

ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СЛОИ И МНОГОСЛОЙНЫЕ КОМПОЗИЦИИ

EPITAXIAL LAYERS AND MULTILAYERED COMPOSITIONS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2021. Т. 24, № 2. С. 00—00.
DOI: 10.17073/1609-3577-2021-2-00-00

УДК 621.315.592:621.793

Влияние особенностей PECVD процессов осаждения SiN_x на электрические параметры структур $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$

© 2021 г. К. Л. Енишерлова✉, Л. А. Сейдман, Э. М. Темпер, Ю. А. Концевой

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

✉ Автор для переписки: enisherlova@pulsarnpp.ru

Аннотация. Исследовано влияние процессов плазмохимического осаждения (PECVD) пленок SiN_x на электрические параметры структуры диэлектрик/AlGaIn/GaIn. Дан анализ влияния состава формируемых пленок, воздействия дополнительной обработки поверхности гетероструктур в плазме азота перед осаждением диэлектрика, а также влияния подачи ВЧ-смещения при такой обработке на особенности C—V- и I—V-характеристик структур $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$. Установлено, что для пленок с соотношением концентраций азота и кремния 60 и 40 %, а также с повышенным содержанием кислорода характерно уменьшение фиксированного положительного заряда в этих структурах, однако, на I—V-характеристиках структур наблюдается появление пульсаций тока. Выявлено как режимы процесса плазмохимии влияют на такие параметры осцилляций, как период, амплитуда, длина участка I—V-характеристики, на котором наблюдаются осцилляции. Предложено возможное объяснение причин появления характерных пульсаций. Установлено, что дополнительное воздействие азотной плазмы на поверхность гетероструктуры до напуска в камеру моносилана приводит к изменению величины и знака фиксированного заряда, а также к уменьшению концентрации свободных носителей в канале двумерного газа гетероструктур $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$. Экспериментально показано, как технологические особенности процессов PECVD осаждения и подготовки поверхности могут влиять на электрические параметры формируемых гетероструктур.

Ключевые слова: гетероструктура, пассивирующее покрытие, метод осаждения PECVD, C—V-характеристика, HEMT, I—V-характеристика, пьезозаряд, 2DEG

Для цитирования: Енишерлова К.Л., Сейдман Л.А., Темпер Э.М., Концевой Ю.А. Влияние особенностей PECVD процессов осаждения SiN_x на электрические параметры структур $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$. *Известия вузов. Материалы электрон. техники.* 2021; 24(2): 00—00. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-2-00-00>

Influence of PECVD features of SiN_x deposition processes on electrical parameters of $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ structures

K. L. Enisherlova✉, L. A. Seidman, E. M. Temper, Yu. A. Kontsevov

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

✉ Corresponding author: enisherlova@pulsarnpp.ru

Abstract. In this work, we studied the influence of the processes of plasma–chemical deposition of SiN_x films on the electrical parameters of the dielectric/AlGaIn/GaN structure. The effect of the composition of the formed films, the effect of additional surface treatment of heterostructures in nitrogen plasma prior to dielectric deposition, as well as the effect of the RF bias supply during this treatment on the C–V and I–V characteristics of the SiN_x/AlGaIn/GaN structures were analyzed. It was found that for films with a ratio of nitrogen and silicon concentrations of 60% and 40%, as well as with an increased oxygen content, a decrease in the value of a fixed positive charge in these structures is characteristic, but the appearance of current pulsations is observed on the I–V characteristics of the structures. It was revealed how the modes of the plasma chemistry process affect such parameters of oscillations as the period, amplitude, length of the section of the I–V characteristic, where oscillations are observed. A possible explanation of the reasons for the appearance of characteristic pulsations is proposed. It has been established that the additional action of nitrogen plasma on the surface of the heterostructure before the monosilane is introduced into the chamber leads to a change in the magnitude and sign of the fixed charge and to a decrease in the concentration of free carriers in the channel of a two–dimensional gas of SiN_x/AlGaIn/GaN heterostructures. It is shown experimentally how the technological features of the deposition and surface preparation processes can affect the electrical parameters of the formed heterostructures.

Keywords: heterostructure, passivating coating, PECVD deposition method, C–V characteristic, HEMT transistor, I–V characteristic, piezo charge, 2DEG

For citation: Enisherlova K. L., Seidman L. A., Temper E. M., Kontsevoy Yu. A. Influence of PECVD features of SiN_x deposition processes on electrical parameters of SiN_x/AlGaIn/GaN structures. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2021; 24(2): 00–00. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-2-00-00>

Введение

Диэлектрические пленки, используемые в качестве пассивирующих покрытий в HEMT–транзисторах (транзистор с высокой подвижностью электронов) на основе нитридных соединений, играют важную роль для получения приборов с требуемыми параметрами, в частности с низкими токами утечки, а также для исключения такого негативного явления, как коллапс тока. Для формирования пассивирующих покрытий обычно используются пленки с высокой диэлектрической проницаемостью. а в качестве метода их получения при промышленном изготовлении нитридных приборов чаще всего применяется метод плазмохимического осаждения (**PECVD**, *Plasma enhanced chemical vapor deposition*), а в качестве диэлектрика — пленки SiN_x и SiON [1, 2].

В результате проведенных исследований к настоящему моменту уже известно, что при плазмохимии, практически при использовании всех известных прекурсоров [3], в структурах диэлектрик/AlGaIn/GaN может формироваться фиксированный положительный заряд. Образование положительно заряда, в свою очередь, приводит к существенному сдвигу C–V–характеристик структур в сторону отрицательных напряжений [3–6]. На основании экспериментальных результатов показано, что основной причиной возникновения положительного заряда в структурах с пленками SiN_x является большая величина пьезозаряда, возникающего из–за изменения упругих напряжений в слое AlGaIn при нанесении пленки диэлектрика. В работе [3] показано, что сама сформированная пленка диэлектрика может иметь внутренние механические

напряжения порядка 300–600 МПа, что почти на порядок ниже, чем напряжения в буферном слое AlGaIn, вызванные несогласованностью его решетки с решеткой нижележащего слоя GaN. В работе [7] с помощью высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии показано, что после осаждения методом PECVD пленки SiN_x толщиной 40 нм растягивающие напряжения в слое AlGaIn увеличиваются на 15 %, при этом концентрация носителей заряда в канале двумерного электронного газа (**2DEG**) возрастает на 9,5 %. Оценивалась величина фиксированного заряда, в частности для структур SiN_x/AlGaIn при мольном содержании алюминия 0,26 и толщине барьерного слоя 20 нм эта величина составила

$$Q_{\text{фик.}} = (2,76 \pm 2,81) \cdot 10^{-2} \text{ К/м}^2.$$

Однако с ростом мольного содержания алюминия величина фиксированного заряда уменьшалась. В работах [8, 9] показано, что механические свойства защитной пленки могут также влиять на величину упругих напряжений, возникающих в слое AlGaIn при формировании структур диэлектрик/AlGaIn/GaN.

При формировании защитных покрытий интерес вызывают образующиеся электрические состояния на границе раздела диэлектрик–полупроводник. В работах [1–10] анализируются особенности границы раздела «пленка — поверхность гетероструктуры», в частности рассматривается возможность образования донорно–подобных ловушечных центров под воздействием ионов плазмы в процессах PECVD. По данным работы [9], ловушечных состояний в самом объеме диэлектрических пленок

практически нет, они располагаются очень близко к границе раздела диэлектрик—полупроводник. Установлено также, что состав плазмы играет значительную роль. Например, в работе [12] показано, что при формировании пленок SiO_2 и SiON с использованием реактивного газа N_2O идет образование глубоких ловушек с $\Delta E > 0,657$ эВ, а при использовании плазмы NH_3 в процессе осаждения пленки SiN_x формируются дефекты с высокой плотностью мелких ловушек с энергией $0,46 < \Delta E < 0,57$ эВ, образующиеся из-за насыщения поверхности AlGaIn вакансиями N_2 . В то же время из результатов анализа Оже-спектров структур диэлектрик/ $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ в работе [9] сделано предположение, что определяющую роль в формировании фиксированного заряда в структуре $\text{SiON}/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ играет кислород. Избыток кислорода в пленке приводит к изменению ее свойств, а это, в свою очередь, вызывает уменьшение напряжений в слое AlGaIn и обуславливает уменьшение пьезозаряда в системе $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$.

