

**ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СЛОИ И МНОГОСЛОЙНЫЕ КОМПОЗИЦИИ /
EPITAXIAL LAYERS AND MULTILAYERED COMPOSITIONS**

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2023. Т. 26. № 3. С. 204—216.

DOI: 10.17073/1609-3577j.met202306.556

УДК 621.315.592

**Процессы образования дефектов, формирующих
глубоких уровни в структурах SiON/AlGaIn/GaN**

© 2023 г. К. Л. Енишерлова¹✉, И. А. Михайлов², Л. А. Сейдман¹,
Е. П. Кириленко², Ю. В. Колковский¹

¹ АО «Научно–производственное предприятие «Пульсар»,
Окружной проезд, д. 27, Москва, 105187, Российская Федерация

² Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук,
Ленинский просп., д. 32а, Москва, 119334, Российская Федерация

✉ Автор для переписки: enisherlova@pulsarnpp.ru

Аннотация. Исследовано влияние на электрические параметры структур SiON/AlGaIn/GaN обработки разной продолжительности низкоэнергетической азотной плазмой. Обработки плазмой подвергалась поверхность AlGaIn в рабочей камере установки плазмохимического осаждения перед запуском моносилана для формирования пленки SiON. Изучено изменение транспортных свойств (проводимости и подвижности) слоя двумерного электронного газа и емкостных свойств структур. Экспериментально показано, что такая обработка приводит к изменению величины поляризационных зарядов как на границе «изолятор — AlGaIn», так и на границе AlGaIn/GaN. С помощью $C-V$ -измерений в режиме гистерезиса установлено, что при управляющем напряжении ($U > +4 \div +5$ В) происходит захват части канальных электронов на глубоких центрах границы SiON/AlGaIn, причем с увеличением продолжительности воздействия плазмой наблюдается резкий рост заряда, формируемого электронными граничными состояниями. Использование дополнительной обработки азотной плазмой переводит для нитридных структур работу из D -режима ($V_{th} = -4$ В) в E -режим ($V_{th} = +0,9$ В).

С помощью Оже-измерений показано, что обработка плазмой приводит к изменению количества кислорода в слое SiON и в нанобластях барьерного слоя, причем с увеличением продолжительности воздействия плазмой наблюдается резкое уменьшение количества кислорода в этих слоях. Обнаружено также, что при обработке азотной плазмой происходит перераспределение Ga и Al на границе AlGaIn/GaN т. е. в области слоя двумерного электронного газа. С помощью Оже-измерений вблизи границы SiON/AlGaIn со стороны изолятора обнаружена локализация атомов азота, химически связанных с кремнием N(Si), с образованием на границе раздела пика, размер которого растет с увеличением продолжительности воздействия плазмой.

Ключевые слова: нитридные структуры, низкоэнергетическая азотная плазма, поляризационный заряд, глубокие центры канальные электроны, Оже-исследования

Благодарности: Авторы выражают глубокую признательность за помощь в проведении экспериментальных работ и за участие в обсуждении полученных результатов старшему научному сотруднику Э.М. Темпер, а также за помощь в оформлении статьи инженеру С.А. Капилину.

Для цитирования: Енишерлова К.Л., Михайлов И.А., Сейдман Л.А., Кириленко Е.П., Колковский Ю.В. Процессы образования дефектов, формирующих глубокие уровни в структурах SiON/AlGa_N/Ga_N. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2023; 26(3): 204—216. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202306.556>

Modeling the processes of formation of defects that form deep levels in SiON/AlGa_N/Ga_N

K. L. Enisherlova¹, I. A. Mikhaylov², L. A. Seidman¹,
E. P. Kirilenko², Yu. V. Kolkovsky¹

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

² Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences,
32A Leninsky Ave., Moscow 119334, Russian Federation

✉ Corresponding author: enisherlova@pulsarnpp.ru

Abstract. The effect on the electrical parameters of the SiON/AlGa_N/Ga_N structures of treatment of different durations of low-energy nitrogen plasma was studied. The AlGa_N surface was subjected to plasma treatment in the working chamber of the plasma-chemical deposition unit before starting the monosilane to form the SiON film. Changes in the transport properties (conductivity and mobility) of the canal and capacitive properties of the structures were evaluated. It has been experimentally shown that such treatment leads to a change in the magnitude of polarization charges both at the insulator-AlGa_N interface and at the AlGa_N/Ga_N interface. With the help of C-V measurements—in the hysteresis mode, it is shown that at the control voltage $U > +4 \text{ — } +5 \text{ V}$, some of the channel electrons are captured at deep centers at the SiON-AlGa_N interface, and with an increase in the duration of exposure to plasma time, a sharp increase is observed charge Q_{it} , formed by electronic boundary states. The use of additional treatment with nitrogen plasma transfers work for nitride structures from the D-mode ($V_{th} = -4 \text{ V}$) to the E-mode ($V_{th} = +0.9 \text{ V}$).

Using Auger-measurements, it was shown that plasma treatment leads to a change in the amount of oxygen in the SiON layer and in nano-regions of the barrier layer, and with an increase in the duration of plasma exposure, a sharp decrease in the amount of oxygen in these layers is observed. Also, when using plasma treatment, the redistribution of Ga and Al at the AlGa_N-Ga_N interface i.e. in the channel area. Using Auger measurements near the SiON-AlGa_N interface from the side of the insulator, the localization of nitrogen atoms chemically bonded with silicon N(Si) with the formation of a peak at the interface, the size of which increases with increasing duration of plasma exposure.

Keywords: nitride structures, low-energy nitrogen plasma, polarization charge, connection of central electron channels, Auger studies

Acknowledgements: The authors express their deep gratitude to senior researcher E.M. Temper for assistance in conducting experimental work and for participation in the discussion of the results obtained, as well as engineer S.A. Kapilin for assistance in preparing the article.

For citation: Enisherlova K.L., Mikhaylov I.A., Seidman L.A., Kirilenko E.P., Kolkovsky Yu.V. Modeling the processes of formation of defects that form deep levels in SiON/AlGa_N/Ga_N. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2023; 26(3): 204—216. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202306.556>

Введение

Достижение надежной нормальной работы в транзисторах с высокой подвижностью электронов (HEMT) на базе AlGa_N/Ga_N — сложная задача

современной технологии, особенно с учетом того, что для самих исходных нитридных гетероструктур характерны высокие плотности структурных дефектов: дислокаций, точечных дефектов, их комплексов, фоновых примесей [1, 2]. Кроме того,

для приборов на этих материалах резко возрастает роль границ полупроводник—изолятор. Это связано с тем, что сам механизм генерации зарядов в 2DEG (двумерный электронный газ) повышает «чувствительность канала» HEMT к поверхностным и граничным состояниям [1, 3]. В настоящий момент многие свойства дефектов в гетероструктурах на основе GaN достаточно изучены, например, уже известно, что некоторые дефекты этих материалов нестандартны по своему поведению, в частности их поведение ближе к дефектам в традиционных изоляторах [2]. На данный момент также установлена определенная связь между рядом несовершенств и конкретными приборными характеристиками. Так, экспериментально показано, что наличие ловушечных состояний на границе полупроводник—изолятор часто является причиной возникновения коллапса тока стока — обратимого временного снижения тока стока после приложения высокого напряжения [4]. Кроме того, с помощью измерения C — V —характеристик приобретен определенный опыт по частотным характеристикам глубоких центров на границе полупроводник—изолятор [3, 5, 6].

