УДК 621.382.2

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЯДА КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПАРАМЕТРЫ МОЩНЫХ AlGaIn/GaN/SiC HEMT

**К.Л. Енишерлова, Ю.В. Колковский, Б.К. Медведев,
А.Л. Филатов, Э.М. Темпер, С.А. Капилин**
АО "НПП "Пульсар", 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

Рассматривается влияние ряда параметрических дефектов, связанных с процессами создания СВЧ мощных AlGaIn/GaN HEMT, а также некоторых характеристик исходных гетероструктур на параметры приборов. Анализировалось возможное влияние полей внутренних напряжений в исходных подложках SiC, плотности дислокаций, изолирующих свойств буферного слоя GaN и микрорельефа поверхности исходных гетероструктур на токи утечки формируемых приборов. На примере мощных СВЧ транзисторов S- и X-диапазона исследовалось влияние таких конструкторско-технологических факторов, как относительное расположение металлизированных отверстий вывода контактов к истоку на обратную сторону кристалла, а также влияние особенностей технологических процессов изготовления вжигаемых металлических контактов на параметры приборов. На основе полученных экспериментальных данных показано, как паразитные ёмкости и сопротивления влияют на величину частотных параметров реальных AlGaIn/GaN HEMT.

Ключевые слова: гетероструктура, СВЧ транзистор, HEMT, параметрические дефекты, вжигаемый омический контакт, микрорельеф, ток утечки, удельное сопротивление, C-V-измерения, микроскоп атомных сил (АСМ)

Сведения об авторах: Енишерлова Кира Львовна, д.т.н., enisherlova@pulsarnpp.ru; Колковский Юрий Владимирович, д.т.н, проф., kolk@pulsarnpp.ru; Медведев Борис Константинович, medvedev164@mail.ru; Филатов Анатолий Леонидович, к.т.н., filatov_al@pulsarnpp.ru; Темпер Элла Моисеевна, temper_jm@pulsarnpp.ru; Капилин Семен Андреевич, kapilin_sa@pulsarnpp.ru

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF A NUMBER OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE PARAMETERS OF POWER AlGaIn/GaN/SiC HEMT

K.L. Enisherlova, Yu.V. Kolkovskiy, B.K. Medvedev, A.L. Filatov, E.M. Temper, S.A. Kapilin
"S&PE "Pulsar" JSC, 105187, Moscow, Okružhnoy proezd, 27

The article discusses the effect of a number of parametric defects associated with the processes of creating microwave power AlGaIn/GaN HEMTs, as well as with some characteristics of the initial heterostructures, on the parameters of the devices. We conducted an analysis of the possible influence of the internal stress fields in the initial SiC substrates, the dislocation density, insulating properties of the GaN buffer layer and the surface microrelief of the initial heterostructures on the leakage currents of the produced devices. Using the example of S- and X-band power microwave transistors, we investigated the influence of such design and technological factors as the relative location of the metallized output pin openings on the back side of the crystal, as well as the influence of the features of technological processes of fabricated metal contacts on the devices' parameters. Based on the obtained experimental data, it is shown how parasitic capacitances and resistances influence the frequency parameters of an actual AlGaIn/GaN HEMT.

Keywords: heterostructure, microwave transistor, HEMT, parametric defects, burning ohmic contact, microrelief, leakage current, resistivity, CV measurement, atomic force microscope (AFM)

Authors: Enisherlova Kira Lvovna, Sc.D., enisherlova@pulsarnpp.ru; Kolkovskiy Yury Vladimirovich, Sc.D., Professor, kolk@pulsarnpp.ru; Medvedev Boris Konstantinovich, medvedev164@mail.ru; Filatov Anatoly Leonidovich, Ph.D., filatov_al@pulsarnpp.ru; Temper Ella Moiseevna, temper_jm@pulsarnpp.ru; Kapilin Semyon Andreevich, kapilin_sa@pulsarnpp.ru

Введение

В СВЧ электронике все большее применение находят гетероструктуры на основе широкозонных нитридных материалов, в частности, эти материалы используются для изготовления HEMT, MOS-HEMT транзисторов и гибридных схем на их основе. При этом совершенствование технологических приёмов изготовления транзисторов и получения исходных эпитаксиальных гетероструктур обеспечивает быстрые темпы роста частотных характеристик приборов [1-3]. В настоящее время уже показано, как за счёт инновационного масштабирования технологии формирования транзисторных структур можно повысить частоту СВЧ нитридных HEMT до 100 ГГц и более [1]. Одновременно с решением вопроса повышения частоты работы приборов быстрое развитие технологии с использованием нитридных гетероструктур привело к промышленному выпуску мощных СВЧ нитридных транзисторов сантиметрового диапазона (6÷25 ГГц) [4]. В этом случае основными вопросами становятся надёжность, процент выхода годных кристаллов и стоимость приборов. Поэтому представляет интерес анализ факторов, наиболее критичных для электрических параметров приборов и их стабильности в процессе работы приборов. Выявление потенциальных сбоев на ранней стадии разработки технологии позволяет реализовать корректирующие действия для оптимизации технологических процессов и контрольных операций. При этом, поскольку дело касается новых технологий, речь может идти не только о широко обсуждаемых дефектах, а о так называемых параметрических дефектах, связанных с

отсутствием воспроизводимости в используемых технологических процессах, ухудшением качества исходных гетероструктур и прочими тонкостями технологии. На данном этапе развития производства нитридных приборов уже ясно, что в реальности возможность точного воспроизводства технологии, например, изготовления контактов от процесса к процессу, может не реализоваться, а такая невоспроизводимость процессов, приводящая к не всегда сразу выявляемым отклонениям в параметрах приборов, может сказаться на их деградации в процессе работы и, как следствие, на сроке службы транзисторов и стабильности их параметров [5].

В связи с вышесказанным целью данной работы был анализ возможного влияния таких факторов, как:

- параметрические дефекты исходных гетероструктур, их воспроизводимость;
- ряд конструктивно-технологических особенностей создания СВЧ мощных

AlGaIn/GaN HEMT, работающих в сантиметровом диапазоне длин волн, влияющих на параметры приборов, а также анализ оптимальных путей диагностики этих факторов.

Краткий обзор параметрических дефектов исходных гетероструктур

Об исходных гетероструктурах, основные параметры которых гарантируют саму возможность формирования на них СВЧ мощных HEMT, имеется большое количество работ, поэтому информация о гетероструктурах будет дана в виде сжатого обзора. Однако особенностью обзора будет то, что в соответствии с поставленной задачей (анализ параметрических данных)

речь пойдет не о таких основных параметрах гетероструктур, как толщина слоёв, подвижность, концентрация носителей заряда, слоёвое сопротивление в канале, которые отражаются в сертификатах к каждой гетероструктуре, а, как правило, о не оговариваемых в сертификатах дефектах, которые при этом могут оказывать влияние на характеристики формируемых на них приборов.

Как правило, для мощных СВЧ-HEMT используются гетероструктуры (*i*-GaN)/AlGaIn/GaN, выращенные MOCVD-технологией с барьерным нелегированным слоем *i*-AlGaIn толщиной 18-20 нм при мольной доле алюминия 0,26-0,3 и буферным слоем GaN толщиной от 1,5 до 2,5 мкм [6]. Для мощной СВЧ электроники

в качестве подложечного материала в настоящее время, как правило, используется монокристаллический SiC гексагональной решётки (политипы 4H и 6H) [6].

В настоящей статье рассмотрены следующие аспекты: качество материала подложки, структурные дефекты эпитаксиальных слоёв, изолирующие свойства буферного слоя GaN и микрорельеф поверхности гетероструктур.

