{it}$ . Из рис. 3, видно, что увеличение продолжительности воздействия плазмы приводит к резкому уменьшению емкости  $C_{изм}$  при обратной развертке.

Данные табл. 2 свидетельствуют о сложных процессах, которые происходят вблизи границы SiON/AlGaN при предварительном воздействии на поверхность азотной плазмы. В частности, плотность свободных носителей в 2DEG после воздействия плазмы и формирования пленки изолятора, как показывают результаты измерения СВЧ-методом и методом Ван-дер-Пау (см. табл. 1), не уменьшается, уменьшается только подвижность, что свидетельствует о появлении центров рассеяния в 2DEG.

При воздействии азотной плазмы в приповерхностном слое AlGaN толщиной 2—5 нм, по мнению авторов работ [19, 20], формируется повышенная концентрация точечных дефектов за счет внедрения атомов азота из плазмы (азотирование слоев AlGaN). Под воздействием плазмы может происходить трансформация собственных точечных дефектов материала, а также может иметь место внедрение атомов поверхностного кислорода. В процессе дальнейшего формирования слоя SiON из-за наличия механических напряжений на границе SiON/AlGaN образовавшиеся точечные дефекты и их комплексы могут перестраиваться.

Для того, чтобы попытаться более четко ответить на вопросы, что происходит на границе изолятор/AlGaN, необходимо проведение дальнейших работ уже с изучением изменения элементного состава в области границы раздела SiON/AlGaN при обработке поверхности гетероструктуры азотной плазмой и осаждении диэлектрика.

### Закключение

Экспериментально показано, что дополнительное воздействие азотной плазмы при осаждении пленки SiON изменяет величину заряда на границе SiON/AlGaN, а увеличение продолжительности обработки в плазме с 25 до 50 с приводит к увеличению количества центров, формирующих медленные состояния на этой границе. Установлено, что обработка в азотной плазме в течение 25 и 50 с не приводит к изменению концентрации свободных носителей заряда в 2DEG, однако, обуславливает уменьшение их подвижности.

