

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

УДК 621.315.592:621.382

DOI: 10.17587/nmst.19.273-293

Ю. В. Федоров, гл. констр., зам. директора, **А. С. Бугаев**, гл. технолог, зам. директора, **А. Ю. Павлов**, канд. техн. наук, зав. лаб., e-mail: p.alex.ur@yandex.ru, **Д. Л. Гнатюк**, канд. техн. наук, зав. лаб., **О. С. Матвеев**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., **В. Ю. Павлов**, мл. науч. сотр., **Д. Н. Слаповский**, мл. науч. сотр., **К. Н. Томош**, мл. науч. сотр., **Е. Н. Енюшкина**, гл. спец., **Р. Р. Галиев**, науч. сотр., **М. В. Майтама**, мл. науч. сотр., **А. В. Зуев**, науч. сотр., **Д. В. Крапунин**, мл. науч. сотр., **С. А. Гамкрелидзе**, д-р техн. наук, директор, Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И РАЗРАБОТКА МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

Поступила в редакцию 14.11.2016

Представлена технология изготовления монолитных интегральных схем на основе нитрида галлия, включающая такие основные этапы изготовления, как формирование приборной мезаизоляции; формирование невыпрямляющего (омического) контакта к гетероструктуре, операции которых обеспечивают формирование резисторов, нижних обкладок конденсаторов, индуктивностей; формирование выпрямляющего контакта (затвора Шоттки) к гетероструктуре; пассивация затвора, формирование конденсаторного диэлектрика; формирование первого уровня металлизации и верхних обкладок конденсаторов; формирование межэлектрических соединений в виде "воздушных мостов"; формирование межэлектрических соединений, обеспечивающих общую землю; шлифовка пластины; резка пластины на кристаллы; отбраковка; посадка кристаллов на теплоотвод. По данной технологии в Институте сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН были разработаны и изготовлены монолитные интегральные схемы сантиметрового и миллиметрового частотных диапазонов, соответствующие мировому техническому уровню в данной области техники.

Ключевые слова: нитрид галлия, монолитная интегральная схема, усилитель мощности, малошумящий усилитель, технология, технологический маршрут, технологическая операция, полевой транзистор, омические контакты, затвор Шоттки, межэлектрические соединения

Введение

При разработке современных устройств коммерческого и военного назначения постоянно ужесточаются требования, предъявляемые к их эффективности и экономичности. Данная тенденция обусловлена многими факторами, варьирующимися от проблем с обеспечением необходимого теплового режима до требований к энергопотреблению всей системы в целом. В этих условиях применение высокоэффективных сверхвысокочастотных монолитных интегральных схем (СВЧ МИС) позволяет не только понизить массу аппаратуры по сравнению с системами, использующими волноводы, но и повысить стойкость системы к вибрации, а также упростить ее настройку (за счет применения большого числа однотипных дискретных усилителей) [1].

Сантиметровый и миллиметровый диапазоны длин волн представляют большой интерес с точки зрения многофункциональных приложений. Сюда можно отнести: высокопроизводительные каналы точка-точка с пропускной способностью 140/155 Мбит/с; магистральные соединения с частотами 7,9...8,4 ГГц; системы радаров, включая РЛС с синтезированной апертурой, антенные решетки с электронным сканированием и активные фазированные антенные решетки (АФАР); аппаратуру систем и комплексов навигации и связи; симуляторы и оборудование для тестирования.

На основании проведенного анализа современного состояния разработок МИС для сантиметрового и миллиметрового частотных диапазонов за рубежом и опыта работ ИСВЧПЭ РАН, полученного в ходе выполнения ряда НИР в предыдущие

годы [2—5], был сделан вывод о необходимости проведения исследований по оптимизации ряда технологических операций изготовления транзисторов и схем на их основе. При разработке МИС сантиметровой и миллиметровой частотных диапазонов планировалось внедрить технологию невжигаемых омических контактов, оптимизировать профиль затвора Шоттки и обеспечить общую землю с лицевой стороны кристалла, что на нитриде галлия в России еще не было реализовано при изготовлении СВЧ МИС.

Для изготовления экспериментальных образцов МИС использовались отечественные AlGaIn/AlN/GaN НЕМТ-гетероструктуры на подложках сапфира и карбида кремния производства ЗАО "Элма-Малахит".

При изготовлении МИС в едином технологическом цикле формируются как пассивные, так и активные элементы схемы, обеспечивающие реализацию проекта МИС для необходимого частотного диапазона. При изготовлении приборов составляется технологический маршрут изделия, состоящий из последовательно выполняемых технологических операций. При этом ряд технологических операций можно объединить в группу операций, отвечающую за выполнение этапа формирования части будущего прибора.

В процессе изготовления МИС на основе нитрида галлия необходимо выполнение следующих основных этапов: формирование приборной мезаизоляции; формирование невыпрямляющего (омического) контакта к гетероструктуре, при которой обеспечивается формирование резисторов, нижних обкладок конденсаторов, индуктивностей; формирование выпрямляющего контакта (затвора Шоттки) к гетероструктуре; пассивация затвора, формирование конденсаторного диэлектрика; формирование первого уровня металлизации и верхних обкладок конденсаторов; формирование межэлектрических соединений в виде "воздушных мостов"; формирование межэлектрических соединений, обеспечивающих общую землю; шлифовка пластины; резка пластины на кристаллы; отбраковка; посадка кристаллов на теплоотвод. Последовательное выполнение всех основных этапов является необходимым условием получения работоспособной МИС.

Рассмотрим особенности и назначение каждого из основных этапов маршрута изготовления МИС на основе нитрида галлия для сантиметровой и миллиметровой диапазонов частот. При этом оптимизация этапов формирования омических контактов и пассивации позволит уменьшить влияние паразитных сопротивлений и емкостей на частотные характеристики будущей МИС [6]. Этап формирования контакта Шоттки отвечает за частотные характеристики СВЧ транзисторов и МИС на их основе [5].

Формирование приборной мезаизоляции МИС на основе нитрида галлия

Под формированием мезы подразумевают создание структуры на гетероэпитаксиальной пластине с проводящими (активными) и непроводящими слоями с помощью травления поверхности гетероструктуры. Цель операции — отделение активных областей, на которых формируются приборы, друг от друга, чтобы избежать электрического контакта между приборами и элементами будущей схемы.

Как правило, для формирования изоляции в виде мезаструктуры используют две группы методов: так называемые жидкие и сухие. Для реализации этапа необходимо выполнение следующих технологических операций: фотолитография рисунка мезы, травление полупроводника, удаление фоторезистивной маски, контроль глубины травления полупроводника.

"Жидкие" методы предполагают использование жидкостных растворов для химического травления незащищенных фоторезистом участков полупроводника. Эти методы являются простыми в реализации и не требуют сложного технологического оборудования. Но при работе с гетероструктурами AlGaIn/GaN "жидкий" метод не получил распространения, так как из-за сильной химической связи в GaN тяжело подобрать растворы, позволяющие химически протравить полупроводник. Сообщается о фотостимулированном электрохимическом травлении GaN, но данный метод сильно зависит от многих параметров и является плохо воспроизводимым [7]. По этой причине распространение получили "сухие" методы. Нами используется метод плазмохимического травления в индуктивно-связанной плазме (ИСП) гетероструктуры AlGaIn/GaN. ИСП позволяет получать большую плотность ионов в процессе травления, что дает возможность увеличивать скорость травления при малых значениях энергии. При травлении гетеропары AlGaIn/GaN используют в основном смесь Cl_2 с BCl_3 и Ar. Данная комбинация позволяет получать достаточно большие скорости травления.

При изготовлении полевых транзисторов на гетероструктурах на основе GaN типичная глубина приборной мезаизоляции составляет 20,0...30,0 нм. Используемые полупроводники — AlGaIn и GaN, а также подложки для их эпитаксиального роста Al_2O_3 и SiC — материалы, прозрачные в видимом диапазоне. При указанной типичной глубине мезы последующий этап контактной фотолитографии омических контактов затруднен из-за сложности совмещения фотошаблона со сформированным топологическим рисунком изоляции на пластине. В связи с этим было решено формировать при-

борную мезаизоляция большей глубины (около 80,0 нм). При этом не требуется высоких скоростей травления, достаточно 20,0...30,0 нм/мин. Такая скорость была достигнута на имеющейся установке плазмохимического травления SI 500 с использованием среды $\text{BCl}_3 + \text{Ar}$. В данной смеси BCl_3 используется как химически активная среда, а Ar введен для поддержания разряда в камере и частичного участия в процессе травления. При плазмохимическом травлении использовалась фоторезистивная маска, что накладывает дополнительные требования к процессу: необходимость отведения теплоты от всей площади полупроводниковой пластины во избежание перегрева фоторезиста, который приводит к изменению геометрии маски и к последующим трудностям при ее снятии. Установка предусматривает систему охлаждения в виде обдува обратной стороны потоком гелия, но этого оказалось недостаточно для компенсации перегрева, возникающего при длительных процессах. Для отвода теплоты было решено разбивать процесс травления на последовательные ступени с перерывом в травлении.

В итоге среда BCl_3 (30 sccm) + Ar (50 sccm), давление в камере 8 Па, смещение на нижнем электроде 170 В обеспечили в совокупности скорость травления порядка 25,0 нм/мин. При травлении процесс разбивается на циклы "30 с травление — перерыв 1 мин". Число циклов выбирается в зависимости от глубины мезы. Так как используемые гетероструктуры не имеют защитного слоя, то перед запуском гетероструктура покрывается тонким слоем Si_3N_4 , играющего роль защитного слоя барьера структуры. Поэтому перед травлением приборной изоляции в окнах травления гетероструктуры тонкий диэлектрик удаляется во фторсодержащей плазме в той же установке плазмохимического травления.

Таким образом, для формирования приборной мезаизоляции для гетероструктур $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ выполняются следующие технологические опера-

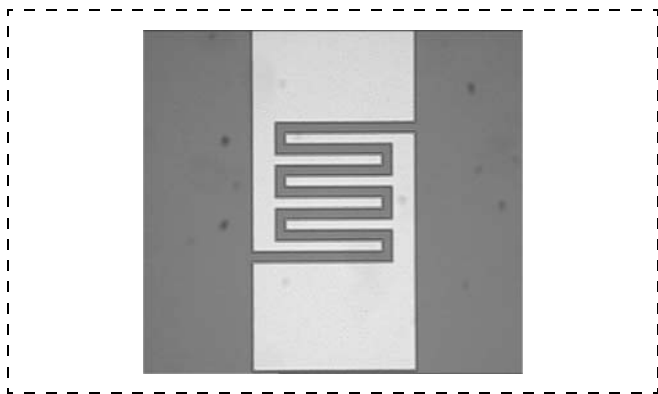


Рис. 1. Тест для проверки приборной мезаизоляции
Fig. 1. Device mesa isolation testing

ции: фотолитография окон травления полупроводника, удаление тонкого диэлектрика плазмохимическим травлением, плазмохимическое травление полупроводника, снятие фоторезистивной маски и контроль глубины травления полупроводника.

Электрический контроль приборной мезаизоляции на вытравленных участках осуществляется на специальном тесте для проверки изоляции (внешний вид теста приведен на рис. 1) после формирования омических контактов к гетероструктуре. Для данного теста снимается зависимость тока утечки от напряжения.

Формирование омических контактов к гетероструктурам на основе нитрида галлия

Этап формирования омических контактов полевого СВЧ транзистора должен обеспечивать минимальное контактное сопротивление к гетероструктуре и обеспечивать технологичность последующих операций. С ростом ширины запрещенной зоны гетероструктуры (E_g) сопротивление контакта возрастает. Для создания омического контакта к $n\text{-GaIn}$ чаще всего используют многокомпонентные контакты на основе Ti , образующие в процессе термообработки соединения с низкой работой выхода. Низкое сопротивление омического контакта металл — GaIn обычно связывают с образованием вакансий азота за счет взаимодействия GaIn с материалом контакта, например Ti . Использование многокомпонентных контактов на основе Ti/Al с последующей термообработкой обеспечивает удельное контактное сопротивление порядка 0,5...0,6 Ом · мм к $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, при этом высокотемпературный отжиг омических контактов до температур 750...900 °С приводит к изменению рельефа и края контактной металлизации.

Получение низких контактных сопротивлений без высокотемпературной обработки и сохранение рельефа возможно при формировании омического контакта к сильнолегированному GaIn .

Таким образом, методы формирования омических контактов к гетероструктурам $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ можно разделить на два типа технологий: вжигаемая (сплавная) и невжигаемая (несплавная) технологии формирования омических контактов [8].

Для изготовления СВЧ МИС на основе нитрида галлия использовалась невжигаемая технология формирования контактов. Но также в ИСВЧПЭ отработана вжигаемая технология омических контактов к нитридным гетероструктурам на основе Si/Al как альтернативный вариант при отсутствии необходимого оборудования для формирования невжигаемых омических контактов [9, 10].

Опишем каждую из технологий формирования омических контактов при изготовлении МИС на основе нитрида галлия.

Вжигаемые (сплавные) омические контакты на основе Si/Al к нитриду галлия. Контакт металл — полупроводник, формируемый с использованием высокотемпературного быстрого термического отжига (БТО), получил название "вжигаемый омический контакт" и нашел широкое применение в первых работах по полевым СВЧ транзисторам на гетероструктурах AlGaN/GaN.

Можно выделить две основные стадии формирования вжигаемого контакта к гетероструктуре AlGaN/GaN:

- подбор системы металлизации омического контакта к гетероструктуре AlGaN/GaN;
- подбор термической обработки — подбор температуры, времени отжига, а также кривой нагрева. Отжиг проводят в инертной среде.

Классические системы металлизации на основе Ti/Al являются одними из самых широко используемых во вжигаемых омических контактах к нитридным гетероструктурам AlGaN/GaN. Образование соединений TiN и AlN приводит к созданию азотных вакансий в полупроводнике у границы контакта, однако требует при этом высоких температур термообработки (более 800 °С). Более того, соединение TiN обладает малой работой выхода, что приводит к уменьшению сопротивления омического контакта. Однако склонность к окислению Ti и Al требует использования антикоррозионного слоя Au. Более того, соединения Al с Au имеют тенденцию образовываться на границе контакта, увеличивая, таким образом, значение контактного сопротивления и ухудшая морфологию после отжига. В связи с этим появляется необходимость использования барьерного слоя, препятствующего диффузии Al в направлении верхнего слоя Au и легко диффундирующего Au в сторону полупроводника. Было продемонстрировано, что барьерные слои этих металлов при высоких температурах разбиваются на отдельные небольшие фракции, создавая, таким образом, щели для диффузии металлов сквозь барьерный слой [11].