1. Качество материала подложки SiC

Как показано в работе [7], качество подложечного материала в значительной степени определяет параметры выращиваемых эпитаксиальных слоёв и, как следствие, параметры формируемых на них приборов, поэтому контроль исходных

Рис. 1

Микрофотографии поверхности и распределения химических элементов в весовых процентах областей AlGaIn/GaN: а, в – с внутренними напряжениями (область А); б, г – без внутренних напряжений (область Б)

подложек из SiC на наличие внутренних напряжений обязателен. Показано, что наличие внутренних напряжений в материале подложки может приводить к резкому возрастанию токов утечки, к сдвигу напряжения отсечки ($U_{отс}$) в область отрицательных значений (возникновению положительного заряда в барьерном слое) и значительному разбросу электрических параметров эпитаксиальных слоёв и приборов. Эти изменения могут быть связаны с влиянием полей упругих напряжений на макроскопическую картину поляризации на границе нитридных соединений, что может привести к изменению концентрации электронов, а возможно, и подвижности в канале 2DEG. Кроме того, экспериментальные результаты, полученные в работе [7], показали, что наличие напряжённых участков может приводить к перераспределению и накоплению в напряжённых областях примесей, попадающих из газовой среды в растущую эпитаксиальную плёнку, что видно при исследовании структур с использованием сканирующего электронного микроскопа с рентгеновской приставкой (рис. 1): в области с повышенной концентрацией напряжений наблюдается присутствие ряда случайных элементов (рис. 1а, в), в то время как на свободных участках присутствует только кислород естественного окисла поверхности гетероструктуры (рис. 1б, г) [7].

В связи с этим перед использованием пластин SiC в качестве подложек под эпитаксиальное наращивание обязателен их контроль в поляризованном свете на наличие в объёме материала внутренних напряжений (рис. 2).

Рис. 2

Микрофотографии структур AlGaIn/GaN/SiC в поляризованном свете (а, б); область А гетероструктуры при увеличении $\times 200$ (б)

2. Дислокационная структура эпитаксиальных нитридных слоёв

Плотность дислокаций в слоях AlGaIn/GaN/SiC обычно составляет: винтовых и смешанных – 10^7 - 10^8 см⁻², краевых – 10^9 см⁻² [6, 9]. Однако влияние дислокаций в эпитаксиальных слоях на параметры приборов неоднозначно – они могут играть как положительную, так и отрицательную роль. В частности, при формировании омических контактов они могут облегчать процесс туннелирования электронов в канал двумерного электронного газа, однако наличие дислокаций в активной области приборов может приводить к росту токов утечки. На рис. 3 показана поверхность активной области одного из кристаллов AlGaIn/GaN/SiC HEMT после травления на дислокации. Определённая по ямкам травления (рис. 3а) плотность дислокаций под ножкой затвора прибора составляет

Рис. 3

3D-изображение (АСМ) активной области прибора после травления на дислокации (а);
3D-изображение (АСМ) ямки травления (б)

$5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$ (300-400 штук). По данным работы [8], такая плотность дислокаций может привести к изменению тока обратносмещённого затвора на $0,1-0,2 \text{ А/см}^2$.

3. Изолирующие свойства буферных слоёв

Для обеспечения низких токов утечки и высоких пробивных напряжений НЕМТ необходимы хорошие изолирующие свойства буферных слоёв GaN. Причиной плохих изолирующих свойств этого слоя

может быть как высокая плотность дислокаций, так и присутствие некоторых неконтролируемых примесей, образующих различные комплексы (донорные состояния в запрещённой зоне) [9, 10]. Поэтому для некоторых типов приборов необходимы компенсация отрицательного влияния дефектов материала буферного слоя и исключение возможности образования пробоя прибора через буферный слой. На рис. 4 показаны примеры пробоя через слой GaN.

Рис. 4

Варианты утечек и пробой через буферный слой GaN: а) обход электронов (bypass) через GaN при высоком уровне смещения на стоке (условия пробоя затвора); б) утечка через буферный слой к проводящей подложке (классический пробой через GaN, зависит от толщины и технологии формирования слоя GaN [Farid Medjdoub «Gallium Nitride (GaN): Physics, Devices, and Technology» CRC Press, 2017]

Считается, что у гетероструктур AlGaN/GaN/SiC для HEMT транзисторов буферный слой должен быть полуизолятором с сопротивлением более 10^5 Ом на площади гетероструктуры не менее 50 %. Однако есть мнение, что для полной компенсации собственных доноров в GaN нужен слой с сопротивлением более чем 10^9 Ом [11]. Для обеспечения изолирующих свойств буферного слоя в настоящее время используют такие решения, как:

- ввод спейсерных слоёв: слоя AlN (10–20 Å) или слоёв AlGaN/AlN, или даже «обратной гетероструктуры» – AlGaN/InGaN (последний вариант – обычно для эпитаксиальных слоёв, выращенных методом МЛЭ) [10]. Введение таких слоёв приводит к лучшей локализации электронов в канальном GaN слое и, как следствие, уменьшению величины тока утечки через буфер;
- принудительное легирование буферного слоя углеродом или железом в процессе эпитаксиального наращивания для компенсации донорных состояний. Углерод в GaN известен как глубокий акцептор,

который может компенсировать остаточные доноры, однако неконтролируемый ввод углерода в GaN может приводить к более грубой морфологии поверхности растущих плёнок. В работах [11, 12] показано, что максимальный эффект от принудительного легирования углеродом буферного слоя может быть получен, когда проводится легирование части буферного слоя таким образом, что верхняя часть буфера непосредственно у границы с барьерным слоем легированию не подвергается (полуизолирующий многослойный буфер). Было показано [13], что дополнительное легирование буферного слоя GaN углеродом при наличии чистой зоны (без углерода) непосредственно в контакте с границей раздела GaN–AlGaN позволяет снизить обратные токи гетероструктур практически на 2,5–3 порядка (рис. 5) [13].

Контроль изолирующих свойств буферных слоёв GaN возможен с использованием C-V характеристик на частотах от 10 кГц до 1 МГц (ртутный зонд). Рост величин ёмкости C_s и сопротивления R_s

Рис. 5

I-V характеристики структур AlGaN/GaN/ α Al₂O₃: черные линии – нелегированный образец, красные – образец, легированный углеродом (а); *C-V* характеристики гетероструктуры GaN, легированной углеродом: $f = 10$ –500 кГц; вставка – профиль концентрации носителей заряда (б)

в области глубокого обеднения ($U_{\text{изм}} < U_{\text{отс}}$) при измерении по последовательной схеме замещения свидетельствует о плохих изолирующих свойствах слоя GaN гетероструктуры.

4. Влияние микрорельефа

Микрорельеф поверхности эпитаксиальных слоёв также влияет на параметры нитридных гетероструктур и, как следствие, на параметры формируемых на них НЕМТ, в частности, морфология поверхности гетероструктуры может влиять на величину токов утечки транзисторов. В свою очередь, как было показано в ряде работ [14, 15], морфология поверхности гетероструктур определяется прежде всего особенностями и режимами эпитаксиальных процессов. При использовании процессов MOCVD морфология поверхности гетероструктур во многом определяется морфологией зародышевых слоёв, а также составом газа-носителя, используемого в процессе, в частности, [14] при большей концентрации азота в составе газа-носителя микрорельеф (RMS) поверхности плёнок уменьшается от 10 до $7\text{ \AA}$ (рис. 6, гетероструктуры А и С) даже при использова-

нии в качестве подложки кремния. Улучшая морфологию зародышевых слоёв за счёт оптимизации условий MOCVD, микрорельеф поверхности эпитаксиальных слоёв можно уменьшить до $6\text{ \AA}$, при этом подвижность в плёнках возрастает с 1250 до $1650\text{ см}^2/\text{Вс}$, а токи утечек НЕМТ, изготовленных на таких плёнках, уменьшаются от 26 до $6,5\text{ }\mu\text{А}/\text{мм}$ при крутизне приборов $245\text{ мС}/\text{мм}$ [9]. Использование разных технологий роста позволило снизить токи утечки в структурах AlGaIn/GaN на сапфире на несколько порядков [9].