Таким образом, работ по анализу диэлектрических пленок, нанесенных методом PECVD при формировании защитного покрытия структур $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$, много, но они не отвечают на вопрос какие особенности процессов PECVD ответственны за те или иные электрические свойства формируемых структур. Имеется несколько работ, где рассмотрено влияние обработки непосредственно в плазме азота структуры $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ перед осаждением покрытия SiN_x [13—15], однако, в них не проанализировано влияние параметров ионной бомбардировки на изменение электрических свойств структур $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$. В то же время проведение такого исследования может быть полезно, как для понимания физики происходящих процессов, так и для оптимизации технологии HEMTs приборов.

Ниже рассмотрена возможность дальнейшей оптимизации PECVD процессов осаждения пленок SiN_x . Для этого проведены исследования влияния на электрические параметры структур $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ следующих факторов: состава формируемых пленок, предварительной обработки поверхности гетероструктур в плазме азота перед осаждением диэлектрика, а также влияния включения ВЧ-смещения при такой обработке.

Образцы и методика эксперимента

Для PECVD осаждения пленок использовали установку Plasmalab System 100 ICP180 фирмы Oxford Instruments Plasma Technology с источником ICP и устройством подачи ВЧ-смещения на подложку. В этой установке можно управлять как ВЧ-мощностью возбуждения плазмы, так и независимо от этого ускорением ионов в направлении к подложке. Это обеспечивается тем, что к источнику ICP в установке подключен ВЧ-генератор с

частотой 13,56 МГц для создания плотной плазмы (ВЧ-мощность составляла 1200 Вт), а другой ВЧ-генератор той же частоты подключен к подложкодержателю. В результате взаимодействия ВЧ-мощности на подложке с плазмой на поверхности подложки возникает постоянный отрицательный потенциал, который используется для независимой регулировки постоянного потенциала смещения на подложке относительно корпуса установки. Известно, что при использовании метода PECVD плазма в рабочей камере имеет относительно стенок положительный потенциал, который, по некоторым оценкам [10], составляет от 10 до 40 В, такой же потенциал плазма имеет относительно подложки. Если на подложку не подано смещение от внешнего источника питания, тогда ее потенциал равен потенциалу стенок камеры (нулю). Поэтому из плазмы, даже без подачи ВЧ-смещения на подложку, идет поток бомбардирующих ее положительных ионов (азота, кремния, водорода и состоящих из них радикалов).

Высокая скорость диссоциации в источнике ICP позволяет использовать для осаждения пленки SiN_x в качестве прекурсора азот вместо NH_3 , что дает возможность получить пониженную концентрацию водорода в рабочей камере и, следовательно, в растущей пленке. Азот подается в камеру источника ICP, а моносилан — через распределительное кольцо, расположенное вблизи подложкодержателя, чтобы приблизить к подложке продукты разложения SiH_4 . При этом расход азота составил $15,8 \text{ см}^3/\text{мин}$, моносилана — $11,2 \text{ см}^3/\text{мин}$. Рабочее давление в камере ($1,33 \text{ Па}$) при помощи автоматического изменения степени открытия вакуумного затвора поддерживалось неизменным. Перед каждым процессом осаждения проводили разной длительности обработку поверхности подложек в азотной плазме в том же режиме, только без напуска моносилана. Поток моносилана в камеру включали непосредственно после завершения обработки. Температуру подложки удерживали порядка $200 \text{ }^\circ\text{C}$, используя электрический нагреватель в подложкодержателе и подачу потока гелия $10 \text{ см}^3/\text{мин}$ между подложкой и подложкодержателем.

В качестве исходных образцов использовали гетероструктуры $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ диаметром 52 мм, выращенные методом MOCVD на сапфировых подложках с толщиной слоя AlGaIn 20—25 нм и молярным содержанием Al 0,26—0,28. Перед загрузкой в камеру гетероструктуры подвергали обработке в течение 90 с в струе диметила с температурой $80 \text{ }^\circ\text{C}$, формируемой под давлением 80 атм., с последующей обработкой в течение 30 с струей изопропилового спирта при температуре $30 \text{ }^\circ\text{C}$, далее осуществляли сушку образцов в азоте. Оценку толщины образующихся пленок диэлектрика и их коэффициента преломления проводили на контрольных кремниевых спутниках, которые проходили аналогичный про-

цесс плазмохимической обработки. Толщину пленки и коэффициента преломления измеряли в пяти точках эллисометром L1165300 фирмы Gartner с длиной волны лазера 632,8 нм. Разброс толщины по спутнику не превышал 0,11 %, коэффициента преломления — 0,03 %.

Емкостные измерения проводили на установке Semiconductor Measurement Sistem MDC CSM/Win, C—V—характеристики измеряли на частотах $f = 1$ МГц и 10 кГц. Характеристики снимали при планарном расположении зондов с помощью ртутного зонда — $0,005 \text{ см}^{-2}$, второй контактный зонд имел кольцевую форму, его площадь в 38 раз превышает площадь измерительного зонда. Для оценки гистерезиса и восстановления величины емкости C—V—характеристики измеряли в разных диапазонах управляющего напряжения. Параллельно снимали I—V—характеристики при различных скоростях развертки (с периодом от 0,1 до 0,9 с). Измерения C—V—характеристик проводили с использованием последовательной ($C_s—R_s$) схемы замещения. Концентрацию носителей тока в 2DEG определяли двумя методами: по оценке вихревых ВЧ—токов при неразрушающих бесконтактных измерениях на установке LEI—1600 Mobility Systems (на см^{-2}) и из C—V—характеристик ($\Delta C/\Delta V$) в см^{-3} . При этом также определяли положение по глубине структуры пика концентрации свободных носителей, т. е. глубину 2DEG. Концентрацию и глубину определяли из C—V—характеристик как для структур диэлектрик/AlGaIn/GaN, так и для гетероструктур AlGaIn/GaN после удаления химическим путем пленки диэлектрика.

Результаты и их обсуждение

Исследование влияния концентрации азота в пленках SiN_x в зависимости от изменения режимов плазмохимического осаждения показало, что увеличение содержания азота приводит, во—первых, к

уменьшению положительного фиксированного заряда в структурах $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ и, во—вторых, к уменьшению коэффициента преломления пленок и росту их диэлектрической проницаемости при концентрации кислорода < 2 % (табл. 1).

Изучение I—V—характеристик структур диэлектрик/AlGaIn/GaN показало, что при соотношении концентраций азота и кремния 60 и 40 % на кривых наблюдается появление характерных пульсаций тока.

Обычно ВАХ диодов Шоттки нитридных гетероструктур AlGaIn/GaN представляют как несимметричные ветви, расположенные в положительном секторе по оси «Y» как при положительных значениях управляющего напряжения, так и при отрицательных [16, 17], с резким снижением значений тока при приближении к нулю управляющего напряжения с образованием «клюва» (рис. 1, а). Для анализируемых структур диэлектрик/AlGaIn/GaN минимальные значения тока, как правило, сдвигаются относительно нуля управляющего напряжения, образуя, так называемое «плечо». В частности, на рис. 1, б показаны ВАХ структуры (см. табл. 1), где в диэлектрике SiN_x преобладал кремний. Для структур диэлектрик/AlGaIn/GaN с содержанием азота 60 % и кремния 40 % было зафиксировано появление на ВАХ характерных пульсаций тока (рис. 1, в). При этом диапазон значений управляющего напряжения, где наблюдаются пульсации на I—V—характеристиках, как правило, совпадает с диапазоном напряжений на C—V—характеристиках тех же структур, где значение измеряемой емкости C практически не изменяется (см. рис. 1, в). Хотя значение тока на участке пульсаций низкое (10^{-10} — 10^{-11} А), сами пульсации имеют четко выраженную форму, определенную амплитуду и период, которые зависят от вида структур, а также от скорости развертки.