В целях улучшения морфологии была снижена температура термообработки омических контактов до 675...725 °С, при этом сохранилось низкое значение сопротивления контактов. Для формирования омических контактов с низким значением удельного контактного сопротивления в традиционной системе металлизации омических контактов Ti/Al/Ni/Au проводят температурный отжиг при температурах выше 800 °С, при которых образуется необходимая толщина TiN [12]. Для уменьшения температуры отжига и значения контактного сопротивления в эту систему металлизации вводят перед первым слоем Ti тонкий слой Si, играющий роль легирующей примеси [13]. Наличие контактного слоя Si в композиции на основе Si/Ti/Al при температурах отжига ниже 700 °С приводит к об-

разованию соединений $TiSi_x$ без образования TiN [14]. Таким образом, слой Ti был исключен из состава металлизации, поскольку поменялась его роль — взамен образования азотных вакансий идет уменьшение концентрации примесных атомов Si в композиции.

Таким образом, для формирования вжигаемых омических контактов необходимо выполнение следующих технологических операций. После травления приборной мезаизоляции на гетероструктуру AlGaN/GaN через двухслойную систему наносится контактная композиция вжигаемой металлизации омических контактов термическим (резистивным) методом в вакууме состава Si (7,5 нм) — Al (50 нм) — Ti (25 нм) — Au (50 нм). Перед осаждением металлизации проводится снятие оксидов в растворе HCl:H₂O. Потом осуществляется термическая обработка данной металлизации в среде азота. Затем формируется слой металлизации поверх омических контактов и на других участках гетероструктуры для создания топологических элементов схемы и меток для электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ) затворов Шоттки. Металлизация Ti/Au осаждается термическим (резистивным) методом в вакууме по двухслойной системе фоторезистов.

Использование вжигаемой композиции на основе Si/Al позволило улучшить морфологию омических контактов, получить значения удельного контактного сопротивления, не уступающие значениям, получаемым с использованием композиций на основе Ti/Al, которое составило 0,35 Ом·мм. При этом данный состав омических контактов обеспечивает незначительные изменения значений удельного контактного сопротивления в широком диапазоне температур отжига, что повышает технологичность и воспроизводимость процесса термообработки омических контактов по сравнению с композициями на основе Ti/Al [9, 10].

Невжигаемые (несплавные) омические контакты к нитриду галлия. На сегодняшний день наиболее распространенная технология несплавных омических контактов к гетероструктурам AlGaN/GaN — технология эпитаксиально доращиваемого сильнолегированного GaN в окнах под омические контакты через предварительно сформированную маску [15]. Суть метода заключается в формировании диэлектрической маски на гетероструктуре, затем в формировании в диэлектрике окон под омические контакты, эпитаксиальном росте n^+ -GaN, удалении диэлектрической маски и напылении металлизации контакта на n^+ -GaN. В некоторых вариантах перед эпитаксиальным ростом плазмохимически через диэлектрическую маску заглубляются до уровня двумерного электронного газа (2DEG). Схематически формирование невжигаемых оми-

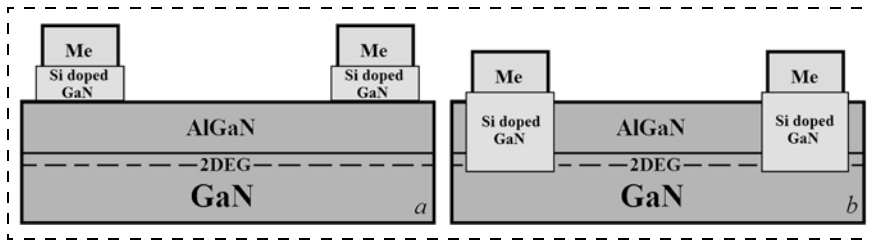


Рис. 2. Схематическое изображение использования доращиваемого сильнолегированного GaN при формировании нежвигаемых омических контактов к AlGaIn/GaN: *a* — без заглабления до уровня 2DEG, *b* — с заглаблением до уровня 2DEG

Fig. 2. Regrown highly doped GaN use in non-alloyed ohmic contacts to AlGaIn/GaN fabrication: *a*) without penetration down to 2DEG level, *b*) with penetration down to 2DEG level

ческих контактов с доращиваемым n^+ -GaIn показано на рис. 2.

Благодаря введению примеси Si происходит вырождение полупроводящего GaIn, который должен находиться в непосредственном контакте с областью двумерного электронного газа (2DEG). Легирование нитрида галлия проводится в процессе осаждения с помощью установленного в ростовой камере молекулярного источника кремния. Важно подобрать верную концентрацию легирующей примеси в осаждаемом нитриде галлия. С одной стороны, увеличение концентрации Si, который выступает в роли донорной примеси, позволяет повысить концентрацию электронов и понизить сопротивление контакта. С другой стороны, при чрезмерном повышении концентрации Si проводимость контакта начинает падать, а кремний перестает равномерно растворяться в объеме GaIn и образует дополнительные дефекты и конгломераты.

Для реализации СВЧ транзисторов с нежвигаемыми омическими контактами была выбрана технология с доращиванием сильнолегированного GaIn молекулярно-лучевой эпитаксией (МЛЭ), так как в ней отсутствуют плазмохимическое воздействие на барьерный слой AlGaIn, как при формировании контактов к сильнолегированному защитному слою, и высокотемпературная активация (более 1000 °C) перед нанесением контактной металлизации при формировании омического контакта к областям легированных Si ионной имплантацией. При этом формируемые диэлектрические покрытия для создания маски под рост служат защитным слоем для активных областей гетероструктуры.

Достоинством нежвигаемых омических контактов к гетероструктуре AlGaIn/GaN является хорошая воспроизводимость (зависимость сопротивления в основном от легированного GaIn), хорошая морфология контактов, определяемая только шероховатостью поверхности под металлизацию и внесенными дефектами самой металлизации, низкое сопротивление; недостатком — необходимостью в использовании высокотехнологичного дорогостоящего оборудования.

Внедрение технологии нежвигаемых омических контактов к гетероструктурам AlGaIn/GaN позволило избежать недостатков классических жвигаемых омических контактов. За счет использования нежвигаемых контактов можно отказаться от высокотемпературных процессов обработки сформированной на полупроводнике металлизации.

Процедура осаждения сильнолегированного GaIn при изготовлении МИС на основе нитрида галлия проводилась на гетероструктуре с барьерным слоем AlGaIn/AlN.

Для маскирования поверхности структуры была использована двухслойная система диэлектриков Si₃N₄/SiO₂ [16]. Диэлектрики осаждались плазмохимическим методом на установке Plasmalab System 100 фирмы Oxford с источником индуктивно связанной плазмы. Si₃N₄ осаждался из смеси газов N₂ (10 sccm) + SiH₄ (12 sccm) при давлении 8 мТорр, температуре 250 °C и мощности ИСП 800 Вт на стадии перед формированием приборной мезаизоляции. SiO₂ осаждался из смеси газов N₂O (23 sccm) + SiH₄ (6 sccm) при давлении 4 мТорр, температуре 300 °C и мощности ИСП 500 Вт. Далее с помощью фотолитографии формируются "окна" под контакты в диэлектрике. Обычно эту операцию называют "вскрытие окон диэлектрика". Для вскрытия этих окон необходимо сформировать маску из материала, скорость травления которого ниже скорости травления диэлектрика при других одинаковых условиях. Типичное формирование маски происходит на участке фотолитографии и состоит из нанесения на рабочую пластину с диэлектриком фоторезиста необходимой толщины, совмещения и экспонирования рисунка маски для травления диэлектрика, сушки фоторезиста на пластине, проявки и задубливания маски. После формирования фоторезистивной маски рабочая пластина подвергается операции травления.

Травление диэлектрических слоев через предварительно сформированную фоторезистивную маску осуществляется плазмохимическим методом в смеси SF₆ и O₂ на установке плазмохимического травления SI 500.

После снятия фоторезистивной маски проводится плазмохимическое травление AlGaIn и GaIn через сформированную диэлектрическую маску в смеси BCl₃ и Ar на той же установке. Возможно последующее травление AlGaIn и GaIn без снятия фоторезистивной маски, непосредственно сразу после плазмохимического травления диэлектриков. Такая система маскирования не влияет на свойства поверхности гетероструктуры и с помощью МЛЭ делает рост сильнолегированного GaIn

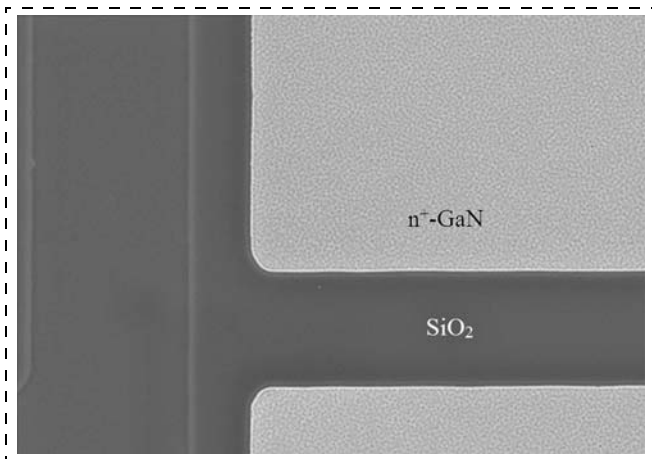


Рис. 3. РЭМ-изображение после эпитаксиального роста сильнолегированного GaN по диэлектрической маске

Fig. 3. SEM image obtained after the highly doped GaN epitaxial growing with the dielectric mask

селективным — рост происходит только в участках, где диэлектрическая маска вытравлена. На гетероструктуру со сформированной диэлектрической маской омических контактов осаждается сильнолегированный GaN в установке МЛЭ при температуре 850 °С. Изображение после роста на растровом электронном микроскопе (РЭМ) показано на рис. 3, где видно, что рост идет только в сформированных окнах. После осаждения сильнолегированного GaN происходит удаление диэлектрической маски в жидком растворе буферного травителя ($\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_2\text{O} = 1:3:7$). На сформированные сильнолегированные области GaN осаждается металлизация омических контактов. Для этого с по-

мощью оптической фотолитографии формируется двухслойная маска, в вакууме осуществляется напыление металлизации невжигаемых омических контактов Cr/Pd/Au с последующим "взрывом" фоторезистивной маски. Данная система металлизации не требует последующих термических обработок. Графически последовательность операций формирования невжигаемых омических контактов показана на рис. 4.

Использование технологии формирования невжигаемых омических контактов к гетероструктуре AlGaN/GaN позволило отказаться от высокотемпературных процессов обработки. За счет этого удается сохранить высококачественный рельеф контактов для последующих технологических операций, а также получать омические контакты с удельным сопротивлением 0,15...0,2 Ом·мм, что является результатом мирового уровня. При этом металлизация омических контактов и меток для ЭЛЛ затворов Шоттки проводится в одном технологическом процессе напыления металлизации.

Формирование выпрямляющего контакта (затвора Шоттки) к гетероструктурам на основе нитрида галлия

Как известно, СВЧ параметры современных полевых СВЧ транзисторов на гетеропереходах главным образом определяются параметрами затвора [17]. Например, предельная частота усиления по току $f_t = G_m/2\pi C_{gs} \approx V_{es}/L_g$, т.е. обратно пропорциональна длине затвора L_g , где G_m — внутренняя крутизна, C_{gs} — емкость затвор-исток, V_{es} — дрейфовая скорость электронов. Для транзисторов сантиметрового диапазона необходимо иметь $L_g < 0,25$ мкм. Вместе с тем, в соответствии с формулой Фукуи, коэффициент шума может быть представлен в виде $F_0 = 1 + K_l f L_g \sqrt{G_m(R_g + R_s)}$, где K_l — компенсирующий коэффициент, R_g и R_s — сопротивление затвора и истока соответственно.

Отсюда можно оценить требования к сечению затвора: полагая $R_g = \rho_g W_g$ и $R_s = \rho_s/W_g$, где ρ_g и ρ_s — удельные сопротивления затвора и истока (Ом·мм) соответственно, а W_g — ширина затвора, и считая, что для оптимального транзистора $R_g = R_s$, получим $\rho_g = \rho_s/W_g^2$. Так, если $\rho_g = 0,2$ Ом·мм, $W_g = 20$ мкм, получаем значение $\rho_g = 500$ Ом·мм, откуда следует, что в случае обычно применяемой металлизации затвора суммарной толщиной 0,6 мкм сечение затвора

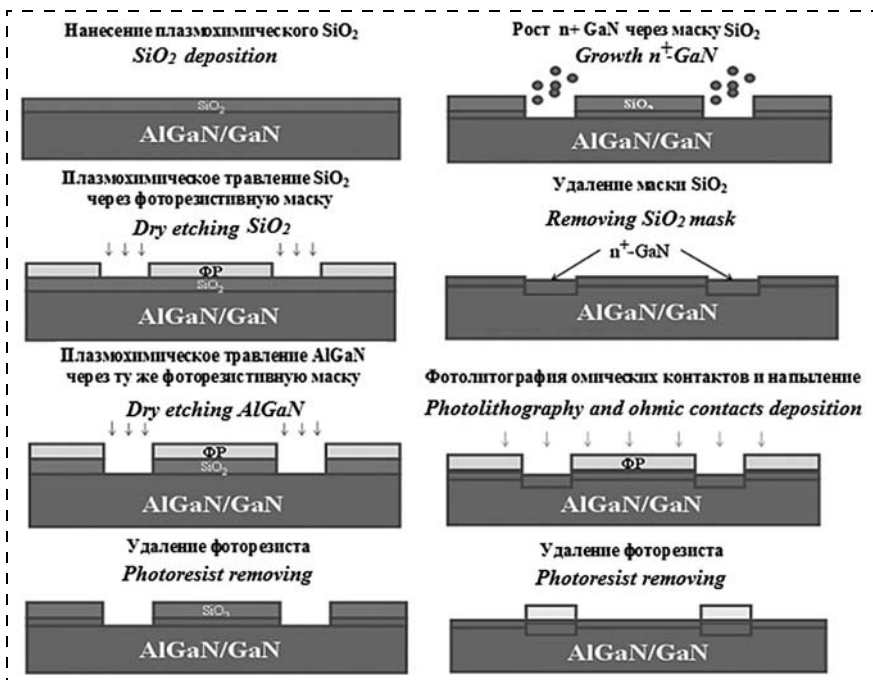


Рис. 4. Последовательность операций формирования невжигаемых омических контактов

Fig. 4. Sequence of operations fulfilled for non-alloyed ohmic contact fabrication

должно быть не менее $0,4 \text{ мкм}^2$. Для более низких частот применяются более широкие транзисторы, следовательно, сечение затвора должно быть еще больше. Очевидно, что одновременно получить малую длину затвора и большое сечение можно только в том случае, если затвор имеет грибообразную (или Т-образную) форму. Поэтому актуальна задача получения грибообразного затвора с разным набором длин затворов для обеспечения широкого спектра возможных частот СВЧ транзисторов и схем на их основе.