Локальная аномалия микрорельефа поверхности эпитаксиального слоя может быть также связана с особенностями поверхности подложки SiC, например, рост крупных блоков может происходить в местах образования включений и концентрации напряжений. В работе [7] было показано, что если на ненапряжённых областях высота рельефа не превышает толщины рабочего слоя AlGaIn (20 нм), то в напряжённых областях выступы достигают высоты 50-60 нм (рис. 7). Нарушения процесса эпитаксии или плохая предварительная отмывка поверхности подложек могут приводить к тому, что эти выступы

Рис. 6

РЭМ изображение поверхностей двух структур AlGaIn/GaN с различным микрорельефом (а); обратная ветвь I-V характеристики для приборов партии А и С (б) [14]

Рис. 7

Микрорельеф поверхности гетероструктур AlGaIn/GaN, выращенных на подложках SiC с напряжениями в подложке (а), без напряжений (б) и на подложке сапфира (в) [13]

приобретают «гигантские» размеры, и микрорельеф превращается в макрорельеф. Эти нарушения, как правило, имеют вытянутую форму большой протяжённости в плане от 20 до 70 мкм с глубиной на наиболее глубоком участке от 0,1 до 0,2 мкм.

Известно, что с увеличением толщины буферного слоя может происходить уменьшение плотности дислокации [16], но, с другой стороны, увеличение толщины буферного слоя может приводить к возникновению более развитого микрорельефа, что также может быть причиной ухудшения параметров формируемых приборов. Показано, что уменьшение толщины слоя GaN от 2-3 мкм до 1,2-1,5 мкм может позволить уменьшить микрорельеф до 5-6 Å.

В связи с вышесказанным необходим выборочный входной контроль микрорельефа поверхности гетероструктур в нескольких точках рабочей поверхности на микроскопе атомных сил (АСМ).

Таким образом, в этом кратком обзоре рассмотрены параметрические дефекты

исходных эпитаксиальных гетероструктур, оказывающие наибольшее влияние на параметры приборов.

Что касается параметрических дефектов, связанных с конструкторско-технологическими особенностями процессов формирования мощных СВЧ нитридных HEMT, вызванных как невоспроизводимостью технологии от процесса к процессу, так и некоторыми конструкторскими решениями топологии прибора, то, с нашей точки зрения, оценку возможного влияния этих дефектов на работу приборов оптимально проводить непосредственно путём сравнительного анализа 2-х групп готовых кристаллов мощных СВЧ AlGaIn/GaN HEMT сантиметрового диапазона, отличающихся некоторыми конструктивно-технологическими особенностями их формирования.

Конкретно в данной работе рассмотрено влияние следующих факторов:

- относительного расположения металлизированных отверстий контактов к истоку для вывода их на обратную сторону кристалла;

– микрорельефа, дислокационной структуры и прочих дефектов эпитаксиальных слоёв областей истока и стока нитридных НЕМТ на параметры формируемых омических контактов.

В дальнейшем предполагается подробно рассмотреть влияние на параметры транзисторов:

- состава и особенностей используемых пассивирующих слоёв;
- концентрации поверхностных состояний исходных гетероструктур;
- особенностей строения и параметров подзатворных областей приборов.

Объект и методики исследования

Объект исследования

Исследовались кристаллы мощных СВЧ

транзисторов S - и X -диапазона разных производителей с большой периферией затвора (long gate periphery) при ширине затвора от 5 до 7 мм, длине 0,25-0,34 мкм (группа 1) и ширине от 10-25 мм, длине затвора 0,4-0,48 мкм (группа 2) (табл. 1). Все транзисторы были изготовлены на гетероструктурах (GaN)/AlGaN/GaN/SiC и имели планарное расположение контактных окон к областям истоков, затвор, сток. Омические контакты формировались с использованием композиции Ti-Al-Mo-Au Ti-Al-Ni-Au с последующим высокотемпературным отжигом. В качестве пассивирующего слоя использовались слои Si_xN_y . Большинство транзисторов имели металлизированные отверстия выводов контакта к истоку на обратную сторону кристалла. Некоторые

Таблица 1

Размеры анализируемых кристаллов НЕМТ

Группы	№ кристалла прибора	Кол-во пальцев, их длина, мкм	Расстояние между истоком-стоком, мкм	Примечания
I $L_3 = 0.25-0.35$ мкм $b_3 = 5-7$ мм	1	40x125	2.6	Мет.отверстия вне активной области прибора, FP
	2	20x350	4.4	Мет.отверстия в активной области
	3	40x125	3.5	Воздушные мосты
	4	40x125	2.5	Мет.отверстия вне активной области, FP
II $L_3 = 0.4-0.48$ мкм $b_3 = 10-25$ мм	5	120x100	4.8	Воздушные мосты
	6	80x350	5.0	Мет.отверстия в активной области, FP
	7	60x390	6.0	Мет.отверстия вне активной области, FP
	8	60x390	4.0	Воздушные мосты

транзисторы имели полевые электроды для уменьшения величины электрического поля на краю затвора, обращенного к стоку [17]. Все транзисторы были разделены на две группы в зависимости от длины и ширины затвора (табл. 1).

Методика исследования

В мощных СВЧ транзисторах для обеспечения высокой удельной плотности тока, высокого пробивного напряжения при функционировании на рабочих частотах (до 30 ГГц) и высокой плотности двумерного электронного газа, естественно, необходимо уменьшить величины всех паразитных ёмкостей и сопротивлений в первую очередь в цепях затвор-сток и затвор-исток [1, 18] (рис. 8), а также обеспечить низкие токи утечки и, как указывалось, высокие изолирующие свойства буферных слоёв исходных гетероструктур. Основная частотная характеристика полевого СВЧ транзистора – предельная частота передачи по току (f_t), как известно [1], определяется временем пролёта электронов под затвором и суммарным временем перезарядки внутренних и внешних ёмкостей.

Рис. 8

Схематичное изображение HEMT транзистора с паразитными ёмкостями и сопротивлениями

Для анализа ёмкостных параметров, как известно, используется метод измерения C-V характеристик. Поскольку в МДП на высоких частотах все зарядные и релаксационные явления связаны с основными носителями в полупроводнике и имеют короткое время релаксации (10^{-11} с), а все ловушечные состояния, связанные с дефектами материала и технологии, – это медленные состояния, для расчёта частотных характеристик МДП транзисторов паразитные ёмкости и сопротивления должны измеряться на низких частотах [19]. В данном случае при расчёте частотных характеристик СВЧ транзисторов использовались величины ёмкостей и сопротивлений, полученные при C-V-измерениях на частоте 1 МГц, при этом для анализа основных электрических цепей затвор-исток и затвор-сток HEMT использовались две упрощённые эквивалентные электрические схемы для полевых транзисторов (рис. 9),

Рис. 9

Электрические схемы HEMT для анализа цепей затвор-исток (а) и затвор-сток (б)

представленные в работе [18]. Определялись следующие параметры: ёмкость и сопротивление барьерного слоя, паразитное сопротивление и ёмкость буферного слоя, паразитные сопротивления областей истока и стока.

Измерения вольт-фарадных характеристик проводились на установке CSM/WIN System в диапазоне частот от 1 кГц до 1 МГц при планарном расположении измерительных золотых зондов – измерялись C-V характеристики БШ затвор-сток и затвор-исток. Ёмкостные зависимости измерялись как по параллельной (индекс-*p*), так и по последовательной (индекс-*s*) схемам замещения с дополнительной оценкой изменения проводимости от частоты при параллельной схеме замещения и сопротивления от частоты при последовательной схеме замещения. Таким образом, оценивались:

– ёмкость, проводимость и сопротивление в сильном обеднении цепей затвор-исток и затвор-сток;

– токи утечки цепей затвор-исток, затвор-сток.