Рассчитаны величины заряда, который формируется на границе раз-

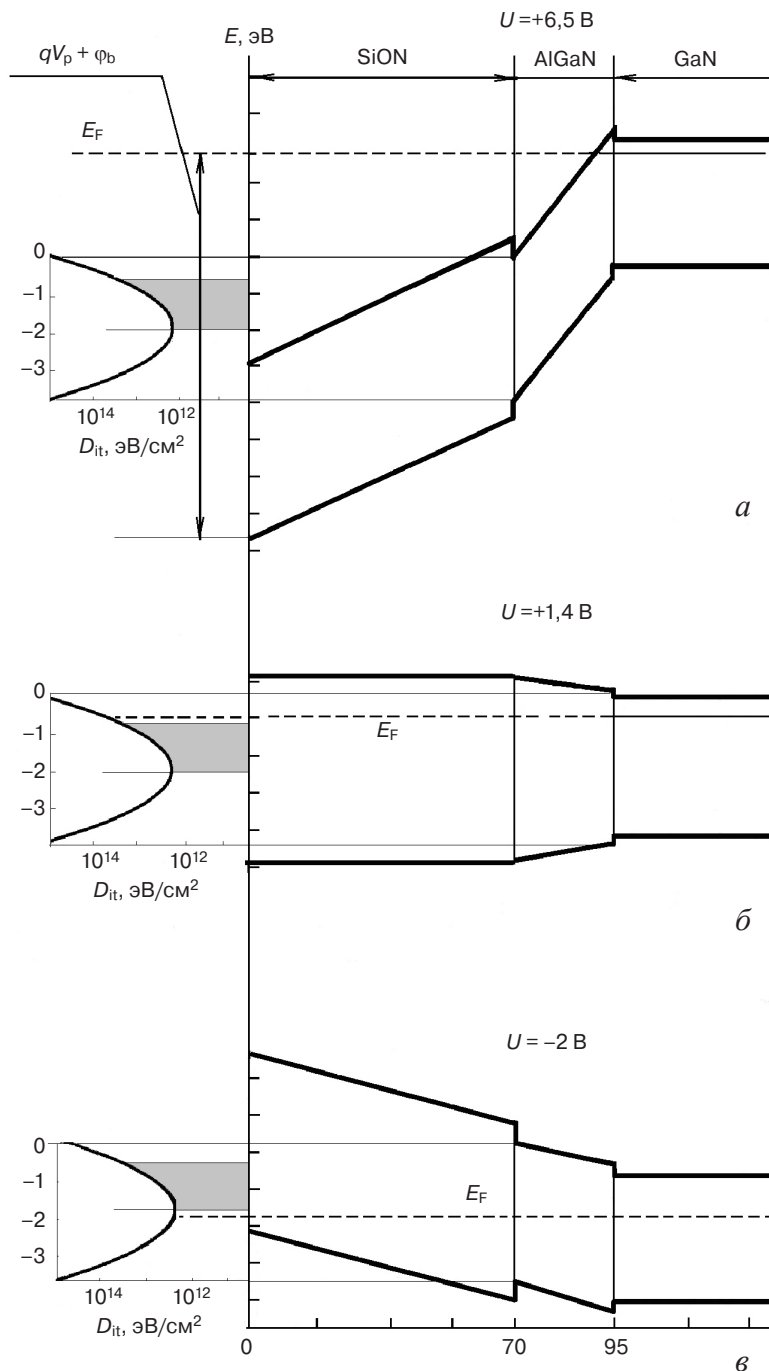


Рис. 5. Зонные диаграммы анализируемых систем SiON/AlGaN при разном напряжении на зонде  $U$ , В:

а — +6.5; б — +1.4; в — -2

Fig. 5. Band diagrams of the analyzed SiON/AlGaN systems at different probe voltages  $U$ , V:

(а) +6.5; (б) +1.4; (в) -2

дела SiON/AlGaN и определяет вид  $C-V$ -кривых при различных напряжениях на зонде. На основании анализа изменения зонных диаграмм дано возможное объяснение процесса перезарядки в

анализируемых системах при  $C-V$ -измерениях: «переброс» электронов из 2DEG на состояния на границе SiON/AlGaN и «переброс» части этих электронов в 2DEG при обратной развертке.

### Библиографический список

1. Hashizume T., Nishiguchi K., Kaneki S., Kuzmik J., Yatabe Z. State of the art on gate insulation and surface passivation for GaN-based power HEMTs. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2018; 78: 85—95. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2017.09.028>
2. Васильев А.Г., Колковский Ю.В., Концевой Ю.А. СВЧ-приборы и устройства на широкозонных полупроводниках. М.: Техносфера; 2011. 415 с.
3. Chan C.Y., Lee T.C., Hsu S.S., Chen L., Lin Y.S. Impacts of gate recess and passivation on AlGaIn/GaN high electron mobility transistors. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2007; 46(2R): 478. <https://doi.org/10.1143/JJAP.46.478>
4. Zhang A., Zhang L., Tang Z., Cheng X., Wang Y., Chen K.J., Chan M. Analytical modeling of capacitances for GaN HEMTs, including parasitic components. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2014; 61(3): 755—761. <https://doi.org/10.1109/TED.2014.2298255>
5. Asubar J.T., Yatabe Z., Gregusova D., Hashizume T. Controlling surface/interface states in GaN-based transistors: surface model, insulated gate, and surface passivation. *Journal of Applied Physics*. 2021; 129(12): 121102. <https://doi.org/10.1063/5.0039564>
6. Lyons J.L., Wickramaratne D., Van de Walle C.G. A first-principles understanding of point defects and impurities in GaN. *Journal of Applied Physics*. 2021; 129(11): 111101. <https://doi.org/10.1063/5.0041506>
7. Enisherlova K.L., Kulikauskas V.S., Seidman L.A., Pishchagin V.V., Konovalov A.M., Korneev V.I. Plasma-chemical treatment effect observed during the fabrication of AlGaIn/GaN devices. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2015; 9(4): 684—693. <https://doi.org/10.1134/S102745101504008>
8. Берлин Е.В., Григорьев В.Ю., Сейдман Л.А. Индуктивные источники высокоплотной плазмы и их технологические применения. М.: Техносфера; 2018. 461 с.
9. Enisherlova K.L., Seidman L.A., Temper E.M., Kontsevov Y.A. Effect of PECVD SiN<sub>x</sub> deposition process parameters on electrical properties of SiN<sub>x</sub>/AlGaIn/GaN structures. *Modern Electronic Materials*. 2021; 7(2): 63—72. <https://doi.org/10.3897/j.moem.7.2.73293>