Таким образом, получение МИС усилителей для определенного частотного диапазона определяется материалом полупроводника и геометрией затвора.

Формирование грибообразного затвора состоит из следующих ключевых операций:

- электронно-лучевая литография для получения профиля будущего затвора;
- нанесение затворной металлизации;
- "взрыв" электронного резиста.

Рассмотрим стадию формирования грибообразного профиля в резисте.

После дегидратации на плитке при температуре $120 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 15...20 мин на пластину методом центрифугирования наносилась многослойная система электронных резистов с промежуточной сушкой на плитке. Система состоит из слоев РММА950К/PMGI/Сополимер/PMGI/РММА950К общей толщиной около $1,3 \text{ мкм}$. Последовательность слоев и их толщины были оптимизированы для отдельного экспонирования и контролируемого проявления грибообразных профилей с размерами нижней части от $0,1$ до $0,25 \text{ мкм}$ в зависимости от частотного диапазона будущей МИС на нитриде галлия.

Подготовленная пластина экспонировалась в установке электронно-лучевого экспонирования Raith150-TWO (литограф). Первыми экспонировались верхние области затворов шириной $0,8 \text{ мкм}$, а также затворные площадки (первое экспонирование). Далее проводилось последовательное проявление верхних трех слоев резиста в соответствующих проявителях (МИБК:ИПС — 1:1, 101А, МИБК:ИПС — 1:3).

После этого осуществлялось второе экспонирование для формирования литографии под субножки затворов с необходимым номинальным размером и дополнением дозы на площадках. Далее проявлялись нижние два слоя резиста.

В результате был сформирован грибообразный профиль проявленных областей в резисте. После этого проводилась зачистка в кислородной плазме с помощью установки ПХО-001Т (2 мин в горизонтальном положении) от остатков резиста на дне проявленных областей.

После зачистки в кислородной плазме наносилась необходимая затворная металлизация.

Затворная металлизация проводилась на установке вакуумного напыления термическим (резистивным) методом. Последовательно напылялись слои Ni(600 \AA) и Au(5400 \AA) из вольфрамовых лодочек. "Взрыв" металлизации проводился в ацетоне и диметилформамиде (ДМФ) (для растворения слоев PMGI). После отмытки пластины в деионизованной воде проводилась пассивация двухслойным диэлектриком $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$ необходимой толщины.

Пассивация затвора, формирование конденсаторного диэлектрика

Пассивация проходит в две стадии: нанесение диэлектрической пленки на всю пластину; травление диэлектрической пленки через фоторезистивную маску.

После формирования затвора на пластине на ее поверхность необходимо нанести пассивирующий диэлектрик для защиты от воздействия окружающей среды и уменьшения поверхностных эффектов. Также данный диэлектрик используется для формирования пассивных элементов, таких как конденсаторы. Использовалась двухслойная система диэлектриков: оксид алюминия (Al_2O_3), осаждаемый методом атомно-слоевого осаждения при температуре $300 \text{ }^\circ\text{C}$, и плазмохимический нитрид кремния (Si_3N_4), получаемый в ИСП на установке плазмохимического осаждения диэлектриков Plasmalab System 100. Осаждение диэлектрика осуществлялось в среде смеси моносилана ($\text{SiH}_4 = 12 \text{ sccm}$) с азотом ($\text{N}_2 = 11 \text{ sccm}$) при мощности источника ИСП 800 Вт , температуре $300 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении в камере 8 мТорр . При этом осаждалась требуемая толщина диэлектриков для получения емкостей конденсаторов, заложенных в разрабатываемые МИС. Для обеспечения требуемой миграции осаждаемого вещества по поверхности температура подложки была $300 \text{ }^\circ\text{C}$.

Следует отметить, что качество пленок сильно зависит от многих параметров процесса осаждения, таких как тип реактора, используемые газы, материал подложек, температура подложек, давление в камере, ВЧ мощность, расстояние между электродами, парциальное давление реагентов, скорость откачки, материал и геометрия электродов.

Таким образом, для получения пленок определенного качества необходимо решить многокритериальную задачу. Как правило, параметры процесса осаждения диэлектрика корректируются, пока не будет получена диэлектрическая пленка, удовлетворяющая предъявляемым к ней требованиям.

Если в случае пассивации поверхности полупроводника нужно покрыть диэлектриком только плоскость полупроводника, то при пассивации затворов нужно обеспечить хорошую конформность, чтобы диэлектрик равномерно сел на грибообразный затвор как сверху шляпы, так и под ней. Ме-

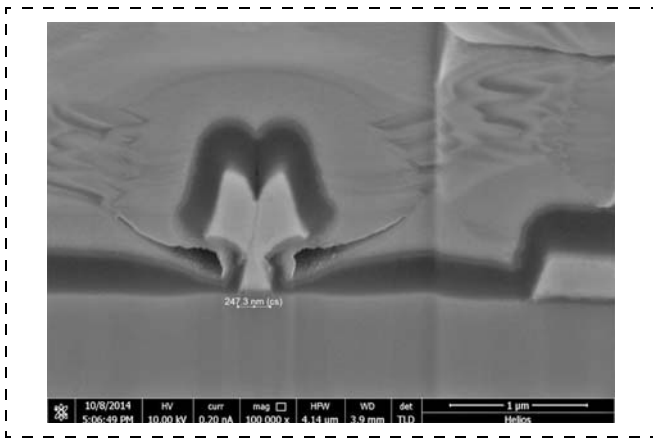


Рис. 5. РЭМ-изображение грибообразного затвора после пассивации нитридом кремния на поперечном срезе

Fig. 5. SEM image of the cross-section of a mushroom-like gate after passivation with silicon nitride

тод атомно-слоевого осаждения диэлектрических пленок обеспечивает необходимую конформность и требует для пассивации поверхности осаждения тонких слоев порядка 10 нм. Для обеспечения необходимых параметров конденсаторов (пробивные напряжения и емкость) сверху Al_2O_3 осаждается Si_3N_4 требуемой для данной МИС толщины, обычно это толщины порядка 0,1...0,3 мкм. Микрофотография примера полученного затвора с $L_g \sim 250$ нм после пассивации представлена на рис. 5.

После формирования сплошной пленки диэлектрика формируется фоторезистивная маска окон для плазмохимического удаления диэлектрика, оставляя диэлектрик в местах пассивации активных областей и будущих конденсаторов. Плазмообразующая среда в реакторе в первую очередь должна обеспечивать необходимую скорость травления, селективность и анизотропию. Как известно, для травления кремния и его соединений используют фторсодержащие газы. Чаще всего используют углеродные галогенсодержащие соединения, имеющие общее название "хладоны". Общие недостатки этой группы газов — возможность образования токсичных продуктов в процессе травления, склонность к полимеризации, возможность образования элементарного углерода на обрабатываемой поверхности (для простых хладонов). Для подавления двух последних эффектов в рабочий газ часто добавляют кислород. Из других фторсодержащих газов следует отметить шестифтористую серу SF_6 , применение которой позволяет достичь высоких скоростей травления без осаждения на поверхности твердых продуктов разложения исходного газа. Чистый фтор практически не применяется из-за своей высокой химической активности по отношению к конструкционным материалам технологического оборудования и токсичности.

Для травления двухслойного диэлектрика применяли установку плазмохимического травления

SI 500: для травления Si_3N_4 использовалась среда шестифтористой серы SF_6 (15 sccm) с кислородом O_2 (4 sccm), рабочее давление 6,2 Па, мощность ИСП источника 200 Вт; для последующего травления через ту же фоторезистивную маску Al_2O_3 использовалась среда BCl_3 (7 sccm) с аргоном Ar (14 sccm), рабочее давление 1 Па, мощность ИСП источника 800 Вт, мощность ВЧ 20 Вт. Следует отметить, что при травлении диэлектрика для полной уверенности стравливания диэлектрического слоя необходим незначительный перетрав.

Травление диэлектрика необходимо проводить с перетравом:

- из-за неоднородности толщины диэлектрика по пластине (10 % от толщины);
- из-за неоднородности скорости травления диэлектрика (5 % от толщины).

После формирования пассивации с пластины снимается фоторезистивная маска и делается следующая литография под "взрыв" для формирования первого уровня металлизации.

Таким образом, для формирования пассивации затвора и конденсаторного диэлектрика необходимо выполнение следующих технологических операций: нанесение пленки Al_2O_3 методом атомно-слоевого осаждения; плазмохимическое осаждение пленки Si_3N_4 ; фотолитография окон пассивации и будущих конденсаторов; плазмохимическое травление последовательно Si_3N_4 и Al_2O_3 ; снятие фоторезистивной маски.

При этом в области между омическими контактами для пассивации затвора достаточно только слоя пленки Al_2O_3 , таким образом, минимизируются паразитные емкости затвор — сток и затвор — исток.

Использование гетероструктур $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}/\text{AlN}/\text{GaN}$, где осаждение пассивирующего слоя *in situ* SiN_x проводится после роста структуры непосредственно в ростовой камере, позволяет использовать этот диэлектрик в качестве пассивирующего затвор Шоттки. Для таких структур ставится задача удаления диэлектрика в области формирования затвора. Транзисторы с затворами Шоттки, сформированными через диэлектрик SiN_x , выращенный в одной ростовой камере с гетероструктурой, не требуют дополнительной пассивации. Использование *in situ* SiN_x способствует увеличению концентрации основных носителей из-за нейтрализации заряда на поверхности за счет пассивации, уменьшению релаксации, уменьшению числа дефектов и шероховатости поверхности AlGaIn , и при этом *in situ* SiN_x выполняет роль защитного слоя поверхности [18]. После формирования затвора необходимо осаждение диэлектрика только для формирования конденсаторов МИС. Использование данной пассивации реализуется при использовании вжигаемых омических контактов, так как при невжигаемой технологии при удалении ди-

электрической маски под рост сильнолегированного GaN пассивирующий слой *in situ* SiN_x также травливается в жидкостном травителе.

Формирование первого уровня металлизации и верхних обкладок конденсаторов

После формирования пассивации на пластине создается двухслойная резистивная маска, после чего пластина подвергается зачистке и напылению металлов.

Зачистка выполняется непосредственно перед процессом напыления в установке плазмохимического травления SI 500 в среде Ar (50 sccm) при давлении 2 Па в комбинированном режиме реактивного ионного травления (РИТ) в ИСП. Смещение на нижнем электроде составляло 50 В. Для предотвращения перегрева фоторезистивной маски процесс осуществляется в циклическом режиме. Каждый цикл состоит из двадцатисекундного травления в аргоне и трехминутного перерыва. Всего такой цикл повторяется четыре раза. Зачистка перед вакуумным напылением обеспечивает лучшую адгезию между металлами. После такой зачистки пластина загружается в установку вакуумного напыления термическим (резистивным) методом, в которой проводится напыление металлов Ti (50 нм)/Au (500 нм). При этом титан служит адгезионным слоем, а золото — контактным. После напыления осуществляется "взрыв" фоторезиста и проводятся необходимые измерения в тестовых модулях.

Формирование межэлектрических соединений в виде "воздушных мостов"

Второй уровень металлизации, электрически соединяющий элементы на пластине, выполняется в виде "воздушных мостов". В связи с тем что общая толщина моста должна составлять 3 мкм (толщина гальванического золота 2,3 мкм), ее наращивают гальваническим методом. Сначала осуществляют фотолитографию мостового резиста, определяющего высоту моста, затем сформированный рисунок в фоторезисте подвергается воздействию температуры. В результате края фоторезиста "заплавают", образуя пологий край, необходимый для неразрывного напыления затравочного слоя металла. После этого на установке вакуумного напыления термическим (резистивным) методом напыляют затравочный слой Ti/Au/Ti (50 нм/500 нм/20 нм). Перед напылением для лучшей адгезии проводят зачистку в аргоне на установке плазмохимического травления SI 500 по описанной выше методике. По затравочному слою делают фотолитографию наращивания гальванического золота. Наращивание выполняют на установке гальванического осаждения золота Valenza 2400V2 в вытяжном шкафу, после чего ненужные участки затравочного слоя на фоторезисте удаляют жидкостным химическим трав-

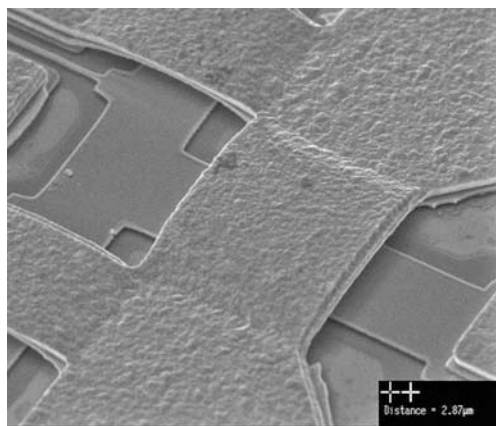


Рис. 6. РЭМ-изображение "воздушного моста"

Fig. 6. SEM image of an "air bridge"

лением (ЖХТ). Финишной операцией при формировании "воздушных мостов" является удаление подмостового фоторезиста.