Для сравнительного анализа омического сопротивления истока и стока транзисторов использовался измерительный блок фирмы Agilent Desktop B1500A. Измерялись вольт-амперные зависимости цепи исток-сток $I_{ст} = f(U_{исток-сток})$ с напряжением на затворе $U_z = 0$ В (I_d - V_d Pwr Device) в диапазоне напряжений от 0 до 400 мВ с установкой зондов непосредственно на поверхность приборного кристалла. Определялись угол наклона кривых и общее сопротивление $R_{и-с}$ цепи исток-сток, из которой определялось с учётом количества пальцев затвора

сопротивление одной ячейки исток-сток $R_{яч}$, а затем рассчитывалось удельное сопротивление контакта $R_d^* = R_{кон}/b$, где b – ширина одного пальца затвора прибора (сопротивление $R_{яч} = R_{канала} + 2 R_{кон}$). На этой же установке измерялась крутизна транзистора.

По полученным экспериментальным данным в соответствии с эквивалентной схемой с помощью следующего выражения оценивались основные частотные характеристики НЕМТ: величина f_t и коэффициент качества $K = f_t Lg$ [1, 18, 20].

$$f_t = 1/2\pi\tau_{пол} = v_{s.}/2\pi \cdot L_z \cdot \{1 + (R_{ис} + R_{ст}) \cdot G_d + C_{з-ст} \cdot [1 + (R_{ис} + R_{ст}) \cdot (g_m + G_d)] / (\epsilon_0 \epsilon \cdot b \cdot L_z) / d + [C_{з-ис} \cdot (R_{ис} + R_{ст}) \cdot G_d] / (\epsilon_0 \epsilon \cdot b \cdot L_z) / d \}^{-1}, (1)$$

где $(R_{ис} + R_{ст})$ – сопротивление областей истока и стока соответственно, G_d – выходная проводимость эквивалентной схемы, $C_{з-ст}$, $C_{з-ис}$ – общие ёмкости затвор-сток и затвор-исток соответственно, b – ширина затвора, ϵ – диэлектрическая постоянная AlGaIn, g_m – крутизна.

Для анализа структурных особенностей контактных областей истока и стока анализируемых приборов, уточнения размеров (протяжённости) активных областей транзисторов, размера углубления под ножку затвора использовался атомно-силовой микроскоп (АСМ) фирмы AIST-NT, модель Smart SPM. Предварительно длительным травлением кристаллов в растворе HF удалялись пассивирующие слои и металлическая часть контактов для вскрытия поверхности на границе «металлическая» область – модифицированный слой AlGaIn (рис. 10, поверхность А-А'). Вскрывающиеся

Рис. 10

3D-изображение (АСМ) рабочей области AlGaN/GaN HEMT (а); схематическое изображение рабочей области HEMT: пунктиром показаны удаляемые травлением металлические области (поверхность А- А', вскрываемая при травлении) (б); микрофотография рабочей области прибора после травления HF (к – ямка под ножку затвора) (в)

таким образом поверхности анализировались сканированием зондом Кельвина в контактном режиме.

Результаты исследования и их обсуждение

1. Влияние особенностей расположения металлизированных отверстий выводов контактов к истоку на обратную сторону кристалла транзистора

Для уменьшения паразитных входных сопротивлений прибора важным является уменьшение длины токоведущих дорожек с уменьшением сопротивления и индуктивности контактов к областям истока. Одним из решений этой проблемы является расположение металлизированных отверстий вывода контактов к истоку на обратную сторону кристалла непосредственно в

активных областях прибора с расширением контактной площади истока. Металлизированные отверстия могут быть расположены вне активных областей, но в этом случае необходимо использование в конструкции прибора воздушных мостов.

У двух анализируемых приборов (табл. 1, кристаллы № 6, 2) металлизированные отверстия располагались непосредственно в активной области прибора с максимальным приближением к области истока (рис. 11а). Однако проведённые ёмкостные измерения этих приборов показали, что такое конструкторское решение может приводить к негативным явлениям. В частности, у кристалла № 6 (табл. 1) с расположением отверстия на расстоянии от области истока 8-10 мкм (рис. 11) были зарегистрированы С-V кривые цепочки

Рис. 11

Микрофотография области транзистора с металлизированными отверстиями вывода контакта к истоку на обратную сторону (а); 3D-изображение области «А» прибора (АСМ) (б); сечение по «а-а» в области отверстия (в); C_s -V (г) и R_s -V (д) характеристики цепи затвор-сток транзистора при различных частотах

затвор-исток с резким возрастанием величины ёмкости C_s при работе в области сильного обеднения, причём величина паразитной ёмкости возрастала с уменьшением частоты измерений (рис. 11в). Кроме того, в области обеднения наблюдался также рост величины сопротивления R_s (рис. 11г). Кривые стандартной формы при C-V измерениях без возрастания величин C_s и R_s были получены при измерении приборов с расположением металлизированных отверстий на значительном расстоянии от активных областей приборов.

Рост величин ёмкостей и сопротивлений при глубоком обеднении можно объяснить исходя из рассмотрения схемы замещения гетероструктуры. Измеряемые

ёмкость и сопротивление при последовательном соединении будут определяться следующими уравнениями:

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_d} + \frac{1}{C_q} \cdot \left(\frac{\omega^2 \cdot C_q^2 \cdot R_t^2}{\omega^2 \cdot C_q^2 \cdot R_t^2 + 1} \right), \quad (2)$$

$$R_s = \frac{R_t}{\omega^2 \cdot C_q^2 \cdot R_t^2 + 1} + R_w, \quad (3)$$

где C_d – ёмкость барьерного слоя, $C_q = C_{опз} + C_t$ (сумма ёмкости ОПЗ и ёмкости состояний с глубокими уровнями в канале), R_t – сопротивление, отражающее наличие утечек в буферном слое. В сильном обеднении при $U_{из} > |U_{отс}|$ измеряемая ёмкость будет определяться только ёмко-

стью C_q , при этом зона обеднения простирается глубже канала в буферный слой. При отсутствии утечек генерация носителей невозможна из-за «качания» напряжения на затворе в синусоидальном поле. При наличии утечек в буферном слое определяющую роль начинает играть сопротивление R_t , особенно на низких частотах, поэтому величина общего сопротивления R_s (уравнение 3) в области обеднения будет больше, чем в области обогащения. Этим объясняется рост величины сопротивления в области обеднения при наличии утечек. В работе [21] уже рассматривалась возможность негативного влияния на ёмкостные параметры приборов расположения металлизированных отверстий вывода контактов на обратную сторону кристалла в активных областях HEMT.

Эксперименты также показали, что дальнейшее уменьшение расстояния между металлизированными отверстиями и областью истока (< 10 мкм) может приводить к тому, что прибор начинает «течь» (измерить C-V-характеристики удавалось только для цепочки затвор–сток).

Таким образом, сопоставление C-V и R_s -V характеристик для одних и тех же приборов но с разным расположением металлизированных отверстий позволяет утверждать, что изготовление металлизированных отверстий непосредственно в активной области приборов может приводить к возникновению в буферном слое GaN дефектов, формирующих медленные состояния, которые и вызывают рост паразитных ёмкостей и сопротивлений при сильном обеднении, что может негативно отразиться на параметрах HEMT.