Одним из наиболее упоминаемых механизмов, который связан с образованием ловушечных состояний, ограничивающих надежность GaN—HEMTs, является так называемый «эффект захвата» [3]. В частности, возникновение ловушечных состояний, приводящих к коллапсу тока [4], часто обусловлено явлением захвата носителей заряда на дефектах, которые могут быть, по утверждению авторов работы [7], как в барьерном слое AlGaIn, так и на границе AlGaIn—изолятор и даже в GaN в области под затвором. В работе [4] экспериментально продемонстрирована связь между определенными характеристиками приборов и ловушечными состояниями на границе AlGaIn—изолятор, которые образуются при воздействии на поверхность полупроводника плазмой Cl_2/Ar в процессе формирования углубления под затвор. Авторы работы [4] показали, что изменение соотношения элементов в газовой смеси усиливает или ослабляет коллапс тока (меняется коэффициент коллапса). Кроме того, изменение условий плазменной обработки влияет на эффект запаздывания на затворе и на процесс появления низкочастотных шумов. Для детального исследования влияния граничных состояний в работе [8] уже специально принудительно вводили дефекты в активные области структур и анализировали их влияние на величину и знак образующегося поляризационного заряда на интерфейсе AlGaIn/GaN. Опыт принудительного введения дефектов в экспериментах с нитридными структурами использовался еще в ряде работ, причем дефекты вводились также с помощью все той же плазменной обработки [6, 8]. В частности, в работе [8] применяли

обработку плазмой на основе фторидов. Было обнаружено, что ионы фтора, имплантированные во время реактивного ионно—плазменного травления (плазма, содержащая CF_4) в поверхность GaN, приводят к сдвигу порогового напряжения в сторону положительных значений. Таким образом, контроль граничных состояний играет важную роль для надежной работы GaN—HEMT [4, 9].

В продолжении этих экспериментов в работе [10] использовали влияние плазменной обработки поверхности гетероструктур ионами азота из индуктивно связанной плазмы (ICP) на электрические параметры структур SiON/AlGaIn/GaN. Оказалось, что обработка поверхности AlGaIn низкоэнергетической азотной плазмой также приводит к эффекту сдвига порогового напряжения в область положительных значений. В частности, показано, что даже кратковременное воздействие плазмы (25 и 50 с) обеспечивает сдвиг порогового напряжения V_{th} от $-4,2$ В до $-0,5$ В. С помощью C — V —измерений в работе [10] также экспериментально показано, как при дополнительном воздействии плазмы в процессе формирования слоя изолятора SiON происходит перераспределение заряда в системе SiON/AlGaIn/GaN без изменения концентрации свободных носителей заряда в 2DEG, но при изменении значения их подвижности.

Все сказанное выше показывает сложность процессов, протекающих в нитридных материалах при разного рода технологических воздействиях, и сложность правильного объяснения происходящих изменений в системе изолятор/AlGaIn/GaN. Ясно, что для понимания происходящего необходимо оценивать меняется ли элементный состав гетероструктур и какие дефекты могут при этом возникать. Данная работа является продолжением работ [6, 10]. Цель работы — исследование изменения транспортных свойств канала HEMT, емкостных параметров системы SiON/AlGaIn/GaN при дополнительном воздействии низкоэнергетической азотной плазмы на поверхность AlGaIn при формировании пленки изолятора с учетом возможного изменения элементного состава и перераспределения фоновых примесей в анализируемых структурах, а также анализ влияния временного фактора при воздействии плазмой на параметры структуры SiON/AlGaIn/GaN.

Образцы и методы исследования

Объектом исследования были гетероструктуры AlGaIn/GaN диаметром 52 мм, выращенные методом MOCVD: i -AlGaIn (26 нм) — буферный слой GaN (2,5 мкм). В качестве подложки использовали пластины сапфира с ориентацией рабочей поверхности (0001). Молярное содержание алюминия в барьерном слое составляло 0,28—26.

Обработку поверхностей AlGaN азотной плазмой проводили в рабочей камере установки плазмохимического осаждения Plasmalab System 100 ICP180 непосредственно перед запуском моносилана для формирования пленки изолятора SiON толщиной 70—80 нм (контроль на кремниевом спутнике). Продолжительность воздействия плазмы в процессах меняли от 25 до 200 с без подачи электрического смещения на образец. При обработке в плазме энергия ионов составляла 90 эВ, температура подложки при обработке в плазме и осаждении пленки — $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$. После обработки плазмой в камеру подавали поток моносилана для формирования слоя SiON. При исследовании влияния продолжительности воздействия азотной плазмы на параметры гетероструктур для каждого процесса использовали индивидуальные гетероструктуры, близкие по значениям подвижности и концентрации свободных носителей заряда в двумерном электронном газе (2DEG).

Электрофизические измерения. Проводили сравнительный анализ структур SiON/AlGaN/GaN с дополнительной обработкой азотной плазмой, оценивая результаты измерений плотности и подвижности свободных носителей заряда. Измерения выполняли методом Ван-дер-Пау, измеряли слоевое сопротивление R_S и коэффициент Холла R_H , затем рассчитывали плотности n_s и подвижности μ свободных носителей заряда в 2DEG. Измерения осуществляли с использованием традиционной четырёхконтактной геометрии. Контакты формировались напылением четырехслойной композиции Ti—Al—Mo—Au и вжигались при $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для определения коэффициента Холла использовали постоянный магнит при фиксированном значении индукции магнитного поля ($B = 0,136\text{ Тл}$). Относительная погрешность определения R_H не превышала $\pm 7\%$.

Емкостные измерения структур SiON/AlGaN/GaN проводили на установке CSM/WIN System при частоте $f = 1\text{ МГц}$ с помощью капиллярного ртутного зонда площадью $0,005\text{ см}^2$ при планарном расположении на поверхности образцов измерительного зонда и второго электрода, площадь которого превышала площадь измерительного зонда в 40 раз (ртутный электрод в виде кольца). C — V -характеристики снимали с использованием параллельной (индекс-р) схемы замещения. Цель C — V -измерений — оценка перераспределения заряда в структурах в результате анализируемых воздействий, поэтому для сравнения измерения проводили на структурах с воздействием азотной плазмы и без воздействия, но в обоих случаях после осаждения слоя SiON. Для оптимальной оценки влияния плазмы измерения выполняли в двух разных диапазонах изменения напряжения как в прямом (от «-» к «+»), так и обратном (от «+» к «-»)

направлении: от -6 В до +2 В и от -2 В до +8 В, и в обратном от +8 В до -4 В. Скорость развертки была одинаковой — 1 В/с. Скорость развертки составляла 43,55 мВ/с в прямом направлении и 53,5 мВ/с в обратном. Основные измерения проводили в диапазоне от -2 до +8 В, в случае обратной развертки — от +8 до -2 В практически без остановки (режим гистерезиса).

Надо учитывать, что в работе использовали не обычно применяемую при C — V -измерениях схему с одним барьером Шотки (БШ) и вторым омическим контактом, а схему с двумя БШ разной площади. Преимущества использования такой схемы в данном случае рассмотрены в работе [10]. В частности, такая схема позволяет исключить термические воздействия на исследуемые образцы в процессе изготовления омического контакта, что может «затенить» полученные данные. При вжигании омических контактов используют кратковременный нагрев, но при достаточно высоких температурах. Поскольку анализируемое воздействие низкоэнергетической плазмой касается тонких приповерхностных слоев, да и толщина самого слоя AlGaN составляет 25—39 нм, такое термическое воздействия может повлиять на анализируемые параметры структур, например изменить подвижность носителей заряда в канале. Поэтому, на наш взгляд, лучше для корректности эксперимента исключить такое воздействие. Однако, при работе по такой схеме образуется область обеднения под вторым зондом большой площади при сильном положительном смещении на капиллярном зонде, которая может влиять на результаты измерения зонда.

Оценка элементного состава структур методом Оже-электронной спектроскопии. Элементный состав структур исследовали на электронном Оже-спектрометре Jamp-9510F фирмы Jeol. Для анализа распределения элементов по глубине проводили профильный Оже-анализ. Образцы устанавливали под углом 30° относительно нормали к первичному электронному пучку. Ускоряющее напряжение электронов первичного пучка составляло 10 кВ, ток пучка — 20 нА. Для уменьшения влияния артефактов воздействия электронного пучка на образец при регистрации спектров электронный пучок расфокусировали, диаметр области анализа составлял $\sim 100\text{ мкм}$. (Первичный ток и степень расфокусирования первичного пучка выбирали из следующих соображений: за время воздействия электронного пучка на образец, в пять раз превышающее время регистрации спектра, не происходит изменение спектра [11, 12]). Относительное энергетическое разрешение полусферического анализатора электронов с постоянным задерживающим потенциалом составляло 0,35 %.

При профильном анализе использовали ионный источник со следующими параметрами: энергия ионов аргона — 1000 эВ, угол травления — 41° относительно плоскости образца, распыление при проведении профильного анализа проводили без вращения образца.