Аналогичные пульсации ранее наблюдались на I—V—кривых структур диэлектрик/AlGaIn/GaN,

Таблица 1

Содержание элементов в пленках SiN_x и их влияние на параметры и напряжение отсечки в полученных структурах диэлектрик/AlGaIn/GaN
Elemental contents in SiN_x films and their effect on parameters and cutoff voltage of dielectric/AlGaIn/GaN structures

Номер образца	Содержание элементов, %			Коэффициент преломления	Диэлектрическая проницаемость	Напряжение отсечки, В
	N	Si	O			
1	36	63	< 2	2,72	6,2—6,5	–15 ... –17
2	60	40	< 2	1,78	7	–5 ... –6
3	55—56	42	5—8	1,85—1,92	–	–4 ... –6
4	> 60	–	–	1,65—1,66	7,5—7,6	–2,5 ... –4

Примечания. Осаждение пленок проводили при $T = 400$ °С. Диэлектрическую проницаемость оценивали из значения емкости слоя AlGaIn, рассчитанной из измеренной емкости структуры диэлектрик/AlGaIn/GaN.

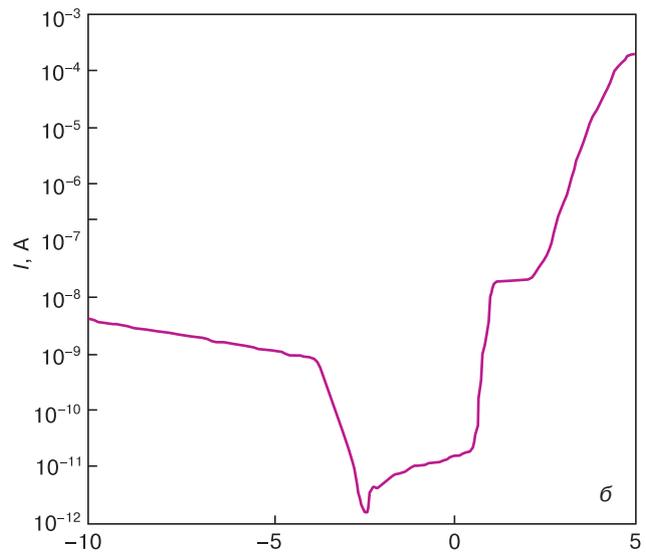
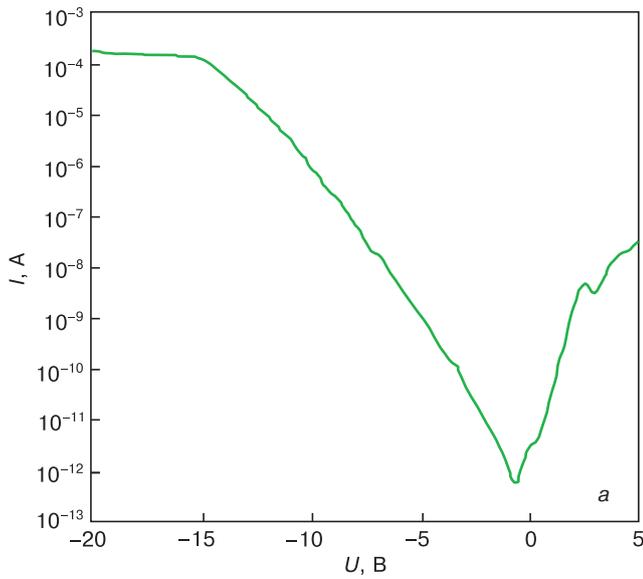


Рис. 1. I – V –характеристики различных нитридных гетероструктур с диэлектриком и без: а – AlGaIn/GaN; б – SiN_x/AlGaIn/GaN при соотношении Si : N – (60 : 36) %; в – SiN_x/AlGaIn/GaN при Si : N – (40 : 60) % (1 – C– V –характеристика той же структуры при $f = 1$ МГц)

Fig. 1. I – V curves of different nitride heterostructures with and without dielectric: (a) AlGaIn/GaN; (б) SiN_x/AlGaIn/GaN with Si : N = (60 : 36) %; (в) SiN_x/AlGaIn/GaN with Si : N = (40 : 60) % (1 – C– V curves of the same structure for $f = 1$ MHz)

где в качестве диэлектрика использовали пленку SiO₂ [9].

Исследование влияния непосредственного воздействия азотной плазмы разной продолжительности на электрические параметры формируемых структур SiN_x/AlGaIn/GaN показало следующее:

- даже непродолжительное использование обработки азотной плазмой (25 с) перед подачей моносилана приводит к незначительному изменению измеряемой емкости при прямой развертке по управляющему напряжению и практически к исчезновению положительного фиксированного заряда в структурах: $U_{отс.}$ сдвигается к нулевым значениям (рис. 2, кривые 1–3);

- увеличение продолжительности воздействия плазмы приводит к дальнейшему незначительному уменьшению измеряемой емкости C – V –характеристик в обогащении и к увеличению смещения C – V –кривых в сторону положительных значений, т. е. к возникновению отрицательного фиксированного заряда (рис. 2, кривые 4 и 5);

- при использовании предварительной обработки плазмой изменение направления развертки

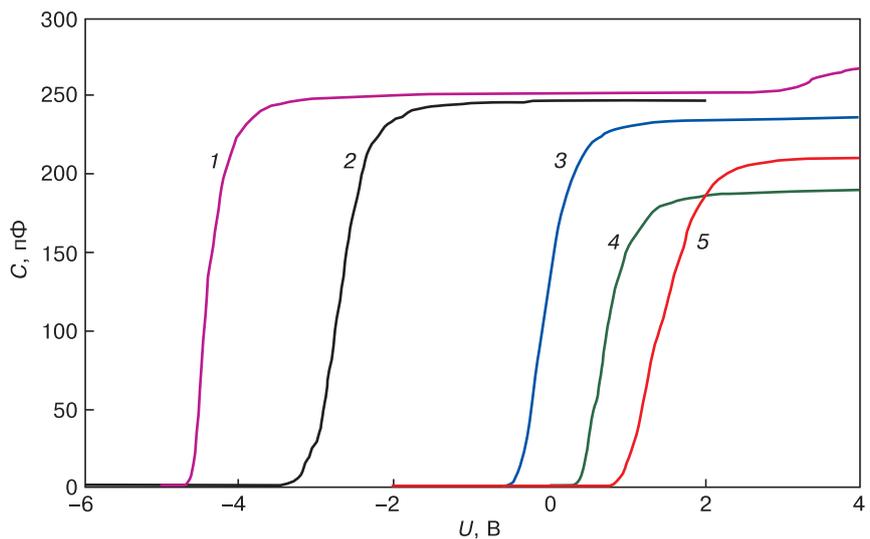
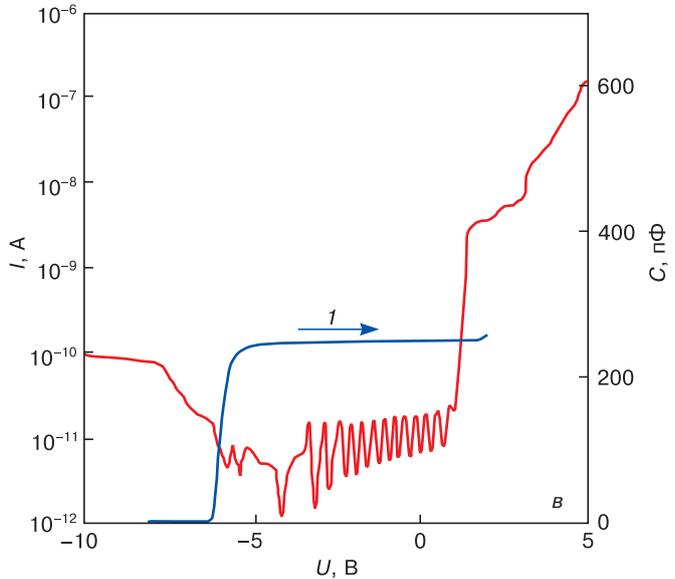