Таким образом, межслойная изоляция осуществляется с помощью воздушных мостов высотой 2 мкм и толщиной 3 мкм. Изображение такого "воздушного моста" показано на рис. 6.

Формирование межэлектрических соединений, обеспечивающих общую землю

Для соединения общих электродов (чаще всего земляного) используют копланарные полоски, общий нижний электрод на обратной стороне пластины либо дополнительный уровень электрического соединения на лицевой стороне пластины на изолирующем слое.

В процессе разработки МИС на гетероструктурах AlGaN/GaN на подложках SiC и Al₂O₃ сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн предварительные исследования показали, что создание таких МИС на основе копланарной технологии крайне затруднительно ввиду проблем с обеспечением устойчивости подобных систем и наличием частотно-зависимых фазовых набегов по общим проводникам. Это проявляется уже при повышении усиления и выходной мощности МИС усилителя мощности (УМ). За рубежом МИС на основе гетероструктур AlGaN/GaN, как правило, изготавливают по микрополосковой технологии, подразумевающей травление сквозных отверстий сквозь подложку. Однако это связано с серьезными технологическими трудностями. Частично решение данной проблемы может быть облегчено при переходе к гетероструктурам на кремниевых подложках, но в настоящее время такие гетероструктуры еще исследуются.

В результате было найдено конструкторско-технологическое решение данной проблемы, заключающееся в создании "заземляющей плоскости" над лицевой поверхностью пластины с уже изго-

товленными активными и пассивными СВЧ элементами поверх слоя полимерного диэлектрика толщиной 10...15 мкм (специального фотолака, разработанного ИВС РАН). При этом соответствующие элементы заземляют через отверстия в слое фотолака, одновременно выполняющего роль защитной пассивации.

Разработанный фотолак представляет собой композицию, включающую прекурсор высокотермостойкого полимера (аналога полиимида) и светочувствительный компонент хинондиазидного типа, аналогичную светочувствительному компоненту, применяемому в обычных позитивных фоторезистах типа ФП 383 и ФП 051.

Применение фотолakov не требует специального оборудования. Работа с ними осуществляется на стандартных литографических установках с использованием дуговых ртутных ламп (ДРШ).

С учетом рекомендаций изготовителей фотолака был разработан маршрут дополнительного уровня межэлектрических соединений, обеспечивающий как защиту схемы, так и общую землю.

На подложку с изготовленными схемами центрифугированием наносится первый слой фотолака, после чего ступенчато осуществляется сплошное экспонирование и задубливание в статической печи в инертной среде азота: 150 °С — 15 мин, 200 °С — 15 мин, 250 °С — 15 мин, 350 °С — 30 мин. Таким образом, формируется первый адгезионный слой фотолака толщиной 2 мкм. Сплошное экспонирование рельефа без шаблона необходимо для разложения светочувствительного компонента, иначе при термозадубливании сформированно-

го микрорельефа возможно вспучивание пленки или появление дырок ("рыбьих глаз") за счет разложения светочувствительного соединения с выделением азота при температуре задубливания.

Затем повторно наносятся два слоя лака (также центрифугированием) для формирования конечной толщины изолирующего слоя (12...15 мкм). Совмещение и экспонирование фотолака осуществляется на установке прецизионной контактной фотолитографии SUSS MJB4 IR. Проявление выполняют 0,3 %-м водным раствором едкого калия. Затем проводится ступенчатое задубливание по вышеописанной схеме в инертной среде азота.

Полное запыление поверхности фотолака со сформированным рельефом металлизацией Ti/Au (50 нм/500 нм) осуществляется на установке вакуумного напыления термическим (резистивным) методом. Непосредственно перед напылением выполняется плазмохимическая зачистка в окнах фотолака для удаления нижнего задубленного адгезионного слоя. Зачистка происходит на установке плазмохимического травления SI 500 в среде O₂ с последующим контролем в оптическом микроскопе. Таким образом, после напыления формируется электрический контакт, который соединяет общий электрод, лежащий на непроводящем материале, через окна в фотолAKE.

По напыленному металлу делается фотолитография обтравы лишней металлизации на поверхности фотолака. По фотолитографической маске жидкостным химическим травлением удаляется незащищенная металлизация. Сформированный рисунок металлизации верхней "земли" утолщается гальваническим осаждением золота. Для удаления фотолака с дорожек реза и контактных площадок схем проводят плазмохимическое травление фотолака по сформированной металлической маске в среде O₂ на установке плазмохимического травления SI 500.

После формирования межэлектрических соединений заканчивается маршрут изготовления "лицевой" части МИС на нитриде галлия. После этого следуют операции полировки обратной стороны пластины химико-механическим методом на установке PM5 фирмы Logitech, резки на кристаллы методом лазерного управляемого термораскалывания, их отбраковки и посадки через тепловой интерфейс на теплоотвод. Схематически основные этапы технологического маршрута изготовления МИС "лицевой" части показаны на рис. 7.

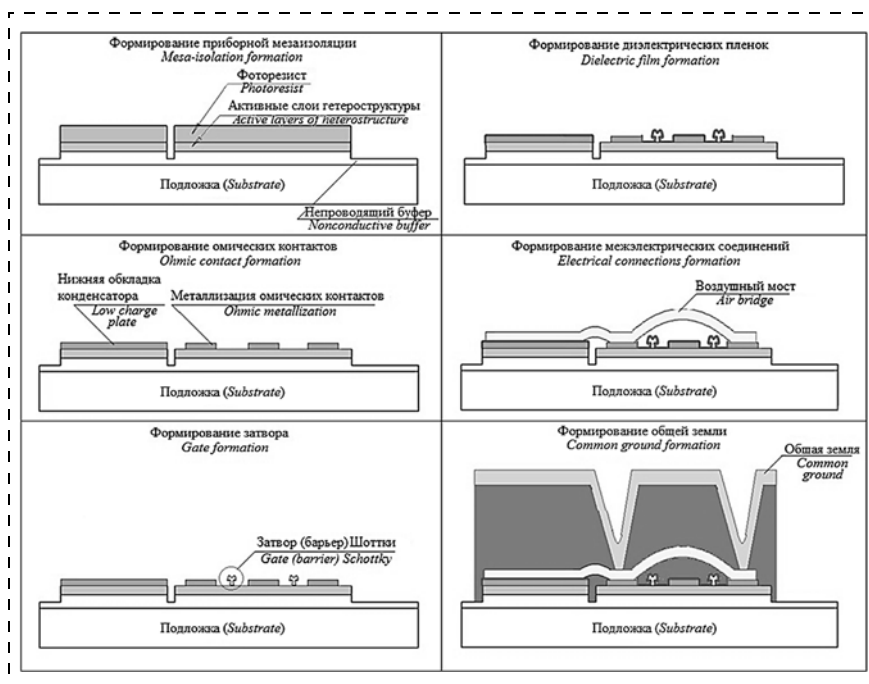


Рис. 7. Основные этапы технологического маршрута "лицевой" стороны МИС
Fig. 7. Main stages of the engineering route of MIC's "face" part fabrication

Реализация технологии изготовления МИС на основе нитрида галлия, разработанных топологических решений для сантиметрового и миллиметрового частотных диапазонов

Описанная технология производства была внедрена в ИСВЧПЭ РАН и успешно использована для создания широкой номенклатуры МИС для различных частотных диапазонов, вплоть до 70 ГГц [19–25].

В частности, разработан и изготовлен УМ диапазона 8...12 ГГц, отличительной особенностью которого является его однокаскадная конструкция. При разработке однокаскадных усилителей существуют сложности с обеспечением устойчивости схемы, а также с необходимостью достижения высоких усилительных и мощностных характеристик единичного каскада. В связи с этим уникальными возможностями обладает каскадная схема включения транзисторов, которая особенно интересна в нитрид-галлиевой технологии. К достоинствам такой схемы можно отнести увеличение энергетической эффективности и снижение потребляемой мощности. По нашим сведениям, МИС подобной конструкции на нитриде галлия изготовлена впервые в России.

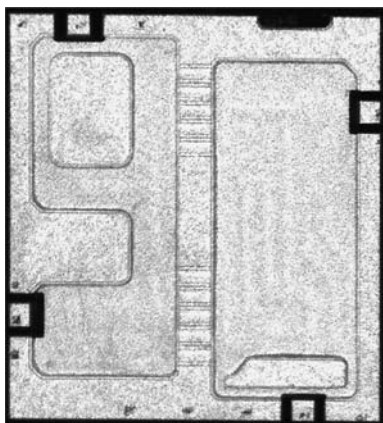


Рис. 8. Фотография кристалла МИС УМ сантиметрового диапазона

Fig. 8. Fabricated 8–12 GHz PA MIC chip

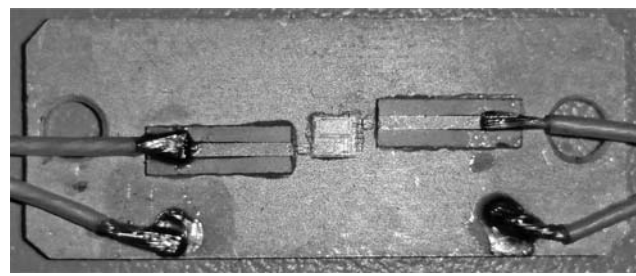


Рис. 9. Внешний вид МИС УМ сантиметрового диапазона, смонтированного в измерительную оснастку

Fig. 9. Centimeter-range PA's MIC assembled into a gaging accessory

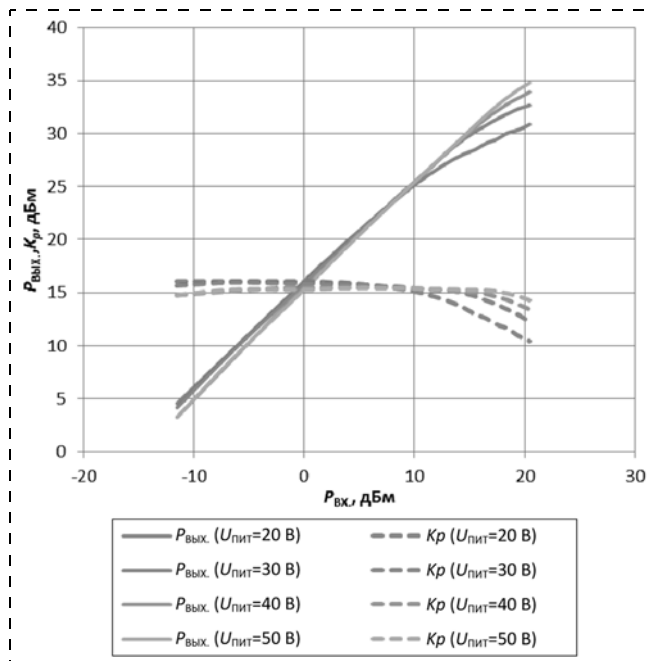


Рис. 10. Зависимость выходной мощности и коэффициента усиления МИС УМ сантиметрового диапазона от мощности на входе при напряжениях питания от 20 до 50 В

Fig. 10. Centimeter-range PA's MIC's out power and amplification factor dependence on input power at the supply voltages from 20 to 50 V

Внешний вид изготовленного кристалла МИС УМ после проведения всех технологических операций показан на рис. 8. Длина затвора транзисторов составляет 0,25 мкм, а его общая периферия — 6,4 мм. Усилители были изготовлены на гетероструктуре AlGaN/AlN/GaN на подложке сапфира. Размер кристалла составляет 1,57 × 1,71 мм.

Для проведения измерений полученные образцы были смонтированы на теплоотвод в оснастку, показанную на рис. 9. Измерения выходной мощности проводили в импульсном режиме по питанию при длительности импульса 1 мкс и скважности 100, напряжение питания до 50 В. При напряжении питания 50 В линейная выходная мощность ($P_{\text{вых}}$) достигает 3 Вт, что соответствует 34,8 дБм, согласно формуле $P_{\text{дБм}} = 10 \cdot \log_{10}(P_{\text{мВт}})$. Ток потребления не более 0,8 А, при этом коэффициент усиления ($K_{\text{р}}$) составляет около 15 дБ (рис. 10).

Примером применения вышеописанной технологии производства в миллиметровом диапазоне длин волн служит разработка комплекта микросхем с рабочими частотами 57...64 ГГц на сапфировой подложке [26–30]. В состав комплекта вошли генератор, управляемый напряжением (ГУН), балансный смеситель, усилитель миллиметрового диапазона, усилитель промежуточной частоты (УПЧ), антенна. Помимо этого, были изготовлены усилители с интегрированными приемной и передающей антеннами, а также многофункциональные приемный и преобразователь сигнала в составе ГУН, смеситель, УПЧ (система

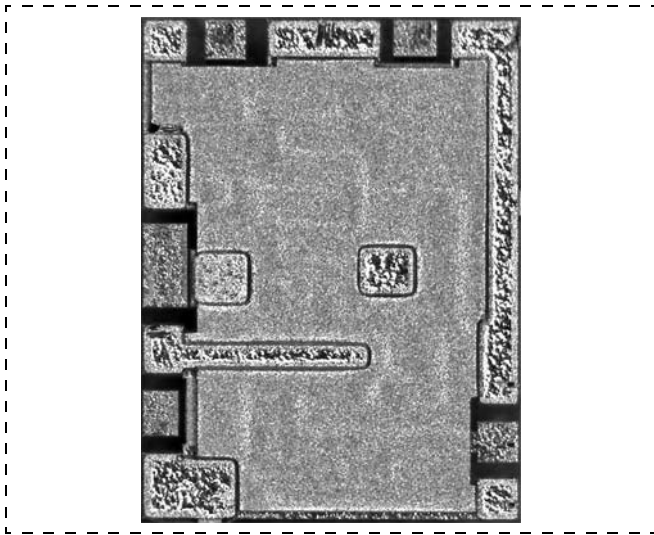


Рис. 11. Внешний вид МИС ГУН
Fig. 11. Appearance of VCO MMIC

на кристалле) (рис. 11–15). Насколько известно авторам, подобные многофункциональные нитрид-галлиевые микросхемы преобразователей сигнала на сапфировых подложках изготовлены впервые в мире.