2. Технологические аспекты формирования воспроизводимых вжигаемых металлических контактов

Наличие технологии получения воспроизводимых контактов с низким удельным

сопротивлением крайне важно для мощных HEMT на нитридных гетероструктурах, при этом для широкозонных материалов особенно с тонким нелегированным слоем (i -AlGaIn) эта задача достаточно сложная. Для формирования контактов на структурах AlGaIn/GaN, как правило, используются металлические композиции на основе Ti/Al, подвергнутые кратковременной термической обработке при $T = 800$ – 900 °C, при этом обычно используются модификации композиций Ti/Al/Ni/Au и Ti/Al/Mo/Au с нижним слоем Ti и верхним Au для уменьшения сопротивления и минимизации процесса окисления «металлической» области [22–24]. При отжиге основное взаимодействие металла с гетероструктурой – реакция нижнего слоя титана с азотом нитридных слоёв с образованием слоя TiN с низкой работой выхода электронов и сопутствующего слоя азотных вакансий – доноров [23]. Известно, что химические реакции при отжиге могут сопровождаться образованием агломератов металла [24], поскольку уже при $T = 660$ °C алюминий переходит в жидкое состояние и собирается в капли, а при дальнейшем повышении температуры может происходить растрескивание разделяющего слоя Ni (Mo), а также верхнего слоя золота с образованием фаз, например Ni-Al.

Для оценки качества областей с низким удельным сопротивлением используется понятие контактного сопротивления R_c . При транзисторном включении R_c определяется как переходным сопротивлением, так и слоевым сопротивлением полупроводниковой структуры и описывается функцией $R_c = f(\rho_c, R_c^*)$, где ρ_c – удельное сопротивление контакта, R_c^* – слоевое сопротивление гетероструктуры. Поэтому в данной работе оценка проводящих свойств областей с низким удельным

Рис. 12

Схема гетероструктуры AlGaIn/GaN с двумя возжжёнными контактами (а); цепочка последовательно включённых сопротивлений: Me; слой AlGaIn, обогащённый Al; оставшаяся часть AlGaIn; канал 2DEG (б) [5]

сопротивлением проводилась из учёта особенностей эквивалентной электрической схемы планарных контактов к гетероструктурам в транзисторном варианте. За основу была взята схема, предложенная в работе (рис. 12а) [23]. В этой работе показано, что общее сопротивление вжигаемых омических контактов, в частности, областей исток и сток, включает сумму последовательно включённых сопротивлений областей (рис. 12б): «металлической» области, представляющей собой композицию напылённых металлов и интерметаллических фаз, образовавшихся при отжиге; 2) модифицированного слоя AlGaIn, предположительно, обогащённого алюминием; 3) оставшегося слоя AlGaIn и канала двумерного газа. При этом относительное расположение «металлической» области в контакте может быть [23]: «металлическая» область проникает только в верхнюю часть барьерного слоя AlGaIn; «металлическая» область захватывает почти весь барьерный слой, но не проникает в канал 2DEG; «металлическая» область проникает в барьерный слой и область двумерного газа (over-annealing case).

В первых двух случаях чем тоньше оставшаяся часть слоя AlGaIn, тем легче электроны туннелируют в канал 2DEG. С учётом вышесказанного при формировании омических контактов особенности границы раздела между «металлической» областью контакта и оставшейся частью барьерного слоя AlGaIn могут в значительной степени определять качество контактов. Поэтому в данной работе внимание было обращено на особенности границы раздела «металлическая» область – оставшийся барьерный слой, сформировавшийся при отжиге контактов в процессе изготовления прибора.

Для исследования особенностей этой границы раздела предварительно длительным травлением кристаллов приборов в растворе HF удалялись пассивирующие слои и металлическая часть контактов, т.е. таким образом производилось как бы вскрытие поверхностей на границе «металлическая» область – модифицированный слой AlGaIn (рис. 10, поверхность «А-А'»).

Рис. 13

Вольт-амперные характеристики анализируемых HEMT при $U_g = 0$:

а) группа 1, б) группа 2

Вскрываемые таким образом поверхности анализировались сканированием зондом Кельвина в контактном режиме (см. раздел: методика исследования).

На рис. 13 даны зависимости тока стока от напряжения $U_{и-с}$ при напряжении на затворе $U_{зат} = 0$ В для анализируемых кристаллов транзисторов. Как видно из рис. 13, наблюдается значительный разброс в величине угла наклона кривых для транзисторов каждой группы, что свидетельствует о разнице в величине сопротивления цепи исток-сток анализируемых приборов.

В табл. 2 даны рассчитанные, как указывалось выше (см. «методика эксперимента»), значения удельного сопротивления R^*_d .

Проведённый анализ поверхностей на границе раздела «металлическая» область-барьерный слой областей истока и стока, вскрытых в процессе проводимых исследований (рис. 14а), показал, что:

- для большинства анализируемых кристаллов травление в растворе HF приводило практически к полному удалению «металлической» области контактных участков и вскрытию плоскости «А-А'» (рис. 10);

- величина микрорельефа «вскрытых» поверхностей областей истока и стока у разных кристаллов сильно отличается от $R_z = 10-20 \text{ \AA}$ (рис. 14в) до $R_z = 200-3000 \text{ \AA}$ (рис. 14б), при этом наиболее большой микрорельеф наблюдался по периметру областей исток и сток (рис. 14б).

Таблица 2

Сопротивление и микрорельеф областей истоков и стоков кристаллов НЕМТ

Группы	№ кри- сталла прибора	Сопротивление		Микрорельеф обла- стей истоков и стоков, Å		Плотность дислока- ций, см ⁻²
		$R_{\text{общ}}$, Ом	$R_{\text{уд}}^*$, Ом/мм	центр	край	
I	1	1.05	2.2	±15 - ±25	100 - 150	$6,8 \cdot 10^6$
	2	0.96	2.8	±5 - ±10	±25	$6 \cdot 10^5$
	3	1.1	2.3	±35 - ±40	100 - 200	-
	4	3.8 - 3.2	8.0 - 9.0	±50 - ±70	150 - 300	$8,2 \cdot 10^5$
II	5	1.05	5.6	±5 - ±10	20 - 30	$6,4 \cdot 10^6$
	6	0.65 - 0.78	-	±2.5 - ±4	10 - 20	-
	7	0.66 - 0.7	8.2	±30 - ±50	50 - 100	$9,5 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^7$
	8	1.74	19	-	200 - 300	$2 \cdot 10^5$

Рис. 14

Микрофотография (АСМ) поверхности НЕМТ (к – углубление под ножкой затвора) (а);
профили микрорельефа рабочей поверхности НЕМТ после удаления травлением
пассивирующих слоёв и «металлических» областей контактов истока и стока двух разных
кристаллов приборов (б, в)

Как правило, после длительного травления поверхность активных областей между истоком и стоком несколько выше (на 50–150 Å), чем обнажившиеся поверхности областей истока и стока (рис. 14б, ступенька «а»). Однако у ряда приборов даже длительное травление в HF не позволило удалить полностью «металлическую» область истока и стока. Из табл. 2, где приведены данные по микрорельефу поверхностей истока и стока после удаления «металлической» области контактов и результатов электрических измерений видно, что наблюдается корреляция между величиной микрорельефа вскрытых поверхностей оставшегося слоя AlGaIn и сопротивлением контактов.