Рис. 2. C– V –характеристики структур SiN_x/AlGaIn/GaN с соотношением Si к N (40 : 60) %. Осаждение пленки SiN_x проводили без дополнительного воздействия азотной плазмы (1, 2) и с дополнительным воздействием плазмы (3–5) в течение 25 (3), 50 (4) и 100 (5) с

Fig. 2. C– V curves of SiN_x/AlGaIn/GaN heterostructures with Si : N = (40 : 60) %. (1, 2) SiN_x film deposited without nitrogen plasma treatment and (3–5) with additional plasma treatment for (3) 25, (4) 100 and (5) 200 s

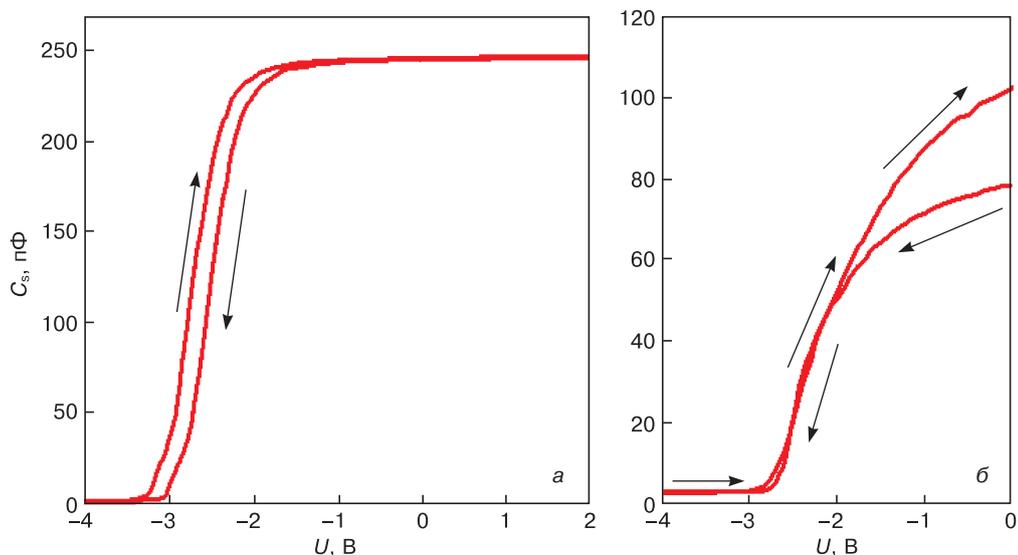


Рис. 3. C – V –характеристики структур $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ с дополнительным воздействием плазмой при осаждении SiN_x в течение 20 с для различных режимов: a — гистерезис; b — восстановление. Стрелки — направление развертки

Fig. 3. C – V curves of $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ heterostructures synthesized with additional 20 s plasma treatment during SiN_x film deposition for different curve sections: (a) hysteresis and (b) recovery. Arrows show sweep direction

управляющего напряжение приводит к изменению емкости на C – V –характеристиках при одних и тех же значениях управляющего напряжения. На рис. 3 показана C – V –характеристика для структуры с предварительной обработкой плазмой в течение 40 с при разном направлении развертки (прямое и обратное), одному и тому же значению напряжения соответствуют разные значения измеряемой емкости;

– при увеличении времени воздействия плазмы концентрация свободных носителей в канале дву-

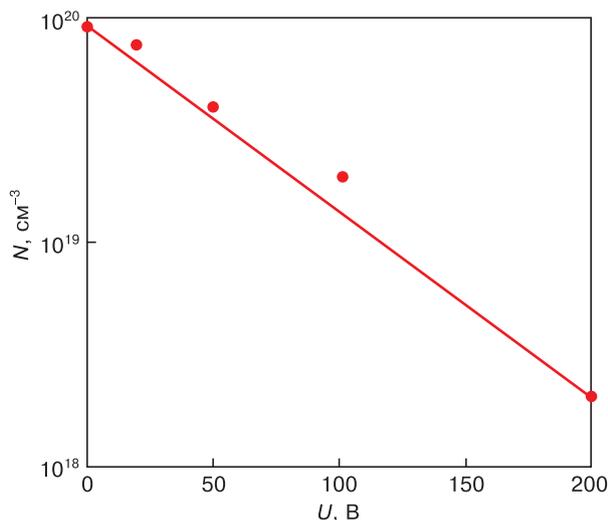


Рис. 4. Зависимость концентрации носителей в 2DEG для структур $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ от продолжительности дополнительного воздействия плазмой на поверхность гетероструктур при осаждении пленки SiN_x

Fig. 4. Carrier concentration in 2DEG for $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ structures as a function of additional plasma treatment duration of heterostructure surface during SiN_x film deposition

мерного газа уменьшалась (рис. 4, табл. 2). Например, при продолжительности обработки 200 с концентрация составляла $(1-2) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ($(1-2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$);

– при времени предварительного воздействия плазмы от 25 до 200 с на I – V –характеристиках структур диэлектрик/ AlGaIn/GaN наблюдались характерные пульсации тока (см. табл. 2, рис. 5).

Рассмотрение особенностей пульсаций при увеличении продолжительности непосредственного воздействия плазмы на поверхность выявило немонотонный характер изменения периода и амплитуды колебаний при общей тенденции уменьшения периода и повышения амплитуды пульсаций с увеличением продолжительности плазменной обработки (см. табл. 2, рис. 5). При длительном воздействии (200 с) при измерении на частоте 1 МГц C – V –характеристики практически отсутствуют ($C = 10$ пФ).

Исследование влияния подачи ВЧ–смещения при непосредственном воздействии плазмы на поверхность до процесса плазмохимического осаждения показало, что этот прием приводит к резкому увеличению длины участка с осцилляциями на I – V –характеристиках, т. е. к росту количества осцилляций (см. табл. 2).

Таким образом, с учетом результатов, полученных ранее [9], установлено, что с позиции образования фиксированного заряда в системе $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ при использовании метода PECVD пленки с содержанием 60 % N и 4 % Si аналогичны пленкам с повышенным (более 5 %) содержанием кислорода (см. табл. 1). Скорее всего, это свидетельствует о том, что в процессе изготовления таких пленок в образ-

Электрические параметры структур SiN_x/AlGaN/GaN
Electrical parameters of SiN_x/AlGaN/GaN structures

Номер структуры	Время воздействия плазмы, с	Измеряемая емкость, пФ		Концентрация носителей в 2DEG		Осцилляции			Напряжения отсечки, В
		До осаждения SiN _x	После осаждения SiN _x	Эффект Холла, 10 ¹² см ⁻²	C—V—измерения, 10 ¹⁹ см ⁻³	Период, В	Амплитуда, отн. ед.	Длина участка с осцилляциями, ΔВ	
1	0	1550	246	11	8,5—9,0	0,18	1	3,5	-6 ... -6,5
2	25	1400	249	8,5—9,0	7,5	0,16	1,2	2,8	-0,5 ... -0,8
3	50	1500	192	8,4	4,0	0,14	1,5	4,5	0,5
4	100	1499	219	6,54	2,5	0,12	1	2,5	1
5	200	1500	—	1—2	0,21	0,18	0,2	0,7	—
6	159 (с ВЧ-смещением)	1200—1300	250 (на $f = 10$ кГц)	—	0,3—0,5	0,16	0,6	6	-2 ... -1

Примечание. В процессе осаждения слоя SiN_x использовали дополнительное воздействие азотной плазмой разной продолжительности.

цах диэлектрик/AlGaN/GaN формируются аналогичные системы упругих напряжений с близкими по величине и знаку напряжениями в слое AlGaN, и, следовательно, системы диэлектрик/AlGaN/GaN в этих двух случаях близки по образуемому пьезозаряду на границе AlGaN/GaN. Кроме того, общим для этих процессов PECVD оказалось появление характерных пульсаций на I — V -характеристиках анализируемых структур.