Толщину слоя определяли по средней скорости распыления для структуры AlGaIn/GaN и SiON, а скорость распыления оценивали после измерения глубины кратера ионного травления, полученного в результате профильного анализа на одном из образцов AlGaIn/GaN и на образце SiON/AlGaIn/GaN, на контактном профилометре Р-7 фирмы KLA Tencor [13].

Для сравнительного анализа распределения отдельных элементов в исследуемых образцах после воздействия плазмой разной продолжительности проводили пересчет интенсивностей Оже-пиков в концентрации по модели гомогенного распределения элементов в анализируемом слое с учетом относительных коэффициентов обратной элементной чувствительности (**КЭЧ**) [11, 12, 14]. Выбор Оже-пика, по которому проводится расчет, зависит от конкретной ситуации, причем для расчетов берется только один Оже-пик элемента со своей чувствительностью. При исследовании структур выбирали пик, который не пересекался с пиками других элементов. Распределение элементов по глубине слоев в исследуемых структурах анализировали как непосредственно на структурах SiON/AlGaIn/GaN со слоем изолятора, так и на этих же структурах после удаления слоя SiON химическим травлением. На всех образцах проводили факторный анализ для выявления разных по химическим связям «видов» азота. Изменение формы и энергии Оже-пика конкретного атома в зависимости от химического окружения из-за изменения энергии связи электронов на основном уровне и локальной плотности состояний в валентной зоне подробно рассмотрено в монографии [11]. Идентификация возможных химических состояний элемента по Оже-спектрам проводится методом факторного анализа [15]. В качестве «факторов» при анализе обычно используются спектры сравнения или «эталонные» спектры. В рассматриваемом случае факторный анализ проводили по эталонным спектрам, полученным в аналогичных условиях на образцах известного состава: Si₃N₄, SiO₂, GaN и AlN. В серии образцов без пленки изолятора расчет концентраций выполняли по Оже-пикам N из GaN и AlGaIn, а на образцах со слоем SiON — из Si₃N₄, GaN и AlGaIn.

Результаты и их обсуждение

Исследование методом Ван-дер-Пау транспортных свойств 2DEG показало, во-первых,

что при введении дополнительной плазменной обработки концентрация свободных носителей заряда в 2DEG мало зависит от продолжительности воздействия, и даже при длительности обработки плазмой в течение 200 с не падает ниже $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Что касается слоевого сопротивления, то увеличение продолжительности воздействия с 25 до 100 с приводило к росту значения слоевого сопротивления R_S при практически линейной зависимости от времени воздействия (рис. 1). Таким образом, при продолжительности воздействия до 100 с проводимость канала с увеличением длительности плазменной обработки падала. Однако при более длительном воздействии наблюдался разброс значений (см. рис. 1), а при дальнейшем увеличении длительности R_S приближалось к значениям, характерным для структур Si/AlGaIn/GaN без дополнительной плазменной обработки (без обработки R_S составляло 350—370 Ом/кв., с обработкой — 420—430 Ом/кв.).

Наибольшее изменение значений слоевого сопротивления при введении дополнительной обработки характерно для такого параметра, как подвижность свободных носителей заряда. Уже при продолжительности воздействия 25 с наблюдалось падение подвижности почти в два раза: без обработки $\mu = 1200 \div 1500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, с обработкой $\mu = 600 \div 900 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Зависимость подвижности от продолжительности обработки не наблюдалась.

На рис. 2 показано семейство C—V-кривых, полученных при измерении структур SiON/AlGaIn/GaN с дополнительным воздействием на поверхность AlGaIn азотной плазмой разной продолжительности ($t = 25, 50$ и 100 с). На рис. 2, а в качестве примера приведена C—V-кривая, полученная при измерении структуры без дополнительной обработки плазмой (кривая 1", $C_{\text{исх}}$), и та же структура

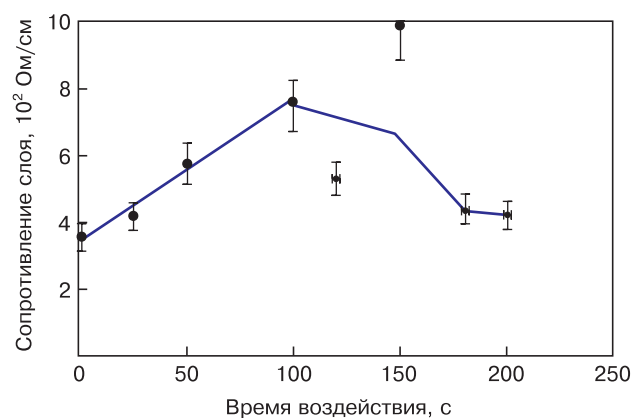


Рис. 1. Зависимость слоевого сопротивления R_S структур SiON/AlGaIn/GaN от продолжительности обработки поверхности барьерного слоя азотной плазмой в процессе формирования слоя изолятора

Fig. 1. Dependence of layer resistance R_S of SiON/AlGaIn/GaN structures on the duration of treatment of the surface of the barrier layer with nitrogen plasma during the formation of the insulator layer

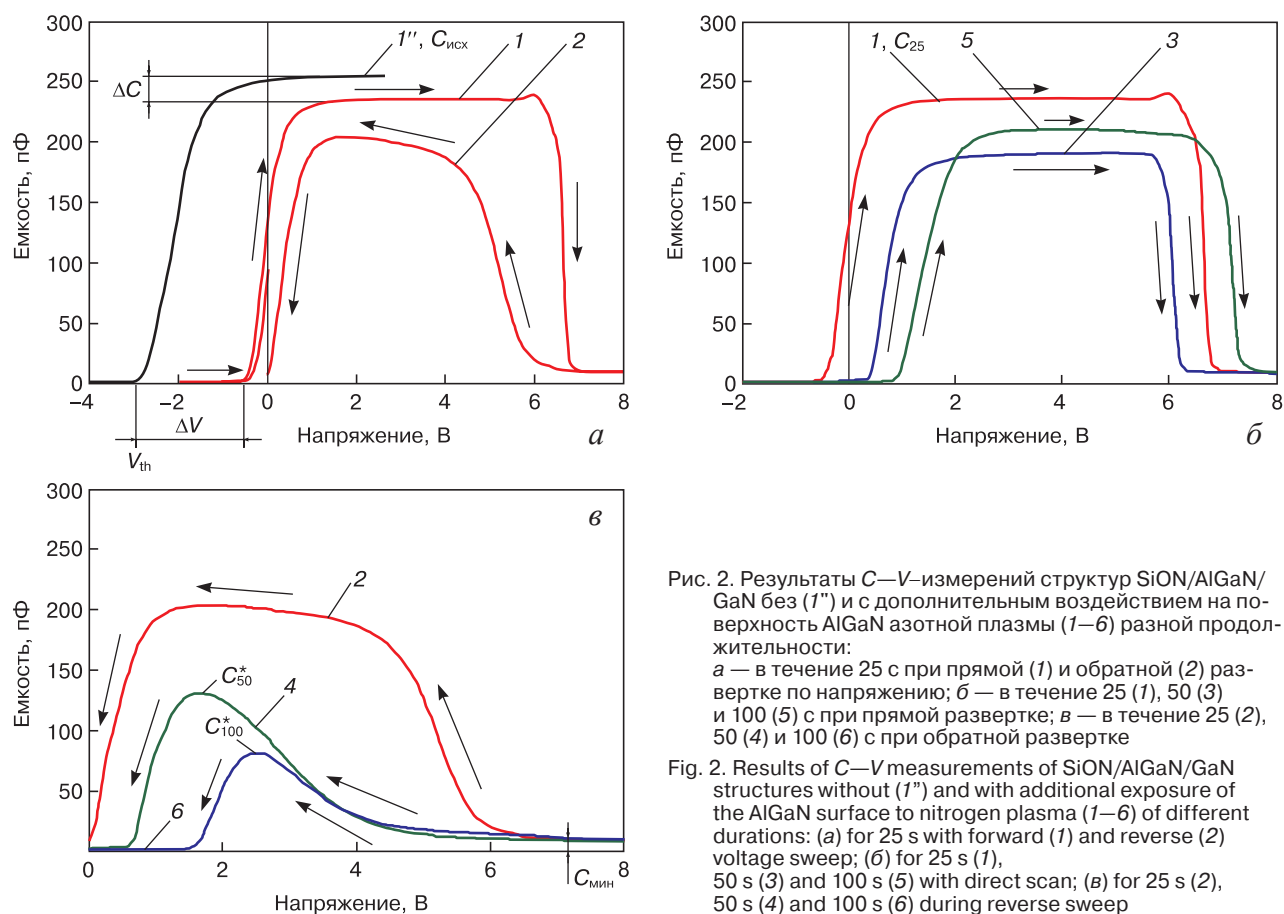


Рис. 2. Результаты $C-V$ -измерений структур SiON/AlGaIn/GaN без (1'') и с дополнительным воздействием на поверхность AlGaIn азотной плазмы (1–6) разной продолжительности: а — в течение 25 с при прямой (1) и обратной (2) развертке по напряжению; б — в течение 25 (1), 50 (3) и 100 (5) с при прямой развертке; в — в течение 25 (2), 50 (4) и 100 (6) с при обратной развертке