Таким образом, полученные результаты позволяют утверждать, что сопротивления контактов к истоку и стоку ($R_{ис}$ и $R_{ст}$) в значительной мере определяются структурой металлических областей контакта. Это следует из установленной в работе корреляции между величинами сопротивления контактов и микрорельефом поверхностей оставшегося слоя AlGaIn на областях истока и стока, а микрорельеф, в свою очередь, определяется однородностью состава металлических композиций, образующихся после отжига. Образование островковых агломератов отмечалось практически во всех работах, посвящённых анализу металлических контактов нитридных гетероструктур. Основой агломератов, как правило, являются островки Ni-Al [25], которые обычно окружены золотом, вернее, Au-Al; это образование видно на микрофотографиях в виде светлого кольца (рис. 15). Наличие агломератов разного размера и разного состава

может приводить к различной скорости травления металлических композиций и, как следствие, к развитому рельефу поверхностей, получаемых после травления. В большинстве работ [23–24] показано, что рост отдельных наиболее крупных агломератов приводит к развитому микрорельефу из-за разной скорости травления их компонентов (Ti, Ni, Al), входящих в кольцо агломератов, в растворе HF; например, золото вообще не травится. Увеличение размера микрорельефа может происходить также из-за того, что наиболее крупные агломераты, вкраплённые в металлическую композицию, при остывании могут приводить к возникновению напряжений и, как следствие, к растрескиванию при остывании «металлической» области контактов. Об этом, например, свидетельствует анализ углубления, полученного при травлении и удалении крупного агломерата (рис. 16). Образование наиболее крупных

Рис. 16

Микрофотография агломерата после непродолжительного травления образца в HF (а);
профиль получившегося углубления в слое AlGaIn на месте этого включения после
продолжительного травления в HF (б)

агломератов обычно происходит на периферии областей истока и стока. Рост величины сопротивления с ростом размеров агломератов, по нашему мнению, связан с наличием большого количества границ фаз в металлических слоях, а также пустот, образующихся при растрескивании. К деградации контактов может приводить само наличие крупных образований интерметаллических фаз на периферии областей истока и стока.

Если «металлическая» область при наличии крупных агломератов вследствие пережога (over-annealing case) даже на отдельных участках перекрывает канал двумерного газа, может наблюдаться резкое возрастание сопротивления контакта, не говоря уже о том, что такое перекрытие может приводить к легированию канала 2DEG в этих местах и, как следствие, к снижению плотности электронов в канале и уменьшению их подвижности [25]. Локальный пережог контакта, а также нерегулируемый рост крупных агломератов

могут быть связаны с неоднородными условиями нагрева при отжиге, локальным загрязнением, локальным нарушением микрорельефа поверхности исходной гетероструктуры. Оптимальным при использовании вжигаемых металлических контактов является формирование контакта, при котором «металлическая» область «захватывает» лишь часть барьерного слоя. Оптимальное заглубление металлической части в барьерный слой 70-150 Å при толщине барьерного слоя 180-220 Å.

По-видимому, дислокации при вжигании металлических контактов могут облегчать процесс туннелирования электронов из металлической части контактов в канал двумерного газа, например, за счёт наличия свободных связей в дислокации, однако при отжигах по дислокациям может происходить и диффузия металлов в объём эпитаксиальных слоёв. Корреляции между величинами сопротивления контактов и плотностью дислокаций, как видно из табл. 2, не наблюдается, а рост плотности

дислокаций, как правило, приводит к росту токов утечки по буферу (табл. 3), поскольку большинство дислокаций, даже винтовых, практически пронизывают весь эпитаксиальный слой, зарождаясь на начальной стадии роста эпитаксиальных слоёв. Эти результаты подтверждают данные, полученные в работе [26], где показана роль дислокаций, приводящая к деградации приборов.

Таким образом, из вышесказанного следует, что технология вжигаемых металлических контактов при изготовлении Al-GaN/GaN HEMT требует жесткого соблюдения всех параметров технологического процесса их изготовления, при этом желательно по возможности снижать температуру отжига и контролировать равномерность температурных режимов по всей площади гетероструктуры во избежание неуправляемого роста агломератов в металлических областях контактов. В настоящее время наблюдается переход на техно-

логию создания омических контактов методом формирования сильнолегированных слоёв в процессе эпитаксиального роста гетероструктур с дальнейшим вскрытием активных областей.

Обобщение полученных результатов

Анализ большого количества литературных источников, а также проведённые структурные исследования и электрические измерения готовых кристаллов HEMT позволяют количественно оценить влияние ряда параметрических дефектов на параметры реальных приборов. В частности, результаты проведённых ёмкостных измерений C-V характеристик с помощью выбранных двух электрических схем (рис. 9) позволяют количественно определить, как величины паразитных ёмкостей и сопротивлений в цепи затвор-исток и затвор-сток влияют на частотные характеристики HEMT. В табл. 3 даны экспериментальные величины ёмкостей и сопротивлений

Таблица 3

Ёмкостные параметры областей затвор-исток и затвор-сток и частотные параметры анализируемых кристаллов HEMT

Группы	№ кристаллов	Cs		R _{з-с}	gm	Проводимость x10 ⁻⁶	f _t	f _{рабочая}
		C _{з-с}	C _{з-и}					
		пФ		Ом	мСм	См	ГГц	ГГц
I	1	9,8	9,8	1,05	400	0,6	27 - 29	10 - 12
	2	22	-	0,9	-	-	-	-
	3	13,9	14,1	1,1	270	0,96	32 - 35	8
	4	11,3	11,4	3,2 - 3,8	350	6,5	22	10 - 12
II	5	-	-	1,05	-	-	-	-
	6	74	74	0,68	1100	7	22	2,5 - 3
	7	87	82	0,66	1200	3,6	17	3,5 - 4
	8	40	40	1,74	470	-	-	2 - 3

анализируемых кристаллов приборов и частотные параметры – f_t и коэффициент усиления, рассчитанные с помощью уравнения (1) для анализируемых НЕМТ. Как следует из табл. 3, только приборы 2-й группы с длиной затвора 0,4-0,48 мкм могут стабильно обеспечить указанные в паспорте рабочие частоты; также видно, что большое сопротивление омических контактов истока и стока снижает предельную частоту прибора (например, кристалл № 4 по сравнению с кристаллами № 1, 3).

Измерение вольт-амперных характеристик анализируемых приборов, токов утечки с последующими структурными исследованиями активных и контактных областей приборов, а также оценка плотности дислокаций в эпитаксиальных слоях гетероструктур позволяют количественно оценить влияние структурных особенностей материала. Из табл. 4 видно, что высокая плотность дислокаций, а также наличие дефектов в активных областях кристаллов приводят к росту токов утечки и снижению пробивных напряжений

прибора (кристаллы № 3, 7, 8). Анализ изменения величин ёмкостей C_s и паразитных сопротивлений R_s в области глубокого обеднения позволяет оценить изолирующие свойства буферных слоёв GaN гетероструктур в реальных приборах и их влияние на токи утечки и пробивные напряжения реальных НЕМТ. В частности, данные табл. 4 показывают, как более низкие изолирующие свойства буферного слоя гетероструктур приводят к снижению пробивных напряжений НЕМТ (приборы № 2 и 3 по сравнению с аналогичными № 1 и 4). Расположение металлизированных отверстий в активных областях приборов (приборы № 2 и 6) уменьшает пробивные напряжения и увеличивает токи утечки.

Выводы

В работе показано, что:

1. При формировании мощных СВЧ НЕМТ необходим контроль при C-V измерениях цепей затвор-исток и затвор-сток

Таблица 4

Плотность дислокации в GaN и вольт-амперные характеристики анализируемых кристаллов НЕМТ

Группы	№ кристалла	$N_{\text{дис}}$ см ⁻²	R_s в обеднении Ом	Токи утечки з - с х10 ⁻⁷ , А	U пробоя В
I	1	6,8·10 ⁶	-	8	120-150
	2	6·10 ⁵	-	800	-
	3	5·10 ⁷	5·10 ⁴	1200	80
	4	8,2·10 ⁶	0	10	120-100
II	5	6,4·10 ⁶	-	7000-10000	-
	6	-	546	200	800-100
	7	9,5·10 ⁷	438	96-180	150
	8	2·10 ⁵	725	850	40

величин ёмкости и сопротивления в сильном обеднении ($U_{изм} \gg |U_{отс}|$) для оценки изолирующих свойств буферных слоёв GaN гетероструктур, поскольку высокие изолирующие свойства GaN в значительной степени определяют самую возможность формирования на них мощных НЕМТ. Высокая плотность дислокаций

($> 10^9$ - 10^{10} см⁻²) приводит к резкому увеличению токов утечки.