МИС усилителя миллиметрового диапазона частот в зависимости от рабочей точки может служить в качестве малозумящего усилителя (МШУ) или УМ. Усилитель имеет четыре каскада, длина за-

твора составляет 0,14 мкм. В малосигнальном режиме коэффициент передачи ($K_{пер}$) составляет не менее 15 дБ при коэффициенте шума ($K_{ш}$) около 6 дБ и токе потребления менее 100 мА (рис. 16). В режиме большого сигнала в импульсном режиме по питанию выходная мощность ($P_{вых}$) достигает 100 мВт (20 дБм) при коэффициенте усиления (K_p) до 20 дБ и токе потребления не более 200 мА (рис. 17). Линейная выходная мощность составляет 30...50 мВт.

Выходная мощность МИС ГУН составляет 30...40 мВт. Диапазон перестройки частоты не менее 3 ГГц. Стабильность частоты генерации от напряжения питания не хуже 200 МГц/В при напряжении питания 10 В (рис. 18).

Многофункциональные приемная и приемопередающая микросхемы преобразователей сигнала имеют типовой коэффициент преобразования плюс 10 дБ при напряжении питания не более 10 В и токе потребления до 150 мА. Выходная мощность передающего канала составляет не менее 10 мВт.

Микросхемам усилителя миллиметрового диапазона и приемного преобразователя сигнала присвоены следующие условные обозначения:

- МШУ без антенны — 5411УВ01Н;
- МШУ, интегрированный с антенной на одном кристалле, — 5411УВ01АН;
- УМ без антенны — 5411УВ02Н;
- УМ, интегрированный с антенной на одном кристалле, 5411УВ02АН;

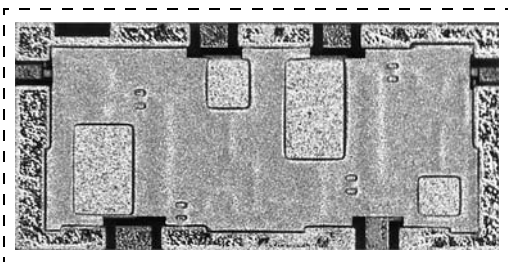


Рис. 12. Внешний вид МИС усилителя миллиметрового диапазона
Fig. 12. Appearance of millimeter-wave PA MMIC

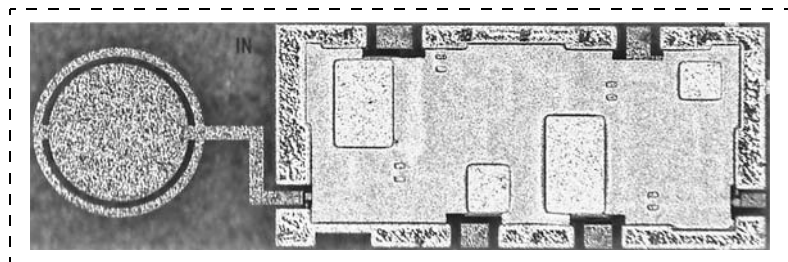


Рис. 13. Внешний вид МИС МШУ с интегрированной приемной антенной
Fig. 13. Appearance of LNA MMIC with an integrated receiving antenna

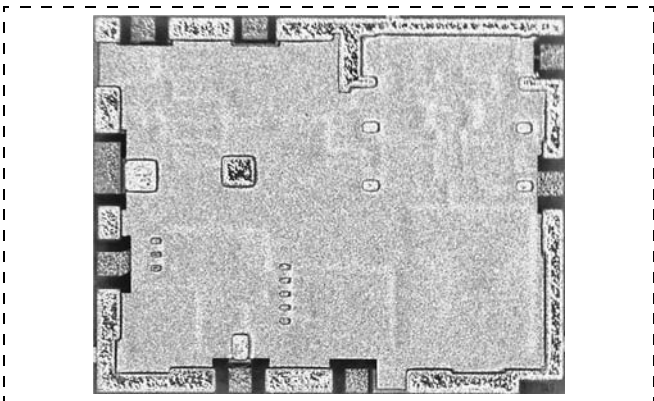


Рис. 14. Внешний вид МИС приемного преобразователя сигнала
Fig. 14. Appearance of a receiving signal converter's MMIC

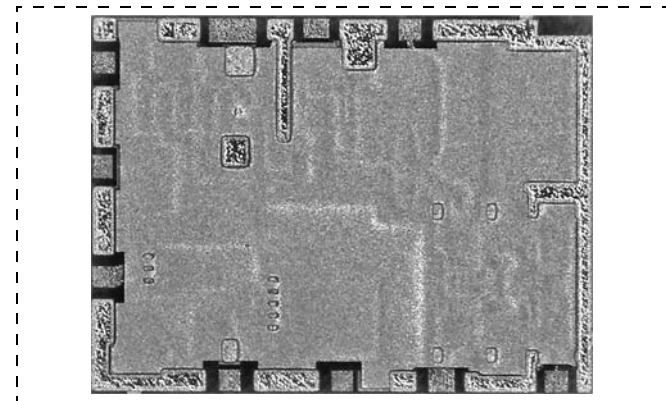


Рис. 15. Внешний вид МИС приемопередающего преобразователя сигнала
Fig. 15. Appearance of a transceiving signal converter's MMIC

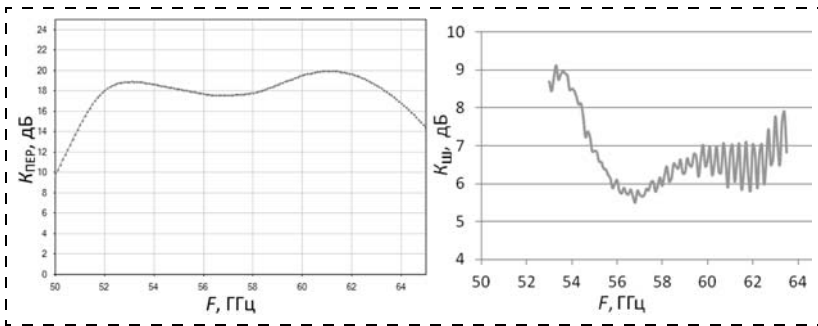


Рис. 16. Характеристики МИС усилителя миллиметрового диапазона в малосигнальном режиме

Fig. 16. Small-signal performance of millimeter-wave amplifier MMIC

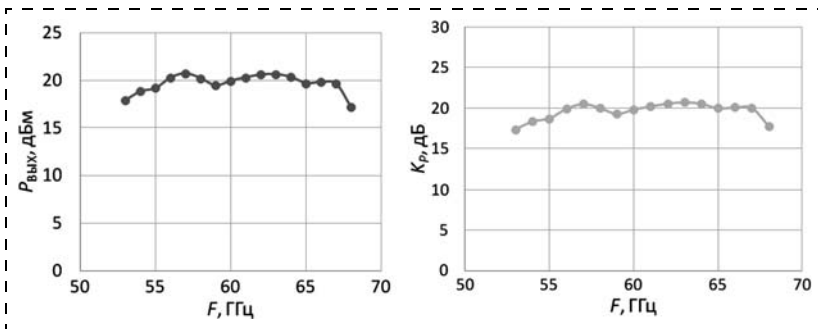


Рис. 17. Характеристики МИС усилителя миллиметрового диапазона в режиме большого сигнала

Fig. 17. Large-signal performance of millimeter-wave amplifier MMIC

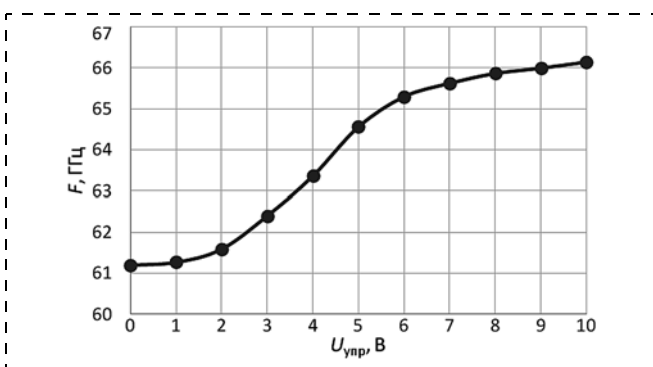


Рис. 18. Зависимость частоты выходного сигнала МИС ГУН от управляющего напряжения

Fig. 18. Oscillation frequency versus control voltage of VCO MMIC

- преобразователь сигнала в составе: смеситель, генератор, УПЧ на одном кристалле — 5411НС01Н. Справочный лист комплекта МИС доступен на сайте ИСВЧПЭ РАН: <http://isvch.ru> в разделе "Разработки".

Заключение

Использование технологии изготовления монокристаллических интегральных схем на основе нитрида галлия позволило реализовать технические решения для сантиметрового и миллиметрового частотных диапазонов в виде МИС УМ, МШУ, ГУН и УПЧ, не уступающие по своим характеристикам зарубежным аналогам. При этом топологический раз-

мер ножки грибообразного затвора СВЧ транзистора для миллиметрового диапазона составил 0,14 мкм, а для сантиметрового — 0,25 мкм.

Разработанные МИС могут быть использованы в автомобильных радарах, устройствах радиолокации, быстродействующих каналах наземной и межспутниковой связи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0011, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60714X0011).

Список литературы

1. Бессемулен А., Даделло А., Харви Д. и др. Создание высокоэффективных усилителей Ka и X диапазонов // Компоненты и технологии. 2008. № 87. С. 10–14.
2. Федоров Ю. В., Михайлович С. В. Влияние параметров наногетероструктур и технологии изготовления на шумовые свойства AlGaIn/GaN HEMT // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 10. С. 12–17.
3. Федоров Ю. В., Михайлович С. В. Нитридные HEMT против арсенидных: Последняя битва? // Известия вузов. Материалы электронной техники. 2015. Т. 18, № 1. С. 16–22.
4. Галиев Р. Р., Гнатюк Д. Л., Зуев А. В. и др. Нитридные технологии для освоения миллиметрового диапазона длин волн // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 2. С. 21–32.
5. Федоров Ю. В., Михайлович С. В. Перспективы замены арсенидных МИС на нитридные // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 4. С. 217–226.
6. Павлов В. Ю., Павлов А. Ю., Слаповский Д. Н. и др. Влияние методов формирования омических контактов на частотные характеристики полевых транзисторов на гетероструктурах AlGaIn/GaN // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2016. Т. 16, № 4. С. 53–56.
7. Lei M., Adeni K. F., Chang Z., et al. Comparison of Different GaN etching techniques // Proceedings of the CSMANTECH Conference, Vancouver, British Columbia, Canada, april 24–27, 2006. P. 105–108.
8. Павлов В. Ю., Павлов А. Ю. Технология сплавных и несплавных омических контактов к гетероструктурам на основе GaN. Обзор // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 10. С. 635–644.
9. Слаповский Д. Н., Павлов А. Ю., Павлов В. Ю., Клевковкин А. В. Сплавные омические контакты на основе Si/Al к нитридным гетеросистемам AlGaIn/GaN // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, № 4. С. 461–466.
10. Слаповский Д. Н., Павлов А. Ю., Павлов В. Ю., Клевковкин А. В. Исследование морфологии сплавных омических контактов с контактным слоем кремния к гетероструктуре AlGaIn/GaN // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2016. Т. 16, № 4. С. 77–80.
11. Yoon S., Song Y., Lee S. M., et al. Localized TiSi and TiN phases in Si/Ti/Al/Cu Ohmic contacts to AlGaIn/GaN heterostructures // Semiconductor Science and Technology. 2016. N 31. P. 055002.
12. Mohammed F. M., Wang L., Adesida I. Differences in the reaction kinetics and contact formation mechanisms of annealed Ti/Al/Mo/Au Ohmic contacts on n-GaN and AlGaIn/GaN epilayers // Journal of Applied Physics. 2007. Vol. 101, N. 1. P. 013702.
13. Guodong G., Shaobo D., Yuanjie L., et al. Low ohmic contact AlN/GaN HEMTs grown by MOCVD // Journal of Semiconductors. 2013. Vol. 34, N. 11. P. 114004.

14. Liu Y., Singh S. P., Kyaw L. M., et al. Mechanisms of Ohmic Contact Formation and Carrier Transport of Low Temperature Annealed Hf/Al/Ta on $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}/\text{GaN-on-Si}$ // ECS Journal of Solid State Science and Technology. 2015. Vol. 4, N. 2. P. 30–35.

15. Pang L., Kim K. Analysis of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors with nonalloyed Ohmic contacts achieved by selective area growth using plasma assisted molecular beam epitaxy // IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN). 2014. Vol. 4, N. 2. P. 08–13.

16. Арутюнян С. С., Павлов А. Ю., Павлов В. Ю. и др. Двухслойная диэлектрическая маска $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ для создания низкоомных омических контактов к AlGaIn/GaN HEMT // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50, № 8. С. 1138–1142.

17. Мокеров В. Г., Кузнецов А. Л., Федоров Ю. В. и др. AlGaIn/GaN-СВЧ HEMT-транзисторы с пробивным напряжением выше 100 В и с предельной частотой усиления по мощности f_{max} до 100 ГГц // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43, № 4. С. 561–567.

18. Томош К. Н., Павлов А. Ю., Павлов В. Ю. и др. Исследование процессов изготовления HEMT AlGaIn/AlN/GaN с пассивацией Si_3N_4 in situ // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50, № 10. С. 1434–1438.

19. Федоров Ю. В., Майтама М. В. Топология ИМС "Интегральный усилитель мощности для диапазона частот 8–12 ГГц" // Свидетельство о государственной регистрации № 2016630104 от 19.08.2016.

20. Федоров Ю. В., Майтама М. В. Топология ИМС "Интегральный малошумящий усилитель для диапазона частот 8–12 ГГц" // Свидетельство о государственной регистрации № 2016630103 от 19.08.2016.

21. Федоров Ю. В., Майтама М. В. Топология ИМС "Интегральный СВЧ переключатель 1×2 для диапазона 4–18 ГГц в копланарном исполнении" // Свидетельство о государственной регистрации № 2016630003 от 11.01.2016.

22. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л. и др. Интегральный антенный элемент со встроенным малошумящим усилителем для диапазона 57–64 ГГц. Свидетельство о государственной регистрации № 2013630159 от 06.11.2013.

23. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л. и др. Преобразователь сигнала для диапазона 57–64 ГГц. Свидетельство о государственной регистрации № 2013630171 от 05.12.2013.

24. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л. и др. Интегральный антенный элемент со встроенным усилителем мощности для диапазона 57–64 ГГц. Свидетельство о государственной регистрации № 2015630131 от 02.12.2015.

25. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л. и др. Интегрированный приемо-передающий модуль для диапазона частот 57–64 ГГц. Свидетельство о государственной регистрации № 2016630080 от 12.07.2016.

26. Федоров Ю. В., Мальцев П. П., Матвеев О. С. и др. МИС усилителей со встроенными антеннами СВЧ-диапазона на наногетероструктурах // "Наноиндустрия". 2015. № 3. С. 44–51.

27. Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л., Бугаев А. С. и др. Разработка монолитных интегральных схем для Ka-, V- и W-диапазонов на основе нитрида галлия // Микроэлектроника. 2016. Т. 45, № 2. С. 135–143.

28. Федоров Ю. В., Мальцев П. П., Гнатюк Д. Л. и др. Создание СВЧ монолитных ИС 5-миллиметрового диапазона для применения в перспективных КС // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2016, № 2. С. 73–78.

29. Крапухин Д. В., Мальцев П. П. Монолитная интегральная схема малошумящего усилителя на нитриде галлия для диапазона 57–64 ГГц // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4, № 4. С. 42–53.

30. Мальцев П. П., Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Л. и др. Монолитная интегральная схема ГУН V-диапазона // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 10. С. 645–648.

Yu. V. Fedorov, Chief Designer, Deputy Director in Charge of R & D,

A. S. Bugayev, Production Engineer Chief Technologist, Deputy Director,

A. Yu. Pavlov, Ph. D., Head of Laboratory, p.alex.ur@yandex.ru,

D. L. Gnatyuk, Ph. D., Head of Laboratory, **O. S. Matveyenko**, Ph. D., Senior Researcher,

V. Yu. Pavlov, Jr. Researcher, **D. N. Slapovskiy**, Jr. Researcher, **K. N. Tomosh**, Jr. Researcher,

E. N. Enushkina, Chief Specialist, **R. R. Galiev**, Researcher, **M. V. Maytama**, Jr. Researcher,

A. V. Zuyev, Researcher, **D. V. Krapukhin**, Jr. Researcher, **S. A. Gamkrelidze**, Director

Institute of Ultra-High Frequency Semiconductor Electronics of RAS (Moscow)

Corresponding author:

Pavlov Aleksandr Yu., Junior Researcher, Head of Laboratory, Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS, Moscow, 117105, Russian Federation, e-mail: p.alex.ur@yandex.ru

The Manufacturing Technology and Development of Monolithic Integrated Circuits Based on Gallium Nitride

Received on November 14, 2016

Accepted on November 30, 2016

This paper presents a technology for manufacturing of the monolithic integrated circuits based on gallium nitride. This technology includes such basic steps as formation of the mesa-isolation; formation of the ohmic contacts to a heterostructure (it ensures formation of the resistors, the bottom capacitors' plates and inductors); formation of Schottky gates to a heterostructure; the gates' passivation; formation of the capacitors' dielectric; formation of the first-level metallization and the top capacitors' plates; formation of the electrical connections in the form of "the air bridges" and common ground; grinding of the wafers; dicing (cutting of wafers into crystals); screening test (sorting out); planting crystals on a heat sink. The ohmic contacts were formed using the non-alloyed technology with a highly doped growth of GaN under the ohmic contacts. It ensured a smooth surface and a low value of the specific contact resistance of the ohmic contacts, equal to $0.15 \Omega \cdot \text{mm}$. Schottky T-gates were formed with $0.14 \mu\text{m}$ and $0.25 \mu\text{m}$ lengths for the centimeter and millimeter frequency bands. The formation of a common ground was performed from the face side through a non-conductive layer of a polymer dielectric. The monolithic integrated circuits of the power amplifier, the low-noise amplifier, the voltage controlled oscillator and the intermediate frequency amplifier were manufactured with the use of this technology. Their specifications correspond to the world-class level.

Keywords: gallium nitride, monolithic integrated circuit, power amplifier, low noise amplifier, technology, process route, process step, field effect transistor, ohmic contacts, Schottky gate, electrical connection

For citation:

Fedorov Yu. V., Bugayev A. S., Pavlov A. Yu., Gnatyuk D. L., Matveyenko O. S., Pavlov V. Yu., Slapovskiy D. N., Tomosh K. N., Enushkina E. N., Galiev R. R., Maytama M. V., Zuyev A. V., Krapukhin D. V., Gamkrelidze S. A. The Manufacturing Technology and Development of Monolithic Integrated Circuits Based on Gallium Nitride, *Nano- i Mikrosistemnaya Tehnika*, 2017, vol. 19, no. 5, pp. 273–293.

DOI: 10.17587/nmst.19.273-293

Introduction

Electronic devices of commercial and military purpose should meet extremely strict requirements, as regards their performance and efficiency. This condition results from the action of many factors, from problems with the necessary thermal conditions provision to the energy saving requirements to a system as a whole. High-efficiency microwave monolithic integrated circuit (MMIC) application makes it possible to reduce the mass of equipment, as compared to that of the systems with waveguides, to increase the system's vibration resistance, and to facilitate the adjustment (by using standard discrete amplifiers) [1].

Centimeter- and millimeter wavelength ranges are promising as regards their versatile applications such as high-duty point-to-point telecommunications links of the capacity of 140/155 Mb/s; trunk connections with the frequencies within the range of 7.9 to 8.4 GHz; radar systems, including synthetic-aperture radars; electronically scanned arrays and active phased antenna arrays; navigation and communications systems' equipment; simulators and testing equipment.

Analysis of both the state of affairs in centimeter- and millimeter-range monolithic integrated circuit (MIC) development in foreign countries and the experience of the Institute of Ultra-High Frequency Semiconductor Electronics RAS (IUHFSE RAS) obtained in the course of R & D works carried out in the recent years [2–5] has led the authors to the conclusion about the necessity to research the possibility to optimize some technologic stages of fabrication of transistors and circuits based thereon. It has been planned to introduce the non-alloyed ohmic contact technique, to optimize Schottky gate profile and to provide a common ground at a crystal's front side, which has not been realized in GaN-based MMIC fabrication in Russia.

To fabricate pilot MIC samples, the domestic AlGaIn/AlN/GaN HEMT heterostructures on sapphire- and silicon carbide substrates from Elma-Malakhit JSC were used.

At MIC fabrication, the passive and active elements of the circuit ensuring MIC layout realization for a specified frequency range are fabricated within a single technologic cycle. On a device fabrication, a technology route is designed that comprises sequential technologic operations. Additionally, some technologic operations can be united into a group of operations responsible for the fabrication of a part of future device's elements.

In the course of GaN-based MIC fabrication, it is necessary to realize the main formation stages: device mesa isolation; fabrication of a non-rectifying (ohmic) contact to the heterostructure that will ensure resistors, capacitor's bottom plates, and inductors fabrication; fabrication of a rectifying contact to the heterostructure (Schottky barrier gate); the gate's and capacitor's dielectric passivation; first layer and capacitor's top plates metallization; making electric component connectors in the form of "air bridges" and a common ground; wafer backgrounding; wafer dicing; screening (rejection); chip planting onto a heatsink. Successive realization of the above operations is the necessary condition for serviceable MIC fabrication.

Let us consider the features and purpose of each of the main stages of a centimeter- and millimeter frequency range GaN-based MIC fabrication. Also, it should be pointed out that optimization of ohmic contact fabrication and passivation processes will reduce parasitic resistances' and — capacitances' effects on the frequency characteristics of the future MIC [6]. Schottky contact fabrication stage is responsible for the microwave transistors' frequency characteristics and for those of MICs based on these transistors [5].

Device mesa isolation fabrication for gallium nitride based MICs

Mesa isolation fabrication implies the creation of a structure on a heteroepitaxial plate with conductive (active) and nonconductive layers by etching the heterostructure surface. The purpose of the operation is to separate the individual active areas intended for a device fabrication to avoid the electrical contact between the units and circuit's elements.

Two groups of methods, "wet" and "dry" ones, are used for mesa-shaped isolation formation. To realize this stage, the following technologic operations are to be performed: mesa image photomasking, semiconductor etching, photoresist mask removal, and etch depth control.

The "wet" method implies using liquid solutions for chemical etching the semiconductor surface areas free from a photoresist film. The "wet" method is easy and does not require any complicated equipment. The method, though, is not very popular for dealing with AlGaIn/GaN heterostructures, since it is difficult to find solutions capable of chemical etching the semiconductor with a very strong chemical bond in GaN. Photostimulated electrochemical GaN etching has been reported [7], but the method is strongly dependent on many factors and poorly reproducible. For this reason, "dry" etching methods are more popular. For AlGaIn/GaN heterostructure "dry" etching, we used plasma chemical etching in inductively coupled plasma (ICP). The use of ICP provides for a higher ion density, this ensuring an increase in the etching rate at a low power consumption. To etch AlGaIn/GaN hetero pair, they usually use the mixture of Cl₂, BCl₃, and Ar. This combination ensures rather high etching rates.

At GaN-based heterostructure field-effect transistor manufacture, the typical mesa isolation depth makes 20.0 to 30.0 nm. The semiconductors used (AlGaIn and GaN), as well as the substrates for their epitaxial growth (Al₂O₃ and SiC), are the materials transparent in the visible spectrum. At the mentioned typical "mesa" depth, it is difficult to realize contact photolithography of the ohmic contacts because of the difficulty in photomask alignment with the topologic image of the isolation patterned on the wafer. In this connection, we decided to form mesa isolation of increased depth (about 80.0 nm). In this case, there was no need for high etching rates: 20.0 to 30.0 nm/min rate was quite sufficient. This rate was achieved on SI 500 plasma chemical etching installation with the use of BCl₃ + Ar medium. Boron trichloride is used as the chemically active medium, while the role of Ar is the discharge maintenance in a chamber and, to some extent, participation in the etching process. The use of the photoresist

mask in the plasma chemical etching process imposed additional requirements: the necessity of heat removal from the whole area of the semiconductor wafer to avoid the photoresist film overheating, which may lead to changes in the mask geometry and subsequent complication of its removal. The installation comprises a cooling system, that is, the blow-off of the backside with a helium flux, but it turned out to be insufficient for compensation of the overheating at a long-standing process. To remove the heat the decision was taken to divide the etching process into successive stages with pauses between them.

The use of a medium consisting of BCl_3 (30 sccm) + Ar (50 sccm), the gas pressure of 8 Pa, and the 170 V bias applied to the bottom electrode resulted in etching rate maintenance at the level of about 25.0 nm/min. The etching process was realized in cycles: 30 s of etching — a 1-min pause. The number of cycles was selected depending on the depth of the "mesa". Since the heterostructures used did not possess a protective layer, before the start of the process the heterostructure was coated with a thin layer of Si_3N_4 , which played the role of a protective barrier for the heterostructure. Prior to mesa isolation etching, the thin dielectric film is removed from the heterostructure's etching windows with fluorine-containing plasma on the same SI 500 plasma chemical etching tool.

To summarize, to form mesa isolation for AlGaN/GaN heterostructures, the following technologic operations were carried out: semiconductor's etching windows photomasking, thin dielectric layer removal by plasma chemical etching, semiconductor plasma chemical etching, photoresist mask removal, and etch depth control.

Electrical testing of the mesa isolation at the etched sites of the semiconductor is carried out after the ohmic contacts to the heterostructure are fabricated. Testing is realized using a special paste for isolation (quality) control (the image of the paste is provided in the fig. 1). Leakage current vs. voltage plot is built for the specific kind of paste.

Fabrication of ohmic contacts to gallium nitride-based heterostructures

At the stage of the ohmic contacts to a field-effect microwave transistor (FEMT) fabrication, the minimum contact resistance to the heterostructure and the manufacturability of further operations should be ensured. Contact resistance grows with an increase in the heterostructure's band gap (E_g) width. To make an ohmic contact to *n*-GaN, they mostly use Ti-based multicomponent contacts, whose thermal treatment yields compounds with a low work function. The low resistance of the metal-GaN contact is usually believed to be due to nitrogen's vacancies formation as a result of GaN interaction with the contact material, for instance, with Ti. The use of Ti/Al-based multicomponent contacts followed with thermal treatment provides for the specific contact resistance to $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, of about $0.5...0.6 \Omega \cdot \text{mm}$, taking into account that ohmic contact high-temperature annealing at $750...900^\circ\text{C}$ leads to changes in contact metallization's edge and relief.

Low contact resistance provision without the high-temperature treatment and with the relief preservation is possible via an ohmic contact fabrication to highly doped GaN.

Thus, there are two types of technologies available for ohmic contacts to AlGaN/GaN heterostructures fabrication: alloyed and non-alloyed technologies [8].

For GaN-based MMIC fabrication, the non-alloyed contact formation technology was used. The alloyed technology for ohmic contacts to nitride Si/Al-based heterostructures has also been developed at IUHFSE RAS as the alternative meth-

od provided the necessary equipment for the non-alloyed contacts formation may be absent [9, 10].

The both technologies for ohmic contact formation in the process of GaN-based MMIC fabrication are described below.

Si/Al-based alloyed ohmic contacts to gallium nitride

Metal-semiconductor contact formed using high-temperature rapid thermal annealing (RTA) has been called the "alloyed ohmic contact"; it has been used in the first works on microwave FETs on AlGaN/GaN heterostructures.

It is possible to distinct two main stages in the process of alloyed contact to AlGaN/GaN heterostructure fabrication:

- selection of a method for ohmic contact to AlGaN/GaN heterostructure metallization;
- selection of a thermal treatment technique: temperature, annealing duration, and heating curve. The annealing is carried out in an inert medium.