Fig. 2. Results of $C-V$ measurements of SiON/AlGaIn/GaN structures without (1'') and with additional exposure of the AlGaIn surface to nitrogen plasma (1–6) of different durations: (a) for 25 s with forward (1) and reverse (2) voltage sweep; (б) for 25 s (1), 50 s (3) and 100 s (5) with direct scan; (в) for 25 s (2), 50 s (4) and 100 s (6) during reverse sweep

с обработкой плазмой в течение 25 с (кривые 1 и 2) при развертке по напряжению в прямом (кривая 1) и обратном направлении (кривая 2). Максимальное значение измеренной емкости $C_{исх}$ структуры без плазменной обработки практически равно расчетному значению (электрическая цепочка с двумя емкостями, включенными последовательно), в данном случае $C_{расч} = 265$ пФ, $C_{исх} = 260 \div 255$ пФ. При прямой и обратной развертке для исходной структуры по напряжению наблюдался небольшой гистерезис. Пороговое напряжение без воздействия плазмы составляло $V_{th} = -3 \div -4$ В. Как видно из рис. 2, а, введение в технологический цикл дополнительной обработки плазмой, даже в течение 25 с, приводит к снижению измеряемой емкости (на плато) при развертке, даже в прямом направлении, с $C_{исх}$ до $C_{25} = 230 \div 236$ пФ и к сдвигу V_{th} от -3 В до $-0,5$ В. На рис 2, б показаны $C-V$ -кривые структур с дополнительной обработкой плазмой в течение 25, 50 и 100 с при прямой развертке (измеряемые емкости на плато: C_{25} , C_{50} и C_{100} , кривые 1, 3 и 5 соответственно). Наблюдается немонотонный характер изменения значения емкости с ростом продолжительности облучения и увеличение сдвига V_{th} в сторону положительных значений: при $t = 100$ с, $V_{th} = +0,85$ В. На рис. 2, в показаны $C-V$ -кривые этих же структур с воздействием плазмы разной продолжительности в режиме обратной развертки

по напряжению (кривые 2 — 25 с, 4 — 50 с и 6 — 100 с). Как видно в этом режиме $C-V$ -измерений наблюдается резкое уменьшение емкости в максимуме и резкое увеличение сдвига V_{th} в сторону положительных значений с ростом продолжительности воздействия плазмы. Таким образом, для анализируемых структур при $C-V$ -измерениях величина порогового напряжения всегда находится в области положительных значений.

Оже-анализ. На рис. 3, а показано распределение интенсивностей основных пиков элементов в зависимости от циклов травления Ar^+ для структуры SiON/AlGaIn/GaN с обработкой поверхности барьерного слоя плазмой в течение 25 с. Приведены исходные интенсивности без применения факторного анализа. На рис. 3, б приведено распределение интенсивностей пиков элементов в зависимости от времени распыления для той же структуры после удаления химическим путем слоя изолятора. На этом образце удалось определить различные формы Оже-пиков азота и алюминия. Был проведен факторный анализ по этим формам пиков. Пик Al KLL на втором цикле (~ 1 мин травления, см. рис. 3, б, кривая 1) отличается от пика Al KLL в AlGaIn, а пик Al KLL на 14-м цикле травления (кривая 2) совпадает по форме с пиком алюминия в AlGaIn. Пик азота N KLL на втором цикле травления (кривая 3) по форме не совпадает с пиком азо-

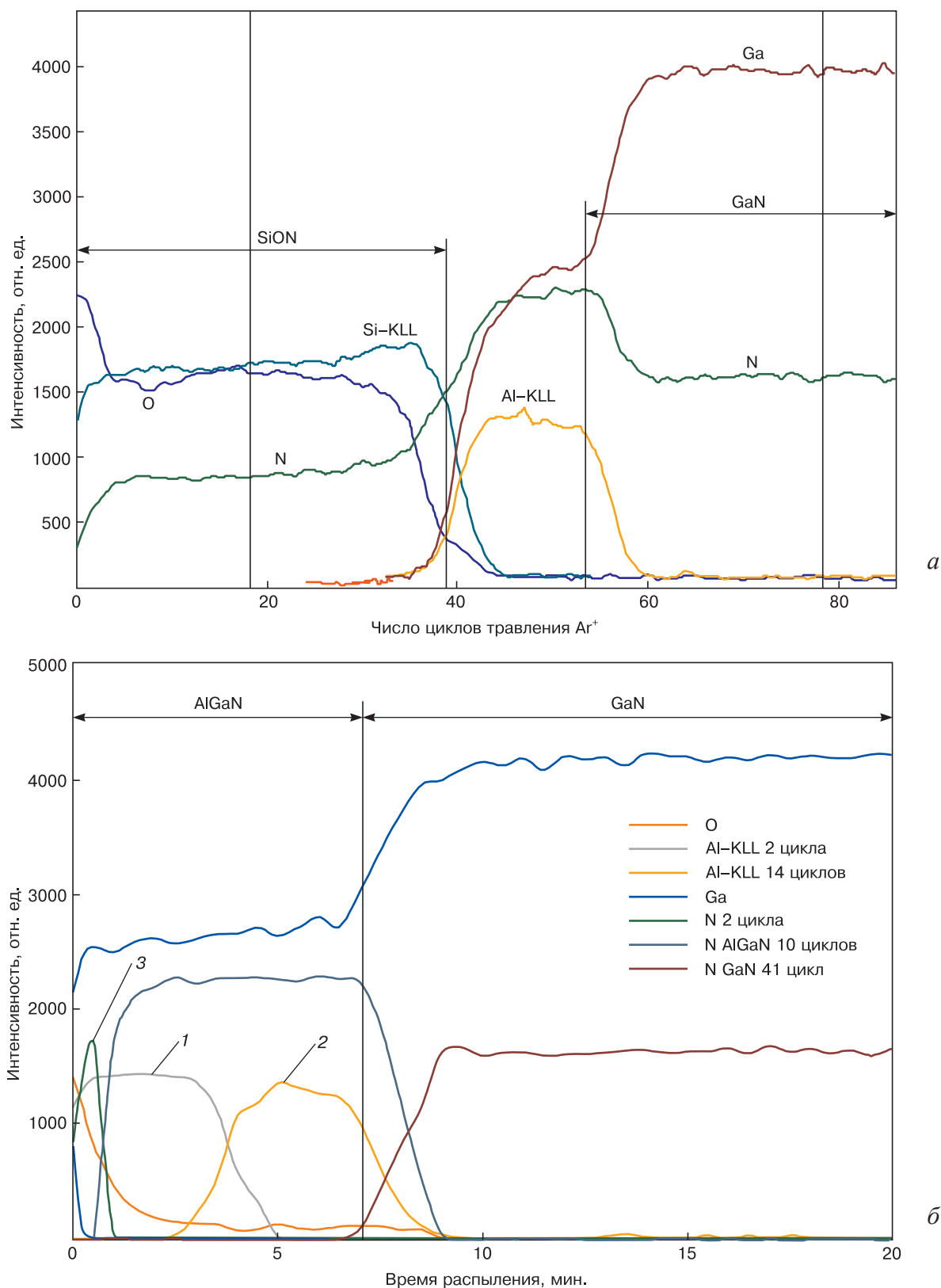


Рис. 3. Распределение интенсивности основных пиков элементов в структуре SiON/AlGaIn/GaN с обработкой поверхности барьерного слоя плазмой в течение 25 с: а — Оже-измерения со слоем SiON; б — Оже-измерения после удаления химическим путем слоя изолятора