Как уже указывалось выше, ВАХ исходных гетероструктур AlGaN/GaN и структур диэлектрик/AlGaN/GaN исследовали в ряде работ [16, 17], посвященных технологии изготовления HEMTs. Однако в этих работах обращали мало внимания на области ВАХ с минимальными токами. Нами ранее [9] и теперь в этих областях были обнаружены неожиданные немонотонные зависимости токов утечки от управляющего напряжения. Причем исследования показали, что появление, а также форма (амплитуда, период, длина участка по управляющему напряжению) таких пульсаций определяются особенностями процесса формирования границы диэлектрик/AlGaN, а также особенностями подготовки поверхности гетероструктуры к процессу осаждения.

Исследования показали, что появление пульсаций не наблюдали при формировании пленок SiN_x методом атомно-слоевого осаждения (ALD), но даже при использовании метода PECVD пульсации выявлялись только при формировании пленок с повышенным содержанием азота или кислорода (см. табл. 1). Таким образом, на основе полученных экспериментальных результатов установлено, что в процессах формирования пленок с повышенным содержанием азота или кислорода для появления характерных

пульсаций, прежде всего, необходимо наличие плазменной составляющей. Более того, исследования показали, что увеличение продолжительности дополнительного прямого воздействия азотной плазмы на поверхность гетероструктур приводит к изменению характера пульсаций, а именно: к увеличению амплитуды и слабому уменьшению периода пульсаций (см. табл. 2, рис. 5).

Как уже указывалось выше, при стандартном плазменном осаждении на поверхность гетероструктуры направлен поток положительных ионов (азота, кремния, водорода и состоящих из них радикалов) [10]. Их энергии достаточно для активации химических процессов, десорбции молекул летучих соединений с поверхности слоя AlGaN, однако, она ниже пороговой энергии, необходимой для ионного распыления материала подложки [10, 18]. Полученные нами результаты позволяют предположить, что при плазмохимической обработке при наличии избытка таких химически активных элементов, как кислород и азот, активность образования их соединений увеличивается. В работе [19] методом просвечивающей электронной микроскопии исследовали атомное строение граничных слоев при LPCVD (CVD-процесс при давлении ниже атмосферного) слоя SiN_x на GaN. Было показано, что образующиеся на границе слои имеют кристаллическую структуру с различной граничной атомной конфигурацией в зависимости от условий осаждения, а далее уже формируется основная часть слоя аморфного диэлектрика, при этом начальная конфигурация граничных слоев в дальнейшем может изменяться за счет релаксации напряжений. Надо также учитывать, что на структуру образующихся на границе слоев влияет состояние поверхности слоя AlGaN,

в частности наличие и толщина естественного оксида на этой поверхности [19]. С другой стороны, наши исследования показали также, что возникновение пульсаций и их особенности связаны с состоянием образующейся границы раздела диэлектрик/AlGaN. Помимо этого, необходимо учесть, что в отличие от результатов работы [19], где рассматривались граничные конфигурации для случая SiN_x/GaN , мы исследовали границу $\text{SiN}_x/\text{AlGaN}$, где атомы алюминия будут увеличивать возможность образования кислородных связей. Что касается азота, то этот

элемент образует связи и с алюминием, и с галлием, так как азот в плазме ионизируется и становится химически активным. Учитывая малые толщины слоя AlGaN (20—25 нм) при избытке на границе диэлектрик/AlGaN кислорода или азота при осаждении, вероятно, может иметь место оттеснение этих активных примесей от границы с диэлектриком к границе AlGaN/GaN с образованием насыщения этими примесями приграничного слоя. Как показано в работе [20], в гетероструктурах AlGaN/GaN при определенных условиях может легко происходить

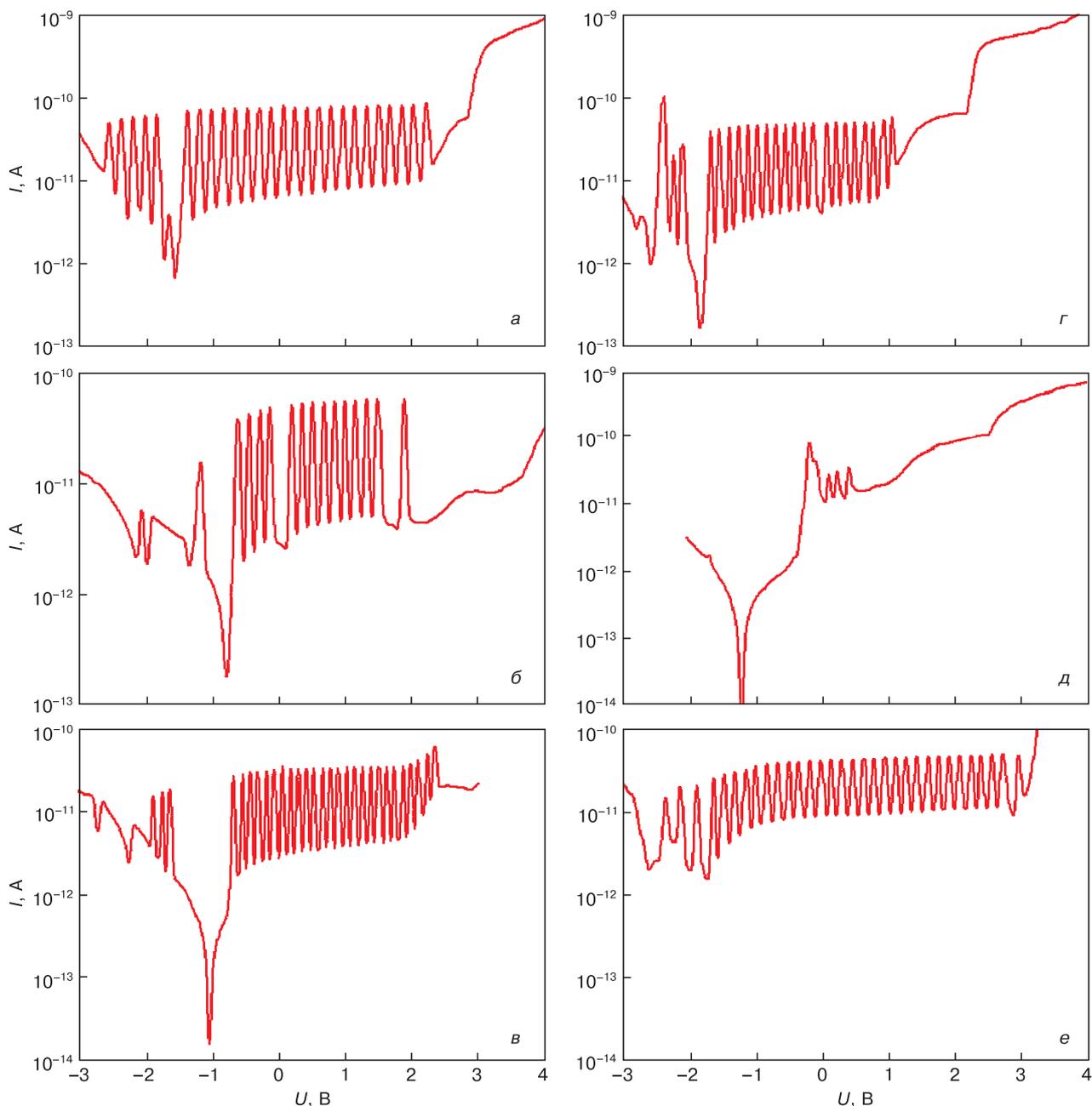


Рис. 5. Участки I – V -характеристики с осцилляциями тока утечки структур $\text{SiN}_x/\text{AlGaN}/\text{GaN}$ с SiN_x без дополнительной обработки плазмой (а) и с дополнительной обработкой плазмой в различных режимах (б–е):

б–д — обработка плазмой в течение 25, 50, 100 и 200 с соответственно; е — обработка плазмой при подаче ВЧ-смещения

Fig. 5. I – V curve sections with current oscillations for $\text{SiN}_x/\text{AlGaN}/\text{GaN}$ structures, SiN_x (a) without additional plasma treatment and (б–е) with additional plasma treatment in different modes: (б–д) plasma treatment for 25, 50, 100 and 200 s, respectively and (e) plasma treatment with HF bias

перераспределение таких примесей как кислород, азот и углерод.