Classical metallization systems based on Ti/Al are the ones widely used in the alloyed ohmic contacts to AlGaN/GaN heterostructures. Titanium- and aluminum nitrides formation leads to nitrogen vacancies appearance at the contact boundary of the semiconductor, but the process requires treatment at elevated temperatures (over 800°C). Moreover, the work function of TiN is low, which results in ohmic contact resistance reduction. Titanium's and aluminum's liability to oxidation, though, implies the use of an anticorrosion layer of Au. Besides, the products of Al-Au interaction usually are formed at the contact boundary, this increasing the contact resistance and deteriorating the post-anneal surface morphology. The existence of these difficulties suggests the need for a barrier layer preventing both Al diffusion toward the top Au layer and easy Au diffusion toward the semiconductor. Unfortunately, at high temperatures, the barrier layers of these metals were demonstrated to break into separate small fragments, thus offering gaps for the metals diffusion through the barrier layer [11].

To improve the morphology, the ohmic contact thermal treatment temperature was lowered to $675...725^\circ\text{C}$, this leaving unchanged the low contacts' resistance value. To fabricate low specific resistance Ti/Al/Ni/Au ohmic contacts using the traditional metallization technique, annealing is carried out at temperature over 800°C , at which the necessary thickness of TiN layer is achieved [12]. To decrease the annealing temperature and to reduce the contact resistance, a thin layer of Si is introduced into the metallization system before the first Ti layer. The silicon layer is intended to act as a dopant [13]. Annealing realized at a temperature below 700°C , the presence of the contact Si layer in the Si/Ti/Al-based composition provides for titanium silicides (TiSi_x), but not titanium nitride (TiN), formation [14].

So, the Ti layer was excluded from the metallization structure, because the role of Ti has changed: instead of nitrogen vacancies formation, reduction of Si impurity atoms concentration in the composition takes place.

Thus, for alloyed ohmic contact fabrication, the following technologic operations should be fulfilled. After mesa isolation etching, the contact composition of the ohmic contact alloyed metallization is applied onto the AlGaN/GaN heterostructure through a two-layer system. The metallization is performed by the thermal resist method in vacuum containing Si (7.5 nm) — Al (50 nm) — Ti (25 nm) — Au (50 nm). Prior to the metallization deposition, oxides are removed in $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}$ solution. After that, thermal treatment of the metallization is carried out under nitrogen, this followed with

metallization layer formation over the ohmic contacts and on top of the other parts of the heterostructure, in order to create the circuit's topological elements and the alignment markers for electron-beam lithography (EBL) of Schottky barrier gates. Ti/Au metallization is deposited by the thermal resist method in vacuum with the two-layer photoresist system.

The use of the alloyed Si/Al-based composition made it possible to improve the morphology of the ohmic contacts and to obtain contacts with the specific contact resistance values equal to those of the contacts produced using Ti/Al-based compositions ($0.35 \Omega \cdot \text{mm}$). Also, the ohmic contact composition ensures the insignificance of changes in specific contact resistance within a wide range of annealing temperatures, this enhancing the ohmic contact thermal treatment processability and reproducibility as compared to those of compositions based on Ti/Al [9, 10].

Non-alloyed ohmic contacts to gallium nitride

The most popular technology for the manufacture of non-alloyed ohmic contacts to AlGaIn/GaN heterostructures is that of highly doped GaN epitaxial regrowth in windows for the ohmic contacts with a preliminary formed mask [15]. The essence of the approach consists in a dielectric mask formation on a heterostructure, then ohmic contact-intended windows formation in the dielectric, n^+ -GaN epitaxial growing, the dielectric mask removal, and, finally, the contact's metals sputtering onto n^+ -GaN. In some versions of the technique, before the epitaxial growth, the plasma chemical treatment goes deeper through the dielectric mask, down to the two-dimensional electron gas (2DEG) level. Schematically, the formation of non-alloyed ohmic contacts with regrown n^+ -GaN is presented in the fig. 2.

Owing to the Si admixture, the degeneracy of semiconducting GaN occurs, the latter staying in the direct contact with the 2DEG region. Gallium nitride doping is carried out *via* deposition using a molecular Si source situated in the growing chamber. It is important to select the dopant concentration in the deposited GaN. On the one hand, increasing the concentration of Si (behaving as a donor admixture) provides the opportunity to increase the concentration of electrons and to reduce the contact's resistance. On the other hand, an excessive increase in Si concentration leads to a decrease in contact's conductivity, and Si atoms distribution over GaN volume becomes nonuniform, this resulting in additional defects and conglomerates formation.

The technology with highly doped GaN regrowth by molecular-beam epitaxy (MBE) was chosen for MMIC realization, since it does not involve either the plasma chemical action upon AlGaIn barrier layer at fabrication of contacts to the highly doped protective layer, or the high-temperature (over 1000 °C) activation before contact metallization. The dielectric coatings formed for the growth mask creation serve the protective layer for the active regions of the heterostructure.

Advantages of the non-alloyed ohmic contacts to the AlGaIn/GaN are their good reproducibility (the resistance depending mostly on doped GaN); good contact's morphology determined only by the roughness of the metallized surface and the man-made defects of the metallization; low resistance. The drawback of the method is the necessity to use the expensive high-technology equipment.

The introduction of the technology of non-alloyed ohmic contacts to AlGaIn/GaN heterostructures provided the opportunity to avoid the disadvantages of classical alloyed contacts. Using the non-alloyed contacts, one can avoid the high-

temperature thermal treatment of a metallization formed on the semiconductor.

Highly doped GaN deposition was carried out on the heterostructure with AlGaIn/AlN barrier layer. For masking the structure's surface, the two-layer dielectric system $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ [16] was used. The dielectrics were deposited by the plasma chemical method on the Plasmalab System 100 tool from Oxford Instruments Company with an inductively coupled plasma (ICP) source. Silicon nitride (Si_3N_4) was deposited from N_2 (10 sccm) + SiH_4 (12 sccm) gas mixture under the pressure of 8 mTorr, and ICP power of 800 W. Si_3N_4 deposition was carried out prior to the device mesa isolation. Silicon oxide (SiO_2) was deposited from N_2O (23 sccm) + SiH_4 (6 sccm) gas mixture, under the pressure of 4 mTorr, ICP power of 500 W, at 300 °C. After that, the windows for contacts were formed in the dielectric layer. This operation is usually called "opening the contact windows". To open the windows, it is necessary to form a mask of a material with etching rate lower than that of the dielectric, the other conditions being equal. Typically, the mask is formed on the photolithography area and the process consists in the application of a photoresist of needed thickness onto a working wafer with the dielectric, alignment and writing the mask image for etching the dielectric, drying the photoresist on the wafer, and, finally, the mask development and hardening. After the photoresist mask is formed, the working wafer etching is realized.

Etching the dielectric layers with the preliminary formed photoresist mask is realized by the plasma chemical method in the $\text{SF}_6 + \text{O}_2$ gas mixture on SI 500 installation.

After the removal of the photoresist mask, AlGaIn- and GaN plasma chemical etching is carried out with the formed dielectric mask in $\text{BCl}_3 + \text{Ar}$ gas mixture on the same installation. AlGaIn- and GaN etching is possible without photoresistive mask removal immediately after plasma chemical etching the dielectrics. Masking of this kind does not affect the properties of the heterostructure surface and, when combined with MBE, makes highly doped GaN growth selective: the growth takes place only in the regions where the dielectric mask was etched. Highly doped GaN deposition onto the heterostructure with the formed dielectric ohmic contact mask was performed in the MBE installation at 850 °C. In the SEM image obtained after the growth (fig. 3), one can notice that the growth occurred only in the preliminary formed windows. After the highly doped GaN deposition, the dielectric mask is removed in the buffer etchant solution ($\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_2\text{O} = 1:3:7$). Ohmic contact metallization is deposited onto the thus formed highly doped regions of GaN. With this purpose, a two-layer mask is formed using optical photolithography and the non-alloyed ohmic contact Cr/Pd/Au metallization is realized by sputtering in vacuum with the subsequent photoresist mask "explosion". The metallization system does not need thermal treatment. The sequence of operations fulfilled for non-alloyed ohmic contact fabrication is presented in the fig. 4.

The use of the technology of fabrication of non-alloyed ohmic contacts to AlGaIn/GaN heterostructure made it possible to eliminate the high-temperature treatment from the GaN-based MIC fabrication procedure and thus enabled us to preserve the high-quality contact relief for further technologic operations and also to obtain the ohmic contacts with the specific resistance of $0.15 \dots 0.2 \Omega \cdot \text{mm}$, this being a world-level achievement. Moreover, metallization of the ohmic contacts and alignment markers for EBL of Schottky gates are realized in a single metallization operation.

Formation of a gallium nitride based rectifying contact (Schottky gate) to heterostructures

As is generally known, the microwave parameters of modern field effect microwave transistors on heterotransistors are determined mostly by the gate's parameters [17]. For example, the current-amplification cutoff frequency varies inversely as the gate length L_g as ruled with the formula $f_t = G_m / 2\pi C_{gs} \approx V_{es} / L_g$, where G_m stands for transconductance, C_{gs} for gate-source capacitance, and V_{es} for electron drift velocity. For centimeter-range transistors, it is necessary that L_g be less than 0.25 μm . At the same time, according to the Fukui formula, the noise factor can be represented as $F_0 = 1 + K_f L_g \sqrt{G_m (R_g + R_s)}$, where K_f is the compensating factor and R_g and R_s are the gate's and source's resistance values, respectively. From this expression, one can estimate the requirements to the gate cross-section: provided $R_g = \rho_g W_g$ and $R_s = \rho_s / W_g$, where ρ_g and ρ_s are the specific resistance values ($\Omega \cdot \text{mm}$) of the gate and source, respectively, and W_g is the gate width, and under the assumption that $R_g = R_s$ for the optimal transistor, we will obtain $\rho_g = \rho_s / W_g^2$. So, $\rho_s = 0.2 \Omega \cdot \text{mm}$ and $W_g = 20 \mu\text{m}$ will produce $\rho_g = 500 \Omega \cdot \text{mm}$. From here it follows that in the case of usual metallization of the total thickness of 0.6 μm , the gate cross-section should not be less than 0.4 μm^2 . For lower frequencies, the wider transistors are used; consequently, the gate cross-section should be even bigger. It is evident, that a small gate length and a big cross-section can be obtained simultaneously only if the gate has a mushroom-like (or a T-like) shape. For this reason, why the task of fabrication of a mushroom-like gate set containing the gates of various lengths, to provide a wide spectrum of possible frequencies of microwave transistors and circuitry based thereon becomes topical.

Thus, fabrication of MIC amplifiers for a specific frequency range is determined by the choice of a semiconductor material and gate geometry.

Mushroom-shaped gate fabrication consists of the following key operations:

- electron-beam lithography formation for the gate's profile;
- gate metallization application;
- "lift-of" process of the e-beam resist.

Let us consider the stage of a mushroom-like profile fabrication in the resist.

After the dehydration on a hotplate at 120 $^{\circ}\text{C}$ for over 15 to 20 min, a multilayer e-beam resist system was applied onto the wafer *via* whirling and intermediate drying on the hotplate. The system consists of PMMA950K/PMGI/Copolymer/PMGI/PMMA950K layers of the total thickness of 1.3 μm . The sequence and thickness of the layers were optimized as for the independent exposition and controlled development of the mushroom-like profiles with the lower part size from 0.1 to 0.25 μm , depending on the GaN-based MIC's frequency range.

The prepared wafer was exposed in Raith150-TWO e-beam lithography writer. The upper regions of the gates (width 0.8 μm) and the gate contacts were exposed first (the first exposition). After that, three upper layers of the resist were sequentially developed in the appropriate developers (MIBK:IPS 1:1, 101A, and MIBK:IPS 1:3, respectively).

Then, the second exposition was carried out to form the lithography for the gates' "sublegs" of the needed nominal dimensions and dose completion/addition on the gates' contacts. Further two underlayers of the resist were developed.

As a result, a mushroom-like profile of the developed areas was formed in the resist. Afterwards, the photoresist oxygen-plasma stripping at the bottom of the developed regions was carried out in the plasma chemical deposition system PKhO-001T (2 min in horizontal position).

After the oxygen-plasma stripping, the necessary gate metallization was applied in a thermal vapor deposition system. Layers of Ni (60 nm) and Au (540 nm) were sputtered sequentially from tungsten boats. The metallization was "exploded" in acetone and dimethyl formamide (DMF), the latter acting as a solvent for poly (methyl glutarimide) (PMGI) layers. After rinsing the wafer in deionized water, it was passivated with the two-layer $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$ dielectric of required thickness.

Gate passivation and capacitor dielectric fabrication

Passivation is conducted in two stages: first, a dielectric film deposition onto the whole wafer area and, second, the dielectric film etching with a photoresist mask.

After the gate formation on the wafer, it was necessary to coat the wafer surface with a passivating dielectric to protect it from the environment and to reduce the skin effects. A dielectric is also used in fabrication of passive elements like capacitors. We have used the two-layer system of alumina (Al_2O_3) deposited by the atomic layer method at 300 $^{\circ}\text{C}$ and silicon nitride (Si_3N_4) obtained by plasma-enhanced chemical vapor deposition with ICP in the Plasmalab System 100 tool. The dielectric deposition was realized in monosilane (SiH_4 , 12 sccm) mixture with nitrogen (N_2 , 11 sccm), with the inductively coupled plasma source power of 800 W, under the pressure of 8 mTorr, and at the temperature of 300 $^{\circ}\text{C}$. In these conditions, the dielectric thickness was provided that was needed for the capacitors' capacity meet the requirements specified for MICs under development. To ensure the required deposited substance migration over the surface, the substrate temperature was 300 $^{\circ}\text{C}$.

It should be pointed out that the film quality strongly depends on many deposition parameters such as the kind of reactor, gases used, substrate's material and temperature, pressure in the chamber, microwave power, distance between the electrodes, partial pressure of the reagents, pump speed, and the electrodes' material and geometry.

And so, to obtain films of desired quality, it is necessary to solve a multicriterion problem. As a rule, the dielectric deposition parameters are adjusted until the produced dielectric film meets the necessary requirements.