Fig. 3. Intensity distribution of the main peaks of elements in the SiON/AlGaIn/GaN structure with plasma treatment of the surface of the barrier layer for 25 s: (a) Auger measurements with a SiON layer; (b) Auger measurements after chemically removing the insulator layer

та ни в AlGaN (на 10-м цикле совпадает — ~5 мин травления), ни в GaN (20 мин травления). Наблюдаемый пик азота в структуре после 25 с плазменной обработки (см. рис. 3, б, кривая 3), может быть вызван как проникновением части азота плазмы в поверхность барьерного слоя, так и «выдавливани-ем» азота из поверхности AlGaN-слоя кислородом из естественного оксида при распылении Ar^+ . Как видно из рис. 3, б, для нанопервоверхностных областей слоя AlGaN (структура без слоя изолятора) характерно наличие значительного количества кислорода. Из рис. 3, а видно неравномерное распределение Al в барьерном слое — незначительное увеличение Al вблизи поверхности слоя AlGaN. Проведенный факторный анализ этого образца после удаления слоя изолятора (см. рис. 3, б) подтвердил наличие кислорода в нанобластях слоя AlGaN.

Оже-анализ нитридных структур с разной продолжительностью воздействия азотной плазмой показал, что изменение времени воздействия плазмой прежде всего приводит к изменению содержания кислорода как в слое изолятора, так и в барьерном слое структур (рис. 4). На рис. 4, а приведено распределение этой фоновой примеси в слое SiON структур SiON/AlGaN/GaN с разной продолжительностью обработки плазмой (25, 50 и 150 с). На рис. 4, б дано распределение Al и кислорода в той же структуре, но в слое AlGaN (профильный Оже-анализ проводили после удаления слоя изолятора химическим травлением). Как видно из рис. 4, а, для слоя изолятора удлинение процесса воздействия плазмы с 25 до 50 с приводило к увеличению количества кислорода в слое SiON, предположительно из слоя естественного оксида на барьерном слое,

но при дальнейшем увеличении продолжительности воздействия плазмой содержание кислорода уменьшалось. Более того, при таком длительном воздействии, как $t = 150$ с, содержание этой фоновой примеси настолько уменьшается, что слой изолятора имел структуру SiN. Что касается барьерного слоя, то увеличение продолжительности воздействия плазмой приводило, прежде всего, к уменьшению содержания кислорода в приповерхностных областях барьерного слоя и к перераспределению Al в этом слое (см. рис. 4, б).

Оже-анализ распределения атомов азота с учетом их химических связей вблизи границы раздела «изолятор—барьерный слой» показал локализацию вблизи границы атомов азота, связанных с кремнием N(Si). Как видно из рис. 5, такие атомы вблизи границы формируют пик, причем с увеличением продолжительности воздействия плазмой площадь этого пика увеличивается. Кроме того, Оже-анализ показал, что в слое изолятора присутствуют атомы азота, связанные с алюминием N(AlGaN). Это может свидетельствовать о том, что происходит диффузия Al из барьерного слоя в изолятор или атомов азота, связанных с Al (или Ga), из барьерного слоя в изолятор. Однако при увеличении продолжительности обработки азотной плазмой количество атомов азота в слое SiON, связанных с AlGaN, уменьшается (см. рис. 5).

При анализе результатов C—V-измерений необходимо, прежде всего, рассмотреть заряды, действующие в системе. На границе AlGaN—GaN формируется, как известно, положительный поляризационный заряд, количественно равный отрицательному заряду, формируемому канальными

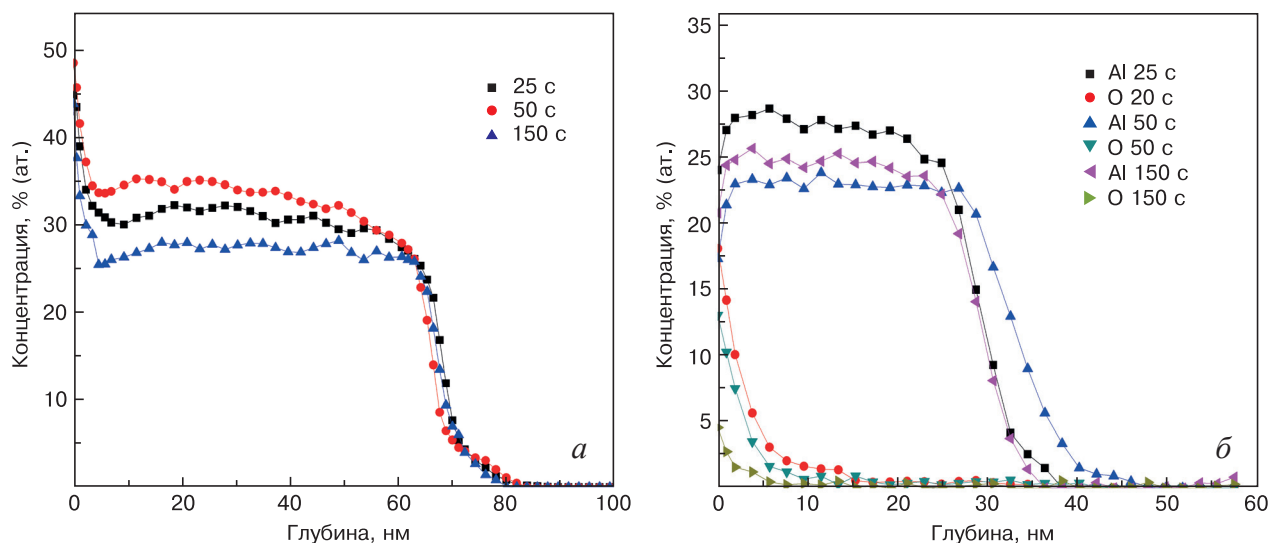


Рис. 4. Распределение элементов по глубине для структур SiON/AlGaN/GaN с разной продолжительностью обработки азотной плазмой (25, 50 и 150 с): а — кислорода в слое изолятора SiON; б — кислорода и алюминия в слое AlGaN после удаления химическим путем слоя изолятора

Fig. 4. Distribution of elements by depth for SiON/AlGaN/GaN structures with different durations of nitrogen plasma treatment (25, 50 and 150 s): (a) oxygen in the SiON insulator layer; (b) oxygen and aluminum in the AlGaN layer after chemical removal of the insulator layer

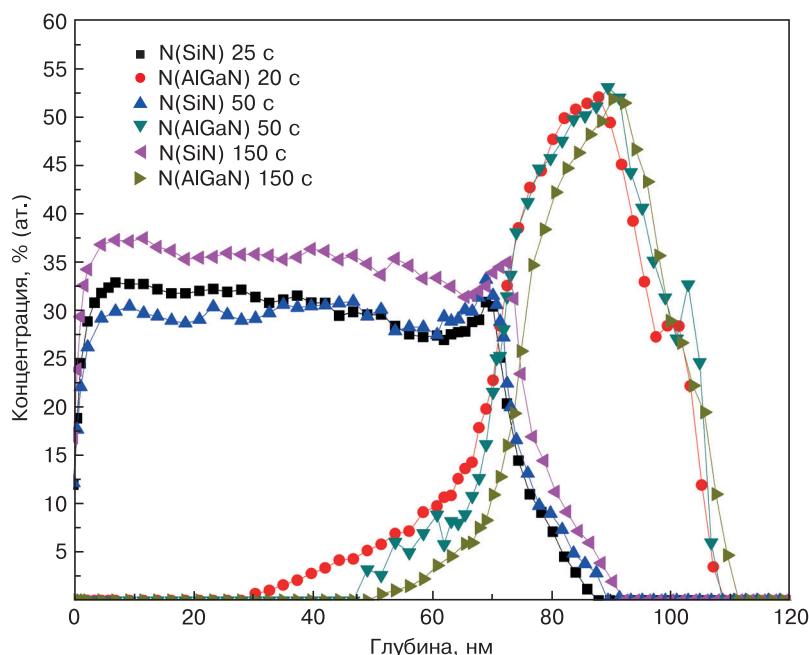


Рис. 5. Распределения по глубине атомов азота, химически связанных с атомами кремния N(SiN) и с AlGaN N(AlGaN) в структурах SiON/AlGaN с разной продолжительностью обработки азотной плазмой (25, 50 и 150 с)