Таким образом, мы предполагаем, что в рассматриваемых случаях может формироваться дефектная область слоя AlGa_xN у границы с GaN, обогащенная межузельными атомами кислорода, азота, алюминия, галлия и их комплексами. Это, в свою очередь, во-первых, может приводить к образованию высокой плотности электрически активных граничных состояний, а, во-вторых, — подзоны в буферном слое вблизи границы AlGa_xN/GaN. Сравнение $C-V$ и $I-V$ -характеристик показало, что пульсации тока возникают при напряжениях, при которых электрическое поле уже влияет на область AlGa_xN вблизи границы AlGa_xN/GaN (см. рис. 1, в). При наблюдении пульсаций постоянного тока у образцов после осаждения без предварительной обработки в плазме концентрация носителей заряда в канале двумерного газа структуры SiN_x/AlGa_xN/GaN остается такой же, как у исходной гетероструктуры AlGa_xN/GaN до осаждения (см. табл. 2).

Осцилляции тока на $I-V$ -характеристиках гетероструктур также обнаружены в ряде экспериментальных исследований. Так, авторы работы [21] наблюдали осцилляции тока как на ВАХ характеристиках гетероструктур с квантовыми ямами, так и в пленках GaAs с различным уровнем легирования и объяснили это возникновением в структурах статических и движущихся акустических доменов. Такой же механизм осцилляций тока предложили авторы работы [22] для объяснения осцилляций тока в гетероструктурах AlGa_xN/GaN. Авторы работы [12] наблюдали зависимость колебаний фототока в гетероструктурах AlGa_xN/GaN от состава диэлектрика на поверхности AlGa_xN и связали появление осцилляций с образованием дефектов определенного состава. На наш взгляд, эффект появления осциллирующей компоненты тока в гетероструктуре AlGa_xN/GaN при определенных режимах обработки поверхности структуры связан с формированием подзоны в AlGa_xN вблизи границы AlGa_xN/GaN и вызван туннелированием электронно-дырочных пар через состояния виртуальной квантовой ямы, формирующейся в этой области структуры [23, 24].

Таким образом, PECVD при определенных режимах, по-видимому, может обуславливать образование повышенной концентрации дефектов ряда примесей в объеме слоя AlGa_xN, практически не изменяя диэлектрические свойства такого слоя. Это приводит к тому, что, как подтвердили $C-V$ -измерения, концентрация свободных носителей в канале, а также расположение канала относительно поверхности гетероструктуры после осаждения диэлектрика не изменяются по сравнению с исходной гетероструктурой до осаждения (см. табл. 2).

Общую картину процессов, происходящих при PECVD диэлектрических пленок SiN_x на поверх-

ность гетероструктур AlGa_xN/GaN, на наш взгляд, дополняют эксперименты с прямым воздействием разной продолжительности азотной плазмы на поверхность гетероструктур до напуска моносилана. Как уже указывалось выше, непосредственное воздействие азотной плазмы в стандартных процессах плазмохимии на поверхность структур не может приводить к распылению материала из-за низких энергий частиц азота (не выше 50 эВ), но, как показано в ряде работ [13—15], может происходить азотирование материала. Увеличение продолжительности воздействия плазмы при таком процессе не приводит к увеличению глубины проникновения атомов азота в материал, т. е. глубина дефектной области с повышенным содержанием азота в буферном слое AlGa_xN не увеличивается, а растет лишь «насыщение» атомами азота такой области слоя AlGa_xN [13, 25]. Это подтверждают результаты нашего эксперимента: уже при продолжительности воздействия плазмы 25 с азотирование приповерхностной области буферного слоя приводит к возникновению приповерхностной дефектной области с повышенным содержанием азота, что может изменять упругие напряжения на границе «буферный слой — диэлектрик».

Картина изменения упругих напряжений и, как следствие, пьезополяризации в системе AlGa_xN/GaN меняется так сильно, что практически исчезает положительный фиксированный заряд в анализируемой системе: $U_{отс}$ стремится к нулю (см. рис. 2, кривая 3). Как видно из рис. 2 (кривые 4 и 5), дальнейшее увеличение продолжительности воздействия плазмы приводит, к возникновению уже отрицательного фиксированного заряда в системе диэлектрик/AlGa_xN/GaN из-за увеличения степени насыщения этой же дефектной области буферного слоя азотом: $U_{отс}$ сдвигается в сторону положительных значений. При этом измеряемая емкость при прямой развертке меняется от 250 до 180 пФ практически при одинаковом наклоне $C-V$ -кривых на участке перехода из обеднения в обогащение. При этом концентрация носителей в канале двумерного газа, например, при продолжительности воздействия плазмы 100 с уменьшается на порядок (см. рис. 4), а при увеличении продолжительности воздействия до 200 с падает до $(6-7) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Кроме того, при непосредственном воздействии плазмы на поверхность гетероструктур не наблюдается восстановление значения измеряемой емкости (см. рис. 3, б) при изменении направления развертки управляющего напряжения и появляется гистерезис (рис. 3, а). На наш взгляд, это свидетельствует о том, что в рассматриваемом случае имеет место не только простое азотирование части буферного слоя, но и формирование в этом слое электрически активных дефектов, природа которых требует дальнейшего изучения.

Роль воздействия плазменной составляющей на процесс формирования пульсаций подтверждает эксперимент с подачей ВЧ-смещения на гетероструктуру в процессе непосредственного воздействия плазмой на ее поверхность. Активное воздействие азотной плазмы при этом резко возрастает из-за ускорения частиц азота к поверхности (энергия частиц плазмы значительно превышает 50 эВ). Это приводит, как видно из данных табл. 2, к резкому возрастанию количества осцилляций (см. рис. 5).

Таким образом, полученные в работе результаты показывают, насколько сложными по своему воздействию на гетероструктуры являются PECVD процессы, а также подготовка поверхности к этому процессу и как малейшие изменения или нарушения в технологии могут повлиять на электрические параметры формируемых структур AlGaIn/GaN с пассивирующими слоями. Кроме того, наличие наблюдаемых пульсаций тока, несмотря на очень низкие значения тока утечки, может, на наш взгляд, приводить к самым неожиданным эффектам при работе транзисторов, например, быть причиной низкочастотных шумов.

Заключение

В результате $C-V$ и $I-V$ -измерений структур $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$, сформированных методами PECVD при различных технологических вариантах процесса, показано, что у структур с пленкой SiN_x с содержанием азота 60 % и кремния 40 % или обогащенных кислородом (5—8 %) наблюдается появление на $I-V$ -кривых характерных пульсаций тока утечки. Экспериментально показано, что параметры наблюдаемых осцилляций определяются, в частности, особенностями воздействия плазмы на поверхность гетероструктуры. Даны возможные объяснения причин появления характерных пульсаций. Установлено, что с помощью дополнительного непосредственного воздействия азотной плазмы разной продолжительности на поверхность гетероструктур AlGaIn/GaN можно управлять величиной и знаком фиксированного заряда в системе $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ и изменять концентрацию свободных носителей в канале двумерного газа в системе AlGaIn/GaN.