10. Сейдман Л.А., Концевой Ю.А., Енишерлова К.Л., Миннебаев С.В. Пленки SiN<sub>x</sub>, полученные методом PECVD, в качестве пассивации AlGaIn/GaN HEMT. *Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы*. 2020; (3(258)): 22—33. <https://doi.org/10.36815/2073-8250-2020-258-3-22-33>
11. Груздов В.В., Колковский Ю.А., Концевой Ю.А. Входной и технологический контроль материалов и структур твердотельной СВЧ электроники. М.: Техносфера; 2017. 93 с.
12. Nguyen D., Hogan K., Blew A., Cordes M. Improved process control, lowered costs and reduced risks through the use of non-destructive mobility and sheet carrier density measurements on GaAs and GaN wafers. *Journal of Crystal Growth*. 2004; 272(1–4): 59—64. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2004.08.046>
13. Миннебаев С.В., Сейдман Л.А. Результаты воздействия предварительной обработки ионами плазмы азота гетероструктур AlGaIn/GaN перед осаждением на них защитного покрытия SiN<sub>x</sub> методом PECVD. *Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы*. 2021; (1(260)): 20—33. <https://doi.org/10.36845/2073-8250-2021-260-1-20-33>
14. Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь; 1985. 264 с.
15. Куэй Р. Электроника на основе нитрида галлия / пер. с англ. М.: Техносфера; 2011. 587 с.
16. Ganguly S., Verma J., Li G., Zimmermann T., Xing H., Jena D. Presence and origin of interface charges at atomic-layer deposited Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/III-nitride heterojunctions. *Applied Physics Letters*. 2011; 99(19): 193504. <https://doi.org/10.1063/1.3658450>
17. Braga N., Mickevicius R., Gaska R., Shur M.S., Khan M.A., Simin G. Simulation of gate lag and current collapse in gallium nitride field-effect transistors. *Applied Physics Letters*. 2004; 85(20): 4780—4782. <https://doi.org/10.1063/1.1823018>
18. Yamaji K., Noborio M., Suda J., Kimoto T. Improvement of channel mobility in inversion-type *n*-channel GaN metal-oxide-semiconductor field-effect transistor by high-temperature annealing. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2008; 47(10R): 7784. <https://doi.org/10.1143/JJAP.47.7784>
19. Кошкин А.В., Миннебаев С.В., Сейдман Л.А. Особенности измерения слоевого сопротивления на установке LEI-1610. *Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы*. 2022; (1(264)): 30—36. <https://doi.org/10.36845/2073-8259-2022-264-1-30-36>
20. Сейдман Л.А. Влияния подачи ВЧ смещения на подложку AlGaIn/GaN в процессе плазмохимического осаждения защитного покрытия SiN<sub>x</sub>. *Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы*. 2021; (2(261)): 19—28. <https://doi.org/10.36845/2073-8250-2021-261-2-19-28>