Fig. 5. Depth distributions of nitrogen atoms chemically bonded to silicon atoms N(SiN) and AlGaN N(AlGaN) in SiON/AlGaN structures with different durations of nitrogen plasma treatment (25, 50 and 150 s)

электронами $Q_{\text{pol}}^+ = Q_{\text{к.з.}}^-$ (где $Q_{\text{к.з.}}^- = n_S q$; n_S — плотность свободных носителей заряда в 2DEG; q — заряд электрона [16]). На границе SiON—AlGaN с определенной плотностью электронных состояний, которые при подаче определенного по величине напряжения могут захватывать или выбрасывать электроны, появляется заряд, формируемый этими состояниями: Q_{it} . Кроме того, на этой границе из-за эффекта поляризации в барьерном слое возникает поляризационный отрицательный заряд Q_{pol}^- (обычно в совокупности с пьезозарядом из-за наличия упругих напряжений на границе). Количественно заряд Q_{pol}^- не зависит от подаваемого на систему напряжения и может быть количественно определен для конкретного измерения (см. рис. 2, а) как $Q_{\text{pol}}^- = \Delta C \Delta V$, где ΔV — сдвиг по пороговому напряжению при двух конкретных измерениях; ΔC — изменение значения емкости при этих измерениях. Компенсирующий положительный заряд на границе «изолятор—барьерный слой» будет равняться или сумме этих двух зарядов $Q_{\text{pol}}^+ = Q_{\text{pol}}^- + Q_{\text{it}}$, или $Q_{\text{pol}}^+ = Q_{\text{pol}}^-$, в случае, если граничные состояния не будут действовать в качестве глубоких центров. При этом, как показано в работе [10], значение V_{th} будет изменяться в зависимости от знака и величины подаваемого на систему напряжения. Поэтому анализировать результаты C — V —измерений (см. рис. 2) следует в зависимости от того, какие заряды являются определяющими при конкретных условиях.

Как видно из рис. 2, а, при прямой развертке введение в технологический цикл формирования слоя SiON даже кратковременной (25 с) плазменной

обработки приводит к изменению величины поляризационных зарядов как на границе изолятор—AlGaN, так и на границе AlGaN/GaN. Из рис. 2 можно оценить изменение поляризационного заряда: $Q_{\text{pol}}^- = \Delta C \Delta V$, где $\Delta V = 2,5$ В; $\Delta C = 14 \div 15$ пФ (плотность заряда при площади капиллярного измерительного зонда составляет $S = 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$, $Q_{\text{pol}}^- = 3 \cdot 10^{-8} \text{ К/см}^2$) (см. рис. 2, а). Об изменении поляризационного заряда на границе AlGaN/GaN свидетельствует изменение проводимости канала, даже при таком кратковременном воздействии R_S растет (см. рис. 1). Уже при воздействии в течение 25 с значение R_S возрастает по сравнению с данными для исходной структуры ($R_{25} = 380 \div 390 \text{ Ом/кв.}$, а $R_{\text{исх}} = 349 \div 360 \text{ Ом/кв.}$), что означает уменьшение концентрации канальных электронов. При увеличении длительности воздействия плазмой до 50 и 100 с наблюдается дальнейший, но меньший по величине сдвиг V_{th} в сторону положительных значений (от $-0,5$ В до $+0,6$ В) и немонокотное изменение значений измеряемой емкости на плато (см. рис. 2, б). Таким образом, как показали электрофизические измерения, увеличение продолжительности воздействия плазмой приводит к изменению поляризационных зарядов на этих двух границах (см. рис. 1 и 2). Проводимость канала при увеличении продолжительности воздействия плазмы с 25 до 100 с падает, т. е. растет R_S (см. рис. 1); при дальнейшем увеличении времени воздействия наблюдается разброс значений, а затем величина проводимости растет и не меняется (см. рис. 1). Электронные состояния на границе изолятор—полупроводник на этапе прямой развертки

на вид C — V -кривых не влияют (см. рис. 2, б). Как было показано в нашей предыдущей работе [10], в анализируемых гетероструктурах SiON/AlGaIn/GaN граничные состояния могут вести себя как ловушки только при определенном сдвиге управляющего напряжения в сторону положительных значений ($U > 3$ В) [10], т. е. при напряжении менее $U < 3$ В поляризационный заряд на границе изолятор—полупроводник равен $Q_{\text{pol}}^+ = Q_{\text{pol}}^-$.

При принятой схеме измерений с использованием двух БП при сильном положительном смещении на капиллярном зонде на результаты измерения начинает влиять второй зонд. При смещении (от +6 до +8 В) практически измеряется емкость под вторым зондом с большой площадью. Наблюдается резкое падение значения измеряемой емкости, поскольку измеряемая суммарная емкость является обратной величиной реальных емкостей двух слоев — изолятора и барьерного слоя (две емкости, включенные последовательно: $1/C_{\text{изм.}} = 1/C_{\text{SiON}} + 1/C_{\text{AlGaIn}}$; $C_{\text{мин.}} = 6 \div 7$ пФ (см. рис. 2). Таким образом, объясняется наблюдаемое резкое падение значения емкости в процессе прямой развертки при напряжении +6—+8 В. (В работе [10] подробно рассмотрены особенности и преимущества используемой схемы измерения с двумя БП). Пороговое напряжение при увеличении продолжительности воздействия плазмы с 25 до 100 с значительно сдвигается в сторону положительных значений (с -0,5 до +0,8 В).

При обратной развертке (от +8 В к 0) второй контакт с большой площадью постепенно перестает влиять на результаты измерений (второй контакт выходит из зоны обеднения). Максимальная величина емкости на C — V -кривых при обратной развертке (емкость C^*) — это емкость под капиллярным зондом в зоне обогащения. Как видно из рис. 2, в, при обратной развертке наблюдается резкое падение значений емкости во всех случаях воздействия по сравнению с емкостью C при прямой развертке (см. рис. 2, б и в). Это свидетельствует о том, что при напряжении $U > +(3 \div 6)$ В происходит захват части канальных электронов на глубоких центрах на границе SiON—AlGaIn — возникает заряд Q_{it} , причем, как видно из рис. 2, в, увеличение продолжительности воздействия с 25 до 100 с приводит к резкому росту заряда Q_{it} и уменьшению емкости C^* . Таким образом, проведение измерений при прямой и обратной развертке (режим гистерезиса) при используемой схеме измерения с двумя БП позволило разделить влияние на емкостные параметры структуры возникающих зарядов; при этом Q_{it} — заряд, формируемый медленными электронными состояниями на границе изолятор—AlGaIn (за время развертки 9 с захваченные электроны не успевают вернуться в слой двумерного газа). Наблюдается значительное уве-

личение сдвига порогового напряжения в сторону положительных значений (см. рис. 2, в). В работе [10] с помощью зонных диаграмм было показано, что дефекты на границе «изолятор—барьерный слой» в качестве центров, захватывающих электроны (ловушки), «работают» в данном случае при напряжении: $U > 3 \div 5$ В.

Результаты Оже-измерений могут позволить сделать некоторые предположения о том, какие изменения в структуре нитридных материалов и их элементном составе могут быть ответственны за наблюдаемые изменения при электрических измерениях.