Библиографический список

1. Chevchenko S.A., Reshchikov M.A., Fan Q., Ni X., Moon Y.T., Baski A.A., Morkoç H. Study of SiN_x and SiO_2 passivation of GaN surfaces. *J. Appl. Phys.*, 2007; 101(11): 113709. <https://doi.org/10.1063/1.2740324>
2. Liu Z.H., Ng G.I., Zhou H., Arulkumaran S., Maung Y.K.T. Reduced surface leakage current and trapping effects in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors on silicon with $\text{SiN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ passivation. *Appl. Phys. Lett.*, 2011; 98(11): 113506. <https://doi.org/10.1063/1.3567927>
3. Jayanta Joglekar S. Surface and mechanical stress effects in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors. Thesis:

Ph.D. Massachusetts Institute of Technology, 2017. 161 p. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/111325>

4. Osipov K.Y., Ostermay I., Brunner F., Würfl J., Tränkle G. Effect of external mechanical stress on DC performance and reliability of integrated E/D GaN HEMTs. *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, 2018; 31(4): 419—425. <https://doi.org/10.1109/TSM.2018.2865106>
5. Новак А.В., Новак В.Р., Дедкова А.А., Гусев Е.Э. Зависимость механических напряжений в плёнках нитрида кремния от режимов плазмохимического осаждения. *Известия вузов. Электроника*, 2017; 22(2): 138—146. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2017-22-2-138-146>
6. Dergez D., Bittner A., Schalko J., Schmid U. Low-stress and long-term stable a-SiN_x: H films deposited by ICP-PECVD. *Procedia Engineering*, 2014; 87: 100—103. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.392>
7. Dinara S.M., Jana S.K., Ghosh S., Mukhopadhyay P., Kumar R., Chakraborty A., Biswas D., Bhattacharya S. Enhancement of two dimensional electron gas concentrations due to Si_3N_4 passivation on $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}$ heterostructure: strain and interface capacitance analysis. *AIP Advances*, 2015; 5(4): 047136—047136—11. <https://doi.org/10.1063/1.4919098>
8. Сейдман Л.А., Концевой Ю.А., Енишерлова К.Л., Миннебаев С.В. Пленки SiN_x , полученные методом PECVD, в качестве пассивации AlGaIn/GaN HEMT. *Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы*, 2020; (3 (258)): 22—33.
9. Enisherlova K.L., Temper E.M., Kolkovsky Y.V., Medvedev B.K., Kapilin S.A. The ALD films of Al_2O_3 , SiN_x , and SiO_2 as passivation coatings in AlGaIn/GaN HEMT. *Russ. Microelectron.*, 2020; 49(8): 603—611. <https://doi.org/10.1134/S106373972008003X>
10. Берлин Е.В., Григорьев В.Ю., Сейдман Л.А. Индуктивные источники высокоплотной плазмы и их технологические применения. М.: Техносфера, 2018, 462 с.
11. Gweon G.H., Lim J.H., Hong S.P., Yeom G.Y. Effect of DC bias voltage on the characteristics of low temperature silicon-nitride films deposited by internal linear antenna inductively coupled plasma source. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2010; 49(5R): 056505. <https://doi.org/10.1143/JJAP.49.056505>
12. Kuiwei Geng, Ditao Chen, Quanbin Zhou, Hong Wang. AlGaIn/GaN MIS-HEMT with PECVD SiN_x , SiO_2 , SiO_2 as gate dielectric and passivation layer. *Electronics*, 2018; 7(12): 416. <https://doi.org/10.3390/electronics7120416>
13. Romero M.F., Jimenez A., Miguel-Sánchez J., Braña A.F., González-Posada F., Cuervo R., Calle F., Muñoz E. Effects of N_2 plasma pretreatment on the SiN passivation of AlGaIn/GaN HEMT. *IEEE Electron Device Lett.*, 2008; 29(3): 209—211. <https://doi.org/10.1109/LED.2008.915568>
14. Meunier R. Optimization of the elaboration of insulating layers for the gate structures and the passivation of MIS-HEMT transistors on GaN: Dr. Diss. Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2016, 154 p. <https://hal.laas.fr/tel-01376016>
15. Pletschen W., Kirste L., Cimalla V., Müller S., Himmerlich M., Krischok S., Ambacher O. Changes of electronic properties of AlGaIn/GaN HEMTs by surface treatment. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 2014, 1736. <https://doi.org/10.1557/opl.2014.937>
16. Антонова И.В., Поляков В.И., Руковишников А.И., Мансуров В.Г., Журавлев К.С., Глубокие уровни и электронный транспорт в гетероструктурах AlGaIn/GaN. *Физика и техника полупроводников*, 2008; 42(1): 53—59. <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/6484>
17. Fu C., Lin Z., Cui P., Lv Y., Zhou Y., Dai G., Luan C., Liu H., Cheng A. The influence of the PCF scattering on the electrical properties of the AlGaIn/AlN/GaN HEMTs after the Si_3N_4 surface passivation. *Appl. Phys. A*, 2018; 124(4): 1—10. <https://doi.org/10.1007/s00339-018-1702-6>
18. Liu S.C., Huang C.K., Chang C.H., Lin Y.C., Chen B.Y., Tsai S.P., Majlis B.Y., Dee C.F., Chang E.Y., Effective passivation with high-density positive fixed charges for GaN MIS-HEMTs.

IEEE J. Electron Devices Society, 2017; 5(3): 170—174. <https://doi.org/10.1109/JEDS.2017.2669100>

19. Liu X., Wang X., Zhang Y., Wei K., Zheng Y., Kang X., Jiang H., Li J., Wang W., Wu X., Wang X. Insight into the near-conduction band states at the crystallized interface between GaN and SiN_x grown by low-pressure chemical vapor deposition. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018; 10(25): 21721—21729. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b04694>

20. Enisherlova K.L., Kulikauskas V.S., Zatekin V.V., Rusak T.F., Gladysheva N.B., Razgulyaev I.I. AlGaIn/GaN heterostructure study using Rutherford backscattering spectrometry. *J. Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2011; 5(4): 626—635. <https://doi.org/10.1134/S1027451011070093>

21. Антонов А.В., Гавриленко В.И., Демидов Е.В., Звонков Б.Н., Ускова Е.А. Осцилляции тока при латеральном транспорте в гетероструктурах GaAs/InGaAs с квантовыми ямами. *Физика и техника полупроводников*, 2005; 39(1): 53—58. <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/5699>

22. Yoder P.D., Sridharan S., Graham S., Shen S.C., Ryou J.H., Dupuis R.D. Traveling dipole domains in AlGaIn/GaN heterostructures and the direct generation of millimeter-wave oscillations. *Phys. Status Solidi C*, 2011; 8(7–8): 2285—2287. <https://doi.org/10.1002/pssc.201001143>

23. Eller B.S., Yang J., Nemanich R.J., Electronic surface and dielectric interface states on GaN and AlGaIn. *J. Vacuum Sci. Technol. A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2013; 31(5): 050807. <https://doi.org/10.1116/1.4807904>

24. Gustafson B. Resonant tunneling in laterally confined quantum structures. Lund University (Sweden), 2001, 106 p. <https://lup.lub.lu.se/record/41579>

25. Dong Z., Hao R., Zhang Z., Cai C., Zhang B., Cheng Z. Impact of N-plasma treatment on the Current collapse of ALGAN/GAN HEMTs. In: *12th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT)*. Guilin (China): IEEE, 2014, pp. 1—3. <https://doi.org/10.1109/ICSICT.2014.7021380>

References

1. Chevtchenko S.A., Reshchikov M.A., Fan Q., Ni X., Moon Y.T., Baski A.A., Morkoç H. Study of SiN_x and SiO₂ passivation of GaN surfaces. *J. Appl. Phys.*, 2007; 101(11): 113709. <https://doi.org/10.1063/1.2740324>

2. Liu Z.H., Ng G.I., Zhou H., Arulkumaran S., Maung Y.K.T. Reduced surface leakage current and trapping effects in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors on silicon with SiN/Al₂O₃ passivation. *Appl. Phys. Lett.*, 2011; 98(11): 113506. <https://doi.org/10.1063/1.3567927>

3. Jayanta Joglekar S. Surface and mechanical stress effects in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors. Thesis: Ph.D. Massachusetts Institute of Technology, 2017, 161 p. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/111325>