2. Конструкция мощных СВЧ НЕМТ с расположением в активной области приборов металлизированных отверстий вывода контактов к истоку на обратную сторону кристалла может приводить к снижению величины пробивных напряжений и к увеличению токов утечки приборов.

3. Невоспроизводимость структуры металлических контактов из-за неуправляемого роста агломератов в «металлических» областях контактов может привести к резкому росту удельного сопротивления контактов.

Литература

1. Федоров, Ю.В. Нитридные НЕМТ против арсенидных: последняя битва? / Ю.В. Федоров, С.В. Михайлович // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2015. – Т 18. – № 1. – С. 16-22.
2. Augustine Fletcher A.S., Nirmal D. A survey of Gallium Nitride HEMT for RF and high power applications. Superlattices and Microstructures, 2017, vol.109 pp.519-537. DOI: 10.1016/j.spmi.2017.05.042
3. Wang F., Yang A.H., Kimball D.F., Larson E.L., Asbeck P.M. Design of wide-bandwidth envelope-tracking power amplifiers for OFD applications. IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques, 2005, vol. 53, no. 4, pp. 1244-1255.
4. Куэй, Р. Электроника на основе нитрида галлия / Р. Куэй: [перевод с англ. Ю.А.Концевого, Е.А. Митрофанова]; под редакцией А.Г. Васильева. – Москва: Техносфера, 2011. – 592 с.
5. Dora Y., Chakraborty A., Heikman S., McCarthy L., Keller S., DenBaars S.P., Mishra U.K. Effect of ohmic contacts on buffer leakage of GaN transistors. IEEE Electron Device Letters, 2006, vol. 27, no. 7, pp. 529-531.
6. Morkoc Hadis Handbook of nitride semiconductors and devices. Volume 1: Materials properties, physics and growth. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007, 1311 p.
7. Енишерлова, К.Л. Влияние качества подложек SiC на структурное совершенство и некоторые электрические параметры плёнок AlGaIn/GaN / К.Л. Енишерлова, Т.Ф. Русак, В.И. Корнеев, А.Н. Зазулина // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2015. – Т. 18. – № 3. – С. 221-227.
8. Liliental-Weber Z., Roberto dos Reis, Weyher Jan L., Staszczak Grzegorz The importance of structural inhomogeneity in GaN thin films. Journal of Crystal Growth, 2016, vol. 456, no.15, pp. 160-167. DOI:org/10.1016/j.jcrysgro.2016.08.059
9. Андреев, А.А. Изучение влияния дефектов в зародышевых слоях AlGaIn

- на утечки в гетероструктурах для транзисторов с высокой подвижностью электронов / А.А. Андреев, Ю.В. Грищенко, И.С. Езубченко и др. // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – № 1. – С. 1-14.
10. Agrawal Manmohan, Singh Shreyash Pratap, Chaturvedi Nidhi Concept of buffer doping and back barrier in GaN HEMT. International Conference and Nanotechnology -2015. International Journal of ChemTech Research, 2014-2015, vol.7, no.2, pp 921-927.
 11. Kim Dong-Seok , Won Chul-Ho, Kang Hee-Sung, Kim Young-Jo, Kim Yong Tae, Kang In Man, Lee Jung-Yee. Growth and characterization of semi-insulating carbon-doped / undoped GaN multiple-layer buffer. Semiconductor Science and Technology, 2015, vol. 30, no. 3, pp. 1-6.
 12. Bergsten X. Li., Nilsson D., Danielsson O. et al. Carbon doped GaN buffer layer using propane for high electron mobility transistor applications: Grown and device results. Applied Physics Letters, 2015, vol. 107, no.26, pp. 26105-15.
 13. Rusak T.F., Enisherlova K.L., Lutzau A.V., Saraykin V.V., Korneev V.I. Dislocation structure of epitaxial layers of Al-GaN/GaN/ α -Al₂O₃ heterostructures containing a GaN layer doped with carbon and iron. Russian Microelectronics, 2018, vol. 47, no. 5, pp. 598-607.
 14. Zhu Xueliang, Ma Jun, Huang Tongde, Ming Li, Ka Ming. Improved surface morphology and mobility of AlGaIn/GaN HEMT grown on silicon substrate. Physica Status Solidi, 2012, vol.(c)9, no.3-4, pp.473-475.
 15. Corekci S., Usanmaz D., Tekeli Z., Cakmak M., Yu H.B., Ozcelik S., Ozbay E. Surface morphology of Al_{0.3}Ga_{0.7}N/Al₂O₃-high electron mobility transistor structure. Journal of Nanoscience, Nanotechnology, 2008, vol.8, no.2, pp.640-4.
 16. Енишерлова, К.Л. Исследование гетероструктур AlGaIn/GaN методом резерфордского обратного рассеяния / К.Л. Енишерлова, В.С. Куликаускас, В.В. Затекин и др. / Поверхность. – 2011. – № 7. – С. 20-29.
 17. Cucak D., Vasic M., Garcia O., et al. Physical modeling and optimization of a GaN HEMT design with a field plate structure for high frequency application. Conference: IEEE Energy conversion congress and exposition, 14-18 Sept. 2014. DOI: 10.1109/ECCE.2014.6953786
 18. Drangeid K.E., Sommerhalder R. Dynamic performance of Schottky-barrier field-effect transistors. IBM Journal Research and Development, 1970, vol.14, no.2, pp.82-94. DOI:10.1147/rd.1420082
 19. Зи, С.М. Физика полупроводниковых приборов: в 2-х книгах / С.М. Зи – Москва: Энергия, 1973.
 20. Vogel R. Determination of the MESFET resistive parameters using RF-wafer probing. 17th European Microwave Conference, 1987, pp. 616-621. DOI: 10.1109/EUMA.1987.333673
 21. Груздов, В.В. Сравнительный анализ AlGaIn/GaN/ СВЧ транзисторов / В.В. Груздов, К.Л. Енишерлова, Ю.В. Колковский // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2017. – № 2 (245). – С.6-13.
 22. Greco G., Ferdinando F., Roccaforte F. Ohmic contacts to Gallium Nitride