Изменение значения емкости в зависимости от времени воздействия плазмой при прямой развертке (C — емкости на плато, см. рис. 2, б, кривые 1, 3 и 5) связано, по нашему мнению, в основном с изменением диэлектрической постоянной формируемых слоев изолятора после воздействия плазмы разной продолжительности. Такое предположение подтверждает наблюдаемая разница в количестве кислорода в слое SiON при разном времени воздействия плазмы (см. рис. 4, а). Более того, при воздействии в течение 200 с слой SiON вообще превращается в слой SiN_x. Кроме того, с увеличением продолжительности воздействия изменяется также и состав нанобластей слоя AlGaIn (см. рис. 4, б). Проведенный факторный анализ [15] показал, что несмотря на использование низкоэнергетической азотной плазмы, уже при кратковременной обработке (25 с) фиксируется пик азота (рис. 3, б, кривая 3), не связанный с собственным азотом буферного слоя. Поэтому разное значение емкости (см. рис. 2, б) при прямой развертке у структур с разной продолжительностью воздействия может быть также частично связано с измененным составом слоя AlGaIn (разное количество имплантированного азота и разное количество кислорода). Кроме того, как видно из рис. 4, б, наблюдается перераспределение Al в барьерном слое, и даже меняется перераспределение Ga и Al на границе раздела, т. е. в области канала, что крайне важно.

Для выяснения, какая атомарная конфигурация на границе SiON—AlGaIn может приводить к возникновению центров захвата электронов при сильном положительном смещении, необходимо более подробно рассмотреть распределения элементов с учетом их химических связей вблизи границы раздела изолятор—AlGaIn, в частности азота и кремния в изоляторе и азота и алюминия в слое AlGaIn (см. рис. 5). Как видно из рис. 5, вблизи границы со стороны изолятора происходит локализация атомов азота, химически связанных с кремнием N(Si) с образованием на границе пика, размер которого растет с увеличением продолжительности воздействия плазмой. Это позволяет предположить, что именно с этой «атомарной кон-

фигурацией» связаны дефектные центры, которые при сильном смещении в сторону положительных значений являются ловушками для электронов. Количество таких атомов азота N(Si) с увеличением времени воздействия плазмой растет (см. рис. 5) и растет заряд Q_{it} , формируемый ловушечными центрами на границе изолятор—полупроводник (см. рис. 2, в).

Как видно на рис. 5, в слое изолятора наблюдается второй пик азота. По форме пика этот азот соответствует азоту в составе слоя AlGaIn. Это может свидетельствовать, как указывалось выше, о диффузии алюминия в изолятор в процессе формирования слоя SiON. Однако увеличение продолжительности воздействия плазмой приводит, наоборот, к уменьшению интенсивности такого пика (см. рис. 5). Поэтому такая конфигурация напрямую, скорее всего, не связана с возникновением электронных граничных состояний. Кроме того, из рис. 5 видно, что пик азота, связанного с алюминием (или галлием), в изоляторе доходит почти до середины слоя.

В работах [3, 17, 18] рассматривались особенности формирования границы изолятор—полупроводник для данных материалов. В частности, в работе [18] утверждается, что при формировании аморфного изолятора на нитридных гетероструктурах первые слои изолятора могут иметь структуру, близкую к кристаллической. В работе [18] методами Фурье—спектроскопии и просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения был обнаружен «частично кристаллизованный» межфазный слой Si_2N_2O/Ga . Такой слой был экспериментально обнаружен при нанесении на поверхность эпитаксиального слоя GaN пассивирующего слоя SiN. Авторы работы [18] считают, что в результате за счет большой длины свободного пробега электронов в закристаллизованном слое по сравнению с аморфным слоем изолятора на границе изолятор—полупроводник может возникнуть проводящий канал. На основании результатов Оже—спектроскопии (см. рис. 5), полученных в нашей работе, и результатов работы [18] можно предположить, что аналогичный частично кристаллизованный слой Si_2N_2O/Al образуется вблизи границы изолятор—полупроводник и в данной работе. Образование такого слоя может происходить следующим образом: положительно заряженные атомы азота при плазменной обработке поверхности барьерного слоя частично закрепляются в слое естественного оксида на поверхности AlGaIn, образуя монослой, а при пуске моносилана атомы азота соединяются с атомами кремния и атомами кислорода. Наблюдаемый нами сильный сдвиг пороговых напряжений в положительные значения (см. рис. 2) при использовании азотной плазмы и аналогичный сдвиг V_{th} , наблюдаемый при исполь-

зовании плазмы CF_4 [8], позволяют утверждать следующее. Причиной перехода из D-режима ($V_{th} = -4$ В) в E-режим ($V_{th} = +0,9$ В) для анализируемых нитридных структур является не имплантация конкретно положительно заряженных атомов фтора (или азота, как в нашей работе), а комплекс сложных процессов, происходящих при воздействии низкоэнергетической плазмы и обуславливающих возникновение на границе дефектов, формирующих глубокие центры, или проводящего слоя, как предполагается в работе [8]. Однако это все-таки предположения, и необходимо продолжение работ для уточнения механизма формирования активных центров на границе изолятор—полупроводник, во многом определяющих нормальную и надежную работу нитридных НЕМТ-приборов.

Заключение

Показано, что с помощью обработки азотной плазмой поверхности барьерного слоя гетероструктур AlGaIn/GaN в процессе плазмохимического осаждения изолятора SiON можно управлять как транспортными свойствами канала (проводимостью и подвижностью), так и электронными состояниями на границе изолятор—полупроводник, а также диэлектрическими свойствами формируемого изолятора за счет изменения количества кислорода в слое изолятора.

Установлено, что введение в технологический цикл плазмохимического осаждения слоя SiON даже кратковременной дополнительной обработки азотной плазмой поверхности AlGaIn приводит к сдвигу порогового напряжения V_{th} в сторону положительных значений, причем с увеличением продолжительности воздействия плазмой величина сдвига возрастает. В результате проведения комплексных электрофизических измерений определено раздельное влияние на емкостные параметры структур и транспортные свойства канала структур SiON/AlGaIn/GaN поляризационных зарядов на двух границах и заряда, формируемого электронными состояниями на границе изолятор—полупроводник.

С помощью Оже—спектроскопии в слое изолятора выявлена локализация (скопление) атомов азота, химически связанных с атомами кремния, вблизи границы раздела изолятор—полупроводник. С увеличением продолжительности воздействия азотной плазмой, зафиксировано увеличение размера таких скоплений. Проведение комплексных исследований с использованием электрофизических измерений и Оже—спектроскопии позволило предположить, что локализация таких скоплений на границе ответственна за возникновение при электрофизических измерениях глубоких центров на границе изолятор—полупроводник.

Библиографический список

1. Morkoç H. Handbook of nitride semiconductors and devices: materials properties, physics and growth. In 3 vol. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.; 2009. Vol. 1. P. 111—812. <http://dx.doi.org/10.1002/9783527628438>
2. Lyons J.L., Wickramaratne D., Van de Walle C. A first-principles understanding of point defects and impurities in GaN. *Journal of Applied Physics*. 2021; 129(11): 111101. <http://doi.org/10.1063/5.0041506>
3. Asubar J., 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. <http://doi.org/10.1063/5.0039564>
4. Chan Ch.-Y., Hsu Sh.S.H., Lin Y.-S., Chen L. Impacts of gate recess and passivation on AlGaIn/GaN high electron mobility transistor. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2007; 46(2): 478—484. <http://doi.org/10.1143/JJAP.46.478>
5. Zhang A., Zhang S.L., Tang Z., Cheng X., Wang Y., Chen K.J., Chan M. Modeling of capacitances for GaN HEMTs, including parasitic components. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2014; 61(3): 755—761. <http://doi.org/10.1109/TED.2014.2298255>
6. Енишерлова К.Л., Сейдман Л.А., Темпер Э.М., Концевой Ю.А. Влияние особенностей PECVD процессов осаждения SiN_x на электрические параметры структур SiN_x/AlGaIn/GaN. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2021; 24(2): 107—118. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-2-107-118>
7. Ganguly S., Verma J., Li G., Zimmermann T., Xing H., Jena D. Presence and origin of interface charges at atomic-layer deposited Al₂O₃/III-nitride heterojunctions. *Applied Physics Letters*. 2011; 99(24): 193504. <https://doi.org/10.1063/1.3671324>
8. Cai Y., Zhou Y., Lau K.M., Chen K.J. Control of threshold voltage of AlGaIn/GaN HEMTs by fluoride-based plasma treatment: From depletion mode to enhancement mode. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2006; 53(9): 2207—2215. <https://doi.org/10.1109/TED.2006.881054>
9. 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(10): 7784—7787. <https://doi.org/10.1143/JJAP.47.7784>
10. Enisherlova K.L., Seidman L.A., Bogolyubova S.Yu. Effect of treatment in nitrogen plasma on the electrical parameters of AlGaIn/GaN heterostructures. *Russian Microelectronics*. 2022; 51(8): 686—695. <https://doi.org/10.1134/S1063739722080133>
11. Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Под ред. Д. Бриггса и М.П. Сиха. М.: Мир; 1987. 598 с.
12. Hofmann S. Auger- and X-ray photoelectron spectroscopy in materials science: a user-oriented guide. Springer Science & Business Media; 2013. Vol. 49. 528 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-27381-0>
13. Matsunaga F., Kakibayashi H., Mishima T., Kawase S. Influence of ion sputtering on Auger electron spectroscopy depth-profiling of GaAs/AlGaAs superstructure. *Japanese Journal of Applied Physics*. 1988; 27(1R): 149—150. <https://doi.org/10.1143/JJAP.27.149>

14. Mroczkowski S., Lichtman D. Calculated Auger sensitivity factors compared to experimental handbook values. *Surface Science*. 1983; 131(1): 159—166.