4. Osipov K.Y., Ostermay I., Brunner F., Würfl J., Tränkle G. Effect of external mechanical stress on DC performance and reliability of integrated E/D GaN HEMTs. *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, 2018; 31(4): 419—425. <https://doi.org/10.1109/TSM.2018.2865106>

5. Novak A.V., Novak V.R., Dedkova A.A., Gusev E.E. Dependence of mechanical stress in silicon nitride films on conditions of plasma-enhanced chemical vapor deposition. *Proc. of universities. Electronics*, 2017; 22(2): 138—146. (In Russ.). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2017-22-2-138-146>

6. Dergez D., Bittner A., Schalko J., Schmid U., Low-stress and long-term stable a-SiN_x: H films deposited by ICP-PECVD. *Procedia Engineering*, 2014; 87: 100—103. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.392>

7. Dinara S.M., Jana S.K., Ghosh S., Mukhopadhyay P., Kumar R., Chakraborty A., Biswas D., Bhattacharya S. Enhancement of two dimensional electron gas concentrations due

to Si₃N₄ passivation on Al_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN heterostructure: strain and interface capacitance analysis. *AIP Advances*, 2015; 5(4): 047136—047136—11. <https://doi.org/10.1063/1.4919098>

8. Seidman L.A., Enisherlova K.L., Koncevoy U.A., Minnebaev S.V., Jilnicov I.A. SiN_x films obtained by the PECVD method as passivation of AlGaIn/GaN HEMT. *Electronic engineering. Series 2. Semiconductor devices*, 2020; (3 (258)): 22—33. (In Russ.). http://j.pulsarnpp.ru/images/journal/issues/2020/3_258/Seidman_str22.pdf

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

10. Berlin E.V., Grigoriev V.Yu., Seidman L.A. *Induktivnyye istochniki vysokoplotnoi plazmy i ikh tekhnologicheskie primeneniya* [Inductive sources of high-density plasma and their technological applications]. Moscow: Tekhnosfera, 2018, 462 p. (In Russ.)

11. Gweon G.H., Lim J.H., Hong S.P., Yeom G.Y. Effect of DC bias voltage on the characteristics of low temperature silicon-nitride films deposited by internal linear antenna inductively coupled plasma source. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2010; 49(5R): 056505. <https://doi.org/10.1143/JJAP.49.056505>

12. Kuiwei Geng, Ditao Chen, Quanbin Zhou, Hong Wang. AlGaIn/GaN MIS-HEMT with PECVD SiN_x, SiON, SiO₂ as gate dielectric and passivation layer. *Electronics*, 2018; 7(12): 416. <https://doi.org/10.3390/electronics7120416>

13. Romero M.F., Jimenez A., Miguel-Sánchez J., Braña A.F., González-Posada F., Cuervo R., Calle F., Muñoz E. Effects of N₂ plasma pretreatment on the SiN passivation of AlGaIn/GaN HEMT. *IEEE Electron Device Lett.*, 2008; 29(3): 209—211. <https://doi.org/10.1109/LED.2008.915568>

14. Meunier R. Optimization of the elaboration of insulating layers for the gate structures and the passivation of MIS-HEMT transistors on GaN: Dr. Diss. Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2016, 154 p. <https://hal.laas.fr/tel-01376016>

15. Pletschen W., Kirste L., Cimalla V., Müller S., Himmerlich M., Krischok S., Ambacher O. Changes of electronic properties of AlGaIn/GaN HEMTs by surface treatment. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 2014, 1736. <https://doi.org/10.1557/opl.2014.937>

16. Antonova I.V., Mansurov V.G., Zhuravlev K.S., Polyakov V.I., Rukavishnikov A.I. Deep levels and electron transport in AlGaIn/GaN heterostructures. *Semiconductors*, 2008; 42(1): 52—58. <https://doi.org/10.1007/s11453-008-1007-z>

17. Fu C., Lin Z., Cui P., Lv Y., Zhou Y., Dai G., Luan C., Liu H., Cheng A. The influence of the PCF scattering on the electrical properties of the AlGaIn/AlN/GaN HEMTs after the Si₃N₄ surface passivation. *Appl. Phys. A*, 2018; 124(4): 1—10. <https://doi.org/10.1007/s00339-018-1702-6>

18. Liu S.C., Huang C.K., Chang C.H., Lin Y.C., Chen B.Y., Tsai S.P., Majlis B.Y., Dee C.F., Chang E.Y. Effective passivation with high-density positive fixed charges for GaN MIS-HEMTs. *IEEE J. Electron Devices Society*, 2017; 5(3): 170—174. <https://doi.org/10.1109/JEDS.2017.2669100>

19. Liu X., Wang X., Zhang Y., Wei K., Zheng Y., Kang X., Jiang H., Li J., Wang W., Wu X., Wang X. Insight into the near-conduction band states at the crystallized interface between GaN and SiN_x grown by low-pressure chemical vapor deposition. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018; 10(25): 21721—21729. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b04694>

20. Enisherlova K.L., Kulikauskas V.S., Zatekin V.V., Rusak T.F., Gladysheva N.B., Razgulyaev I.I. AlGaIn/GaN heterostructure study using Rutherford backscattering spectrometry. *J. Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2011; 5(4): 626—635. <https://doi.org/10.1134/S1027451011070093>

21. Antonov A.V., Gavrilenco V.I., Demidov E.V., Zvонков B.N., Uskova E.A. Current oscillations under lateral trans-

port in GaAs/InGaAs quantum well heterostructures. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2005; 39(1): 53—58. (In Russ.). <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/5699>

22. Yoder P.D., Sridharan S., Graham S., Shen S.C., Ryou J.H., Dupuis R.D. Traveling dipole domains in AlGaN/GaN heterostructures and the direct generation of millimeter-wave oscillations. *Phys. Status Solidi C*, 2011; 8(7–8): 2285—2287. <https://doi.org/10.1002/pssc.201001143>

23. Eller B.S., Yang J., Nemanich R.J., Electronic surface and dielectric interface states on GaN and AlGaN. *J. Vacuum*

Sci. Technol. A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2013; 31(5): 050807. <https://doi.org/10.1116/1.4807904>

24. Gustafson B. Resonant tunneling in laterally confined quantum structures. Lund University (Sweden), 2001, 106 p. <https://lup.lub.lu.se/record/41579>

25. Dong Z., Hao R., Zhang Z., Cai C., Zhang B., Cheng Z. Impact of N-plasma treatment on the Current collapse of ALGAN/GAN HEMTs. In: *12th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT)*. Guilin (China): IEEE, 2014, pp. 1—3. <https://doi.org/10.1109/ICSICT.2014.7021380>

Информация об авторах / Information about the authors

Енишерлова Кира Львовна — доктор техн. наук, начальник лаборатории, enisherlova@pulsarnpp.ru; АО «НПП «Пульсар», Окружной проезд, д. 27, Москва, 105187, Россия

Сейдман Лев Александрович — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, seid1@yandex.ru; АО «НПП «Пульсар», Окружной проезд, д. 27, Москва, 105187, Россия

Темпер Элла Моисеевна — старший научный сотрудник, АО «НПП «Пульсар», Окружной проезд, д. 27, Москва, 105187, Россия

Концевой Юлий Абрамович — доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, kontsevov@pulsarnpp.ru; АО «НПП «Пульсар», Окружной проезд, д. 27, Москва, 105187, Россия

Kira L. Enisherlova — Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, enisherlova@pulsarnpp.ru; JSC “S&PE “Pulsar”, 27 Okruzhnoy proezd, Moscow 105187, Russia

Lev A. Seidman — Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, seid1@yandex.ru; JSC “S&PE “Pulsar”, 27 Okruzhnoy proezd, Moscow 105187, Russia

Ella M. Temper — Senior Researcher, JSC “S&PE “Pulsar”, 27 Okruzhnoy proezd, Moscow 105187, Russia

Yuliy A. Kontsevov — Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Professor, kontsevov@pulsarnpp.ru; JSC “S&PE “Pulsar”, 27 Okruzhnoy proezd, Moscow 105187, Russia