- materials. Applied Surface Science, 2016, vol.383, pp.324-345.
23. Klein B.A., Baca A.G., Armstrong A.M., Allerman A.A., Sanchez C.A., et.al. Planar Ohmic Contacts to Al_{0.45}Ga_{0.55}N/Al_{0.3}Ga_{0.7}N High Electron Mobility Transistors. Journal of Solid State Science and Technology, 2017, vol.6, no.11, S3067-0S3071.
24. Кондаков, М.Н. Влияние режимов отжига на электрические параметры, морфологию и микроструктуру омических контактов на основе Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам AlGaIn/GaN / М.Н. Кондаков, С.В. Черных, А.В. Черных и др. // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2018. – № 2 (249). – С. 40-47.
25. Kefeng Han. Employing hole-array recess of barrier layer of AlGaIn/GaN heterostructures to reduce annealing temperature of ohmic contact. Semiconductor Science and Technology, 2017, vol.32, no.10, 105010 p.
26. Fabio Alessio Marino, Nicolas Faralli, et.al. Effects of threading dislocations on AlGaIn/GaN high-electron mobility transistors. IEEE Transactions on Electron Devices, 2010, vol.57, no.1, 2010, pp.353-360. DOI: 10.1109/TED.2009.2035024
2. Augustine Fletcher A.S., Nirmal D. A survey of Gallium Nitride HEMT for RF and high power applications. Superlattices and Microstructures, 2017, vol.109 pp.519-537. DOI: 10.1016/j.spmi.2017.05.042
3. Wang F., Yang A.H., Kimball D.F., Larson E.L., Asbeck P.M. Design of wide-bandwidth envelope -tracking power amplifiers for OFD applications. IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques, 2005, vol. 53, no. 4, pp. 1244-1255.
4. Quay R. Elektronika na osnove nitride galliya [Gallium nitride electronics]. Moscow, Tekhnosfera, 2011, 592 p.
5. Dora Y., Chakraborty A., Heikman S., McCarthy L., Keller S., DenBaars S.P., Mishra U.K. Effect of ohmic contacts on buffer leakage of GaN transistors. IEEE Electron Device Letters, 2006, vol. 27, no. 7, pp. 529-531.
6. Morkoc Hadis Handbook of nitride semiconductors and devices. Volume 1: Materials properties, physics and growth. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007, 1311 p.
7. Enisherlova K.L., Rusak T.F., Korneev V.I., Zazulina A.N. Vliyaniye kachestva podlozhek SiC na strukturnoye sovershenstvo i nekotorye elektricheskie parametry plyonok AlGaIn/GaN [Influence of the quality of SiC substrates on the structural perfection and several electrical parameters of AlGaIn/GaN films]. Izvestiya vyshikh uchebnykh zavedeniy. Materialy elektronnoy tekhniki, 2015, vol.18, no.3, pp.221-227.
8. Liliental-Weber Z., Roberto dos Reis, Weyher Jan L., Staszczak Grzegorz The

References

1. Fedorov Yu.V. Mikhaylovich S.V., Nitridniye HEMT protiv arsenidnykh: poslednaya bitva? [Nitride-based HEMT against the arsenide-based: final battle?]. Izvestiya vyshikh uchebnykh zavedeniy. Materialy elektronnoy tekhniki, 2015, vol.18, no.1, pp.16-22.

- importance of structural inhomogeneity in GaN thin films. *Journal of Crystal Growth*, 2016, vol. 456, no.15, pp. 160-167. DOI: [org/10.1016/j.jcrysgro.2016.08.059](https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.08.059)
9. Andreev A.A., Grishchenkov Yu.V., Ezubchenko I.S. et al. Izucheniye vliyaniya defektov v zarodyshevykh sloyakh AlGaIn na utechki v geterostrukturakh dlya tranzistorov s vysokoi podvizhnost'yu elektronov [Study on the influence of the defects in AlGaIn nucleation layers on the leakage in heterostructures of high electron mobility transistors]. *Zhurnal radioelektroniki*, 2015, no.1, pp.1-14.
 10. Agrawal Manmohan, Singh Shreyash Pratap, Chaturvedi Nidhi Concept of buffer doping and back barrier in GaN HEMT. *International Conference and Nanotechnology-2015. International Journal of ChemTech Research*, 2014-2015, vol.7, no.2, pp 921-927.
 11. Kim Dong-Seok, Won Chul-Ho, Kang Hee-Sung, Kim Young-Jo, Kim Yong Tae, Kang In Man, Lee Jung-Yee. Growth and characterization of semi-insulating carbon-doped/ undoped GaN multiple-layer buffer. *Semiconductor Science and Technology*, 2015, vol.30, no.3, pp. 1-6.
 12. Bergsten X. Li., Nilsson D., Danielsson O. et al. Carbon doped GaN buffer layer using propane for high electron mobility transistor applications: Grown and device results. *Applied Physics Letters*, 2015, vol.107, no.26, pp.26105-15.
 13. Rusak T.F., Enisherlova K.L., Lutzau A.V., Saraykin V.V., Korneev V.I. Dislocation structure of epitaxial layers of AlGaIn/GaN/ α -Al₂O₃ heterostructures containing a GaN layer doped with carbon and iron. *Russian Microelectronics*, 2018, vol.47, no.5, pp.598-607.
 14. Zhu Xueliang, Ma Jun, Huang Tongde, Ming Li, Ka Ming. Improved surface morphology and mobility of AlGaIn/GaN HEMT grown on silicon substrate. *Physica Status Solidi*, 2012, vol.(c)9, no.3-4, pp.473-475.
 15. Corekci S., Usanmaz D., Tekeli Z., Cakmak M., Yu H.B., Ozcelik S., Ozbay E. Surface morphology of Al_{0.3}Ga_{0.7}N/Al₂O₃-high electron mobility transistor structure. *Journal of Nanoscience, Nanotechnology*, 2008, vol.8, no.2, pp.640-4.
 16. Enisherlova K.L., Kulikauskas V.S., Zatekin V.V. et al. Issledovaniye geterostruktur AlGaIn/GaN metodom rezerfordovskogo obratnogo rasseyaniya [Investigation of AlGaIn/GaN heterostructures with Rutherford backscattering]. *Poverkhnost'*, 2011, no.7, pp.20-29.
 17. Cucak D., Vasic M., Garcia O., et al. Physical modeling and optimization of a GaN HEMT design with a field plate structure for high frequency application. *IEEE Energy conversion congress and exposition*, 2014. DOI: [10.1109/ECCE.2014.6953786](https://doi.org/10.1109/ECCE.2014.6953786)
 18. Drangeid K.E., Sommerhalder R. Dynamic performance of Schottky-barrier field-effect transistors. *IBM Journal Research and Development*, 1970, vol.14, no.2, pp.82-94. DOI: [10.1147/rd.1420082](https://doi.org/10.1147/rd.1420082)
 19. Zi S.M., Fizika poluprovodnikovykh priborov [Physics of semiconductor devices]. Moscow, Energiya, 1973.

20. Vogel R. Determination of the MESFET resistive parameters using RF-wafer probing. *17th European Microwave Conference*, 1987, pp. 616-621. DOI: 10.1109/EUMA.1987.333673
21. Gruzlov V.V., Enisherlova K.L., Kolkovskiy Yu.V. Sravnitel'niy analiz Al-GaN/GaN SVCH tranzistorov [Comparative analysis of microwave AlGaIn/GaN transistors]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2017, no.2(245), pp.6-13.
22. Greco G., Ferdinando F., Roccaforte F. Ohmic contacts to Gallium Nitride materials. *Applied Surface Science*, 2016, vol.383, pp.324-345.
23. Klein B.A., Baca A.G., Armstrong A.M., Allerman A.A., Sanchez C.A., et.al. Planar Ohmic Contacts to Al_{0.45}Ga_{0.55}N/Al_{0.3}Ga_{0.7}N High Electron Mobility Transistors. *Journal of Solid State Science and Technology*, 2017, vol.6, no.11, S3067-0S3071.
24. Kondakov M.N., Chernykh S.V., Chernykh A.V., et al. Vliyaniye rezhimov otzhiga na elektricheskiye parametry, morfologiyu i mikrostrukturu omicheskikh kontaktov na osnove Mo/Al/Mo/Au k geterostrukturam Al-GaN/GaN [Effect of annealing conditions on electrical properties, surface morphology and microstructure of Mo/Al/Mo/Au ohmic contacts on AlGaIn/GaN heterostructures]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2018, no.2(249), pp.40-47.
25. Kefeng Han. Employing hole-array recess of barrier layer of AlGaIn/GaN heterostructures to reduce annealing temperature of ohmic contact. *Semiconductor Science and Technology*, 2017, vol.32, no.10, 105010 p.
26. Fabio Alessio Marino, Nicolas Faralli, et.al. Effects of threading dislocations on AlGaIn/GaN high-electron mobility transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2010, vol.57, no.1, 2010, pp.353-360. DOI: 10.1109/TED.2009.2035024