### References

1. Hashizume T., Nishiguchi K., Kaneki S., Kuzmik J., Yatabe Z. State of the art on gate insulation and surface passivation for GaN-based power HEMTs. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2018; 78: 85—95. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2017.09.028>
2. Vasil'ev A.G., Kolkovskii Yu.V., Kontsevov Yu.A. Microwave devices and devices based on wide-gap semiconductors. Moscow: Tekhnosfera; 2011. 215 p. (In Russ.)
3. Chan C.Y., Lee T.C., Hsu S.S., Chen L., Lin Y.S. Impacts of gate recess and passivation on AlGaIn/GaN high electron mobility transistors. *Japanese Journal of*

- Applied Physics*. 2007; 46(2R): 478. <https://doi.org/10.1143/JJAP.46.478>
4. Zhang A., Zhang L., Tang Z., Cheng X., Wang Y., Chen K.J., Chan M. Analytical modeling of capacitances for GaN HEMTs, including parasitic components. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2014; 61(3): 755—761. <https://doi.org/10.1109/TED.2014.2298255>
  5. Asubar J.T., Yatabe Z., Gregusova D., Hashizume T. Controlling surface/interface states in GaN-based transistors: surface model, insulated gate, and surface passivation. *Journal of Applied Physics*. 2021; 129(12): 121102. <https://doi.org/10.1063/5.0039564>
  6. Lyons J.L., Wickramaratne D., Van de Walle C.G. A first-principles understanding of point defects and impurities in GaN. *Journal of Applied Physics*. 2021; 129(11): 111101. <https://doi.org/10.1063/5.0041506>
  7. Enisherlova K.L., Kulikauskas V.S., Seidman L.A., Pishchagin V.V., Kononov A.M., Korneev V.I. Plasma-chemical treatment effect observed during the fabrication of AlGaIn/GaN devices. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2015; 9(4): 684—693. <https://doi.org/10.1134/S102745101504008>
  8. Berlin E.V., Grigor'ev V.Yu., Seidman L.A. Inductive sources of high-density plasma and their technological applications. Moscow: Tekhnosfera; 2018. 461 p. (In Russ.)
  9. Enisherlova K.L., Seidman L.A., Temper E.M., Kontsevoi Y.A. Effect of PECVD SiN<sub>x</sub> deposition process parameters on electrical properties of SiN<sub>x</sub>/AlGaIn/GaN structures. *Modern Electronic Materials*. 2021; 7(2): 63—72. <https://doi.org/10.3897/j.moem.7.2.73293>
  10. Seydman L.A., Kontsevoi Yu.A., Enisherlova K.L., Minnebaev S.V. PECVD obtained SiN<sub>x</sub> films for the passivation of AlGaIn/GaN HEMT. *Elektronnaya Tekhnika. Seriya 2: Poluprovodnikovye Pribory*. 2020; (3(258)): 22—33. (In Russ.). <https://doi.org/10.36815/2073-8250-2020-258-3-22-33>
  11. Gruzlov V.V., Kolkovskii Yu.A., Kontsevoi Yu.A. Input and process control of materials and structures of solid-state microwave electronics. Moscow: Tekhnosfera; 2017. 93 p. (In Russ.)
  12. Nguyen D., Hogan K., Blew A., Cordes M. Improved process control, lowered costs and reduced risks through the use of non-destructive mobility and sheet carrier density measurements on GaAs and GaN wafers. *Journal of Crystal Growth*. 2004; 272(1–4): 59—64. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2004.08.046>
  13. Minnebaev S.V., Seidman L.A. Effects of the preliminary nitrogen plasma ion treatment on the PECVD SiN<sub>x</sub> passivation of AlGaIn/GaN heterostructures. *Elektronnaya Tekhnika. Seriya 2: Poluprovodnikovye Pribory*. 2021; (1(260)): 20—33. (In Russ.). <https://doi.org/10.36845/2073-8250-2021-260-1-20-33>
  14. Batavin V.V., Kontsevoi Yu.A., Fedorovich Yu.V. Measurement of parameters of semiconductor materials and structures. Moscow: Radio i svyaz'; 1985. 264 p. (In Russ.)
  15. Quay R. Gallium nitride electronics. Springer Science & Business Media; 2008. 470 p. (Russ. Transl.: Kuei R. Elektronika na osnove nitrida galliya. Moscow: Tekhnosfera; 2011. 587 p.)
  16. Ganguly S., Verma J., Li G., Zimmermann T., Xing H., Jena D. Presence and origin of interface charges at atomic-layer deposited Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/III-nitride heterojunctions. *Applied Physics Letters*. 2011; 99(19): 193504. <https://doi.org/10.1063/1.3658450>
  17. Braga N., Mickevicius R., Gaska R., Shur M.S., Khan M.A., Simin G. Simulation of gate lag and current collapse in gallium nitride field-effect transistors. *Applied Physics Letters*. 2004; 85(20): 4780—4782. <https://doi.org/10.1063/1.1823018>
  18. Yamaji K., Noborio M., Suda J., Kimoto T. Improvement of channel mobility in inversion-type n-channel GaN metal-oxide-semiconductor field-effect transistor by high-temperature annealing. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2008; 47(10R): 7784. <https://doi.org/10.1143/JJAP.47.7784>
  19. Koshkin A.V., Minnebaev S.V., Seidman L.A. Features of measuring laser resistance on the facility LEI-1610. *Elektronnaya Tekhnika. Seriya 2: Poluprovodnikovye Pribory*. 2022; (1(264)): 30—36. (In Russ.). <https://doi.org/10.36845/2073-8259-2022-264-1-30-36>
  20. Seydman L.A. Effect of RF biasing applied to Al-GaN/GaN substrate during a plasma-enhanced chemical vapour deposition of SiN<sub>x</sub> FI. *Elektronnaya Tekhnika. Seriya 2: Poluprovodnikovye Pribory*. 2021; (2(261)): 19—28. (In Russ.). <https://doi.org/10.36845/2073-8250-2021-261-2-19-28>

### Информация об авторах / Information about the authors

**Енишерлова Кира Львовна** — доктор техн. наук, начальник лаборатории; АО «НПП «Пульсар», Окружной проезд, д. 27, Москва, 105187, Российская Федерация; e-mail: enisherlova@pulsarnpp.ru

**Сейдман Лев Александрович** — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; АО «НПП «Пульсар», Окружной проезд, д. 27, Москва, 105187, Российская Федерация; e-mail: seid@yandex.ru

**Боголюбова Светлана Юрьевна** — инженер 1 категории; АО «НПП «Пульсар», Окружной проезд, д. 27, Москва, 105187, Российская Федерация

**Kira L. Enisherlova** — Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory; JSC "S&PE "Pulsar", 27 Okruzhnoy Passage, Moscow 105187, Russian Federation; e-mail: enisherlova@pulsarnpp.ru

**Lev A. Seidman** — Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher; JSC "S&PE "Pulsar", 27 Okruzhnoy Passage, Moscow 105187, Russian Federation; e-mail: seid@yandex.ru

**Svetlana Yu. Bogolyubova** — 1st Category Engineer; JSC "S&PE "Pulsar", 27 Okruzhnoy Passage, Moscow 105187, Russian Federation

Поступила в редакцию 01.09.2022; поступила после доработки 20.09.2022; принята к публикации 22.09.2022  
Received 01 September 2022; Revised 20 September 2022; Accepted 22 September 2022