15. Монахова Ю.Б., Муштакова С.П. Математическая обработка спектров при анализе смесей методом независимых компонент: идентификация и количественный анализ. *Журнал аналитической химии*. 2012; 67(12): 1044—1051. <https://elibrary.ru/pddpip>

16. Enisherlova K.L., Temper E.M., Kolkovskij Yu.V., Medvedev B.K., Kapilin S.A. The ALD films of Al₂O₃, SiN_x, and SiON as passivation coatings in AlGaIn/GaN HEMT. *Russian Microelectronics*. 2020; 49(8): 603—611. <https://doi.org/10.1134/S106373972008003X>

17. Greco G., Giannazzo F., Frazzetto A., Raineri V., Roccaforte F. Near-surface processing on AlGaIn/GaN. *Nanoscale Research Letters*. 2011; 6(1): 132. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-132>

18. Liu X., Wang X., Zhang Y., Wei K., Zheng Y., Kang X., Jiang H., Li J., Wang W., Wu X., Wang X.P., Huang S. Insight into the near-conduction band states at the crystallized interface between GaN and SiN_x grown by low-pressure chemical vapor deposition. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2018; 10(25): 21078—21103. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b04694.s001>

References

1. Morkoç H. Handbook of nitride semiconductors and devices: materials properties, physics and growth. In 3 vol. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.; 2009. Vol. 1. P. 111—812. <http://dx.doi.org/10.1002/9783527628438>
2. Lyons J.L., Wickramaratne D., Van de Walle C. A first-principles understanding of point defects and impurities in GaN. *Journal of Applied Physics*. 2021; 129(11): 111101. <http://doi.org/10.1063/5.0041506>
3. Asubar J., 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. <http://doi.org/10.1063/5.0039564>
4. Chan Ch.-Y., Hsu Sh.S.H., Lin Y.-S., Chen L. Impacts of gate recess and passivation on AlGaIn/GaN high electron mobility transistor. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2007; 46(2): 478—484. <http://doi.org/10.1143/JJAP.46.478>
5. Zhang A., Zhang S.L., Tang Z., Cheng X., Wang Y., Chen K.J., Chan M. Modeling of capacitances for GaN HEMTs, including parasitic components. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2014; 61(3): 755—761. <http://doi.org/10.1109/TED.2014.2298255>
6. Enisherlova K.L., Seidman L.A., Temper E.T., Kontsevov Yu.A. Influence of PECVD features of SiN_x deposition processes on electrical parameters of SiN_x/AlGaIn/GaN structures. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2021; 24(2): 107—118. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-2-107-118>
7. Ganguly S., Verma J., Li G., Zimmermann T., Xing H., Jena D. Presence and origin of interface charges at atomic-layer deposited Al₂O₃/III-nitride heterojunctions. *Applied Physics Letters*. 2011; 99(24): 193504. <https://doi.org/10.1063/1.3671324>
8. Cai Y., Zhou Y., Lau K.M., Chen K.J. Control of threshold voltage of AlGaIn/GaN HEMTs by fluoride-based plasma treatment: From depletion mode to enhancement

mode. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2006; 53(9): 2207—2215. <https://doi.org/0.1109/TED.2006.881054>

9. 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(10): 7784—7787. <https://doi.org/10.1143/JJAP.47.7784>

10. Enisherlova K.L., Seidman L.A., Bogolyubova S.Yu. Effect of treatment in nitrogen plasma on the electrical parameters of AlGaIn/GaN heterostructures. *Russian Microelectronics*. 2022; 51(8): 686—695. <https://doi.org/10.1134/S1063739722080133>

11. Briggs D., Seah M.P., eds. Practical surface analysis by Auger- and X-ray photoelectron spectroscopy. Chichester et., 1983. 674 p. (Russ. Transl.: Briggs D., Seah M.P., eds. Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Москва: Мир; 1987. 598 p.)

12. Hofmann S. Auger- and X-ray photoelectron spectroscopy in materials science: a user-oriented guide. Springer Science & Business Media; 2013. Vol. 49. 528 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-27381-0>

13. Matsunaga F., Kakibayashi H., Mishima T., Kawase S. Influence of ion sputtering on Auger electron spectroscopy depth-profiling of GaAs/AlGaAs superstructure.

Japanese Journal of Applied Physics. 1988; 27(1R): 149—150. <https://doi.org/10.1143/JJAP.27.149>

14. Mroczkowski S., Lichtman D. Calculated Auger sensitivity factors compared to experimental handbook values. *Surface Science*. 1983; 131(1): 159—166.

15. Monakhova Yu.B., Mushtakova S.P. Mathematical processing of spectra in the analysis of mixtures by the method of independent components: Identification and quantitative analysis. *Journal of Analytical Chemistry*. 2012; 67(12): 1044—1051. (In Russ.). <https://elibrary.ru/pddpip>

16. Enisherlova K.L., Temper E.M., Kolkovskiy Yu.V., Medvedev B.K., Kapilin S.A. The ALD films of Al_2O_3 , SiN_x , and SiON as passivation coatings in AlGaIn/GaN HEMT. *Russian Microelectronics*. 2020; 49(8): 603—611. <https://doi.org/10.1134/S106373972008003X>

17. Greco G., Giannazzo F., Frazzetto A., Raineri V., Roccaforte F. Near-surface processing on AlGaIn/GaN. *Nanoscale Research Letters*. 2011; 6(1): 132. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-132>

18. Liu X., Wang X., Zhang Y., Wei K., Zheng Y., Kang X., Jiang H., Li J., Wang W., Wu X., Wang X.P., Huang S. Insight into the near-conduction band states at the crystallized interface between GaN and SiN_x grown by low-pressure chemical vapor deposition. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2018; 10(25): 21078—21103. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b04694.s001>

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

Михайлов Иван Андреевич — младший научный сотрудник, отдел структурного анализа и метрологии, Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, Ленинский просп., д. 32а, Москва, 119334, Российская Федерация

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

Кириленко Елена Петровна — инженер, отдел системной аналитики и метрологии, Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, Ленинский просп., д. 32а, Москва, 119334, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-1435-1605>

Колковский Юрий Владимирович — доктор техн. наук, профессор, заместитель генерального директора, АО «НПП «Пульсар», Окружной проезд, д. 27, Москва, 105187, Российская Федерация; e-mail: kolk@pulsarnpp.ru

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

Ivan A. Mikhaylov — Junior Researcher, Department of Structural Analysis and Metrology, Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, 32A Leninsky Ave., Moscow 119334, Russian Federation

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

Elena P. Kirilenko — Engineer, System Analytics and Metrology Department, Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, 32A Leninsky Ave., Moscow 119334, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-1435-1605>

Yuri V. Kolkovsky — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Deputy General Director, JSC “S&PE “Pulsar”, 27 Okruzhnoy Passage, Moscow 105187, Russian Federation; e-mail: kolk@pulsarnpp.ru

Поступила в редакцию 31.05.2023; поступила после доработки 12.07.2023; принята к публикации 11.09.2023

Received 31 May 2023; Revised 12 July 2023; Accepted 11 September 2023

* * *