While in a case of semiconductor's surface passivation only the plane of the semiconductor should be coated with a dielectric, at gate passivation, good conformity is to be ensured for the dielectric film to cover evenly the top and the underneath of a mushroom-shaped gate's "hat". The atomic layer deposition of dielectric films provides for the necessary conformity and requires thin layers about 10-nm thick to be deposited for the surface passivation. To ensure the capacitors' parameters (breakdown voltage- and capacitance values), Si_3N_4 layer of the needed thickness (usually of the order of 0.1...0.3 μm) is deposited over the Al_2O_3 layer. A microphotography of a sample of a gate with $L_g \sim 250 \mu\text{m}$ obtained after the passivation is presented in the fig. 5.

After the continuous dielectric film fabrication, they proceed to a photoresist window mask formation for plasma chemical removal of the dielectric from the wafer, except from the regions of active domain passivation and those of the future capacitors fabrication. The plasma-originating medium in the reactor should provide for the necessary etch rate, -se-

lectivity and — anisotropy. It is well known that fluorine-containing gases are used for etching silicon and its compounds: these gases are mostly halogen-containing carbon compounds known under the DuPont brand name "Freon". The drawbacks shared by the members of this group of etchants are the possibility of toxic compounds formation in the course of etching, propensity to polymerize, and the possibility of elemental carbon formation on the surface under treatment (particularly true for the simple representatives of the Freon family). To suppress two last effects, they often add oxygen to a working gas. From the other fluorine-containing gases, attention is to be paid to sulfur hexafluoride SF₆; the use of this gas makes it possible to reach a high etch rate without the hard products of the initial gas decomposition deteriorating the surface. Pure fluorine is practically never used because of its high toxicity and chemical activity, as regards the structural materials of the technological equipment.

To etch the two-layer dielectric, the plasma chemical etching system SI 500 was used; for Si₃N₄ etching, SF₆ (15 sccm) + O₂ (4 sccm) medium under the working pressure of 6.2 Pa was applied, ICP source power was 200 W. For the subsequent etching with the same Al₂O₃ photoresist mask, BCl₃ (7 sccm) medium with Ar (14 sccm) was used under the working pressure of 1 Pa, ICP source power of 800 W, and the microwave power of 20 W. One should keep in mind that to be quite sure if the dielectric stripping *via* plasma chemical etching is complete, a little "over-etch" is necessary.

The "over-etch" is needed because of:

- nonuniformity of the dielectric layer thickness over the substrate (10 % of thickness);
- nonuniformity of the dielectric etch rate (5 % of thickness).

When the passivation is completed, the photoresist mask is removed from the plate and the lithography for the "explosion" is made for the first metallization layer fabrication.

So, the following technologic operations should be performed for the gate passivation and capacitor's dielectric fabrication: Al₂O₃ film layering by the atomic-layer deposition; Si₃N₄ film plasma chemical deposition; photolithography of passivation windows and future capacitors; Si₃N₄ and Al₂O₃ layers sequential plasma chemical etching; photoresist mask removal.

In the domain between the ohmic contacts the only Al₂O₃ layer is enough for the gate passivation, and this is also the way to minimize the gate-drain/source parasitic capacitances.

The use of SiN_x/AlGaIn/GaN heterostructures, when SiN_x passivation layer *in situ* deposition is carried out after the structure growth directly in the growing chamber, makes it possible to use the dielectric as a Schottky gate passivator. For the structures of that kind, the task is the dielectric removal from the region of the gate fabrication. For transistors with Schottky gates fabricated *via* SiN_x dielectric growth in the same growing chamber with the heterostructure no additional passivation is needed. The *in situ* use of SiN_x promotes an increase in the majority carrier concentration, due to the charge neutralization at the surface *via* passivation; it also favors relaxation reduction and a decrease in the number of defects and in the AlGaIn surface roughness. Besides, the *in situ* SiN_x film serves as the surface protective layer [18]. After the gate fabrication, dielectric deposition is necessary only for MIC's capacitors fabrication. The mentioned passivation is used in the alloyed ohmic contact technique, since in the non-alloyed technique the passivating *in situ* SiN_x layer is weared away in a liquid etchant along with the dielectric mask for highly doped GaN growing.

First metallization level and capacitors' top plates fabrication

After passivation fabrication, a two-layer photoresist mask is created on the wafer, after which the wafer substrate is stripped and subject to metal deposition.

Stripping is carried out directly before the deposition operation in the plasma chemical etching system SI 500 in Ar medium (50 sccm) under the pressure of 2 Pa in the combined reactive ion etching (RIE) mode in ICP. Bottom electrode bias was 50 V. To avoid the photoresist mask overheating, the process was realized in a cyclic mode. A cycle comprised 20-s etching under Ar and a 3-min pause. The cycle was repeated 4 times. Stripping prior to vacuum deposition provides for better metal-to-metal adhesion. After stripping, the wafer is placed into an installation for thermal resist vacuum deposition, where Ti (50 nm)/Au (500 nm) metal layers are deposited, titanium forming the adhesion layer and gold serving the contact material. After the deposition, the photoresist is "exploded" and the necessary measurements are conducted in testing modules.

Electrical component interconnects fabrication in the form of "air bridges"

The second metallization level interconnecting the elements on a substrate is performed in the form of "air bridges". Taking into account that the total bridge thickness should be 3 μm (gold plate thickness is 2.3 μm), it is extended by the gold plating. First, a photolithography of a bridge resist determining the bridge's height is created, after which the patterned photoresist is subject to thermal treatment, this leading to photoresist edges fritting and formation of a mildly sloping margin necessary for metal seed layer continuous sputtering. After that, Ti/Au/Ti (50 nm/500 nm/20 nm) seed layer was sputtered by the thermal resist method. To enhance the adhesion, prior to the seed layer sputtering, stripping is performed in Ar in the plasma chemical etching system SI 500 following the procedure described above. Photolithography for gold-plate building-up is made over the seed layer. To form a gold buildup, the gold-plating system Valenza 2400V2 was used under a hood. The unnecessary regions of the seed layer on the photoresist were removed by wet chemical etching (WCE). The final operation of "air bridge" formation was stripping the resist from under the bridge regions of the substrate wafer.

Thus, the interlayer isolation is achieved using 2-μm high and 3-μm thick "air bridges". The image of an "air bridge" is presented in the fig. 6.

Fabrication of electrical interconnects for a common ground provision

For common electrodes (mostly the ground ones) they use coplanar strips, a common bottom electrode on the backside of the substrate, or an additional electrical connection level over the isolation layer on the face of the substrate.

In the course of development of AlGaIn/GaN heterostructure-based MICs on SiC and Al₂O₃ substrates for cm- and mm wavelength ranges, it has been shown by the preliminary research that creation of MICs of this type on the basis of coplanar technology would be rather difficult, taking into account problems with making stable the systems of this sort and the existence of frequency-dependent phase incursions in common conductors/wires. It shows already at amplification enhancement and increasing the output power of power amplifiers' (PAs') MICs. Foreign producers use mainly the microstrip technology for AlGaIn/GaN heterostructure-based MIC fabrication, which implies through holes etching in the sub-

strate. This is associated, though, with considerable technological difficulties. Finding a solution to the problem can be, to some part, facilitated by passage to the heterostructures on silicon substrates, but these heterostructures are being studied yet.

As a result, a design- and engineering solution to the problem was found; it consisted in creation of a ground plane above the face of a wafer bearing the ready-made active and passive microwave components over the 10- to 15- μm thick polymer dielectric layer (a photo lacquer developed at the Institute of Macromolecular Compounds RAS). The corresponding elements are grounded through the holes in the photo lacquer layer. At the same time, the photo lacquer plays the role of protective passivation. The lacquer is a composition comprising a precursor of a highly thermostable polymer (an analog of a polyimide) and a photosensitive component of type quinone diazide used in ordinary FP 383 and FP 051 positive photoresists. Photo lacquer application does not require any special equipment. It can be used in a standard lithography system with an arc mercury lamp.

A pattern for the additional electrical connection layer providing the common ground and the whole circuit protection has been developed, taking into account recommendations of the photo lacquer developers.

The first photo lacquer layer is applied by whirling onto a substrate with the ready circuits; after that, blanket exposure and hardening are performed stepwise in a static furnace under nitrogen: 15 min at 150 °C, 15 min at 200 °C, 15 min at 250 °C, and 30 min at 350 °C. In this way, the first adhesion 2- μm photo lacquer layer is formed. Relief blanket exposure without a pattern/mask is necessary for the photosensitive component decomposition, or, upon the fabricated microrelief thermal hardening, film swelling might occur or holes (fish eyes) might appear because of photosensitive compound decomposition with nitrogen release at hardening temperature.

After that, two lacquer layers are applied again (also by whirling) to fabricate the isolation layer of needed total thickness (12 to 15 μm). Photo lacquer alignment/registration and exposure is realized on the precision contact photolithography system SUSS MJB4 IR. The development is carried out using 0.3 % aqueous solution of potassium hydroxide. Next, stepwise hardening is conducted in the inert nitrogen medium following the procedure described above.

Complete sputtering of the photo lacquer surface bearing the fabricated relief with Ti/Au (50 nm/500 nm) metallization is realized on a system for vacuum deposition by the thermal resist method. Sputtering is preceded with photo lacquer windows plasma chemical stripping, in order to remove the lower hardened adhesion layer. Stripping is carried out on SI 500 plasma chemical etching system in O_2 medium, with subsequent control with an optic microscope. Thus, the common-ground electric contact lying on a nonconductive material and interconnecting the electrodes through the windows in the photo lacquer layer is fabricated.

Over the sputtered metal, a photolithography is made to remove excess metallization on the photo lacquer surface. Using this photolithographic mask, the unprotected metallization is removed by wet chemical etching. The fabricated pattern of the "top ground" metallization is thickened *via* gold plating. To remove the photo lacquer from the "cutting/dicing" lines and contact pads, the photo lacquer is etched plasma chemically with the fabricated metal mask in O_2 medium on SI 500 system.

After the electrical interconnect fabrication, the route of the GaN-based MIC's "face" part fabrication is finished. This operation is followed by the wafer's backside chemical me-

chanical polishing in Logitech PM5 system, dicing by controlled laser thermal cleavage, irregular dies rejection, and planting onto a heatsink using a thermal interface. The main stages of the engineering route of MIC's "face" part fabrication are presented in a diagram form in the fig. 7.

Realization of GaN based MIC fabrication technology in topological solutions for cm- and mm frequency ranges

The above production technology has been introduced at IUHFSE RAS and used for fabrication of a wide range of MICs for various frequency ranges up to 70 GHz [19–25].

In particular, a single-stage 8–12 GHz power amplifier (PA) is designed and fabricated. There are certain difficulties in single-stage PA development related to the circuit stability and necessity to achieve high gain- and power performances of the single cascade. In this respect, the cascode configuration of transistor connection possesses the unique capabilities and the configuration is especially promising in GaN technology. Among the cascode configuration's advantages are an increase in energy efficiency and reduction of power consumption. As far as we know, a GaN-based MIC of this configuration has not been earlier fabricated in Russia.

The outlook of the fabricated PAs MICs chip after all manufacture operations is presented in the fig. 8. The transistors' gate length is 0.25 μm with a total width of 6.4 mm. The amplifiers are fabricated on a AlGaN/AlN/GaN heterostructure on a sapphire substrate. Chip dimensions are 1.57 \times 1.71 mm. For measurements conduction, the samples were mounted on a heatsink into the accessory shown in the fig. 9. Output power measurements were carried out in the pulsed power mode: at pulse duration of 1 μs , the off-duty ratio equal to 100, and the supply voltage up to 50 V. At the supply voltage of 50 V, the linear output power (P_{out}) reaches 3 W, this corresponding with 34.8 dBm, in accordance to the formula $P_{dBm} = 10 \cdot \log_{10}(P_{mW})$. The current consumption is below 0.8 A, the gain (K_p) is about 15 dB (fig. 10).

Development of MMICs set with the working frequencies of 57–64 GHz on a sapphire substrate [26–30] is an example of the above production technology application in the millimeter wavelength range. The set comprises a voltage-controlled oscillator (VCO), a balanced mixer, a millimeter-wave amplifier, an intermediate-frequency amplifier (IFA), and an antenna. Besides, the amplifiers with integrated receiving and transmitting antennas are fabricated, as well as versatile receiving and transceiving signal converters comprising VCO, mixer and IFA (system-on-chip) (fig. 11–15). As far as the authors know, this is the first time such multifunction gallium-nitride signal converters chips on sapphire substrates have been fabricated anywhere in the world.

Millimeter-wave amplifier's MMIC may serve as a low-noise amplifier (LNA) or a power amplifier, depending on the bias. The amplifier has 4 stages. The gate length is 0.14 μm . At the small-signal mode, the gain is 15 dB or higher with the noise figure of about 6 dB and current consumption of less than 100 mA (fig. 16). At large-signal operation in the pulsed power mode, the output power reaches 100 mW (20 dBm) with the gain up to 20 dB and current consumption not exceeding 200 mA (fig. 17). The linear output power is 30–50 mW.

The output power of VCO is 30 to 40 mW. Frequency tuning range more than 3 GHz. The oscillation frequency stability against the supply voltage is no worse than 200 MHz/V at the supply voltage of 10 V (fig. 18).

Versatile receiving and transceiving signal converters MMICs have typical conversion gain of plus 10 dB at the sup-

ply voltage up to 10 V and current consumption below 150 mA. The transmitting channel's output power is 10 mW or more.

The MMICs of the mm-range amplifier and receiving signal converter were given the following reference designations:

- LNA without an antenna: 5411UV01N;
- LNA integrated with an antenna on a single chip: 5411UV01AN;
- PA without an antenna: 5411UV02N;
- PA integrated with an antenna on a single chip: 5411UV02AN;
- signal converter MMIC comprising a mixer, VCO and IFA on a single chip: 5411NS01N.

The directory page of the MMIC set is available at the IUHFSE RAS homepage <http://isvch.ru> in the section "Developments".

Conclusion

The use of GaN-based monolithic integrated circuits technology made it possible to realize the engineering solutions for centimeter- and millimeter wave PA, LNA, VCO and IFA comparable to the foreign analogs with respect to their performance. The gate length of T-shaped gates is 0.14 μm for mm-wave and 0.25 μm cm-wave transistors.

The MICs can be used in car radars, radio locating devices, and high-rate channels of ground-based and satellite communications.

The research was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Grant Agreement no. 14.607.21.0011; the unique identifier of the Project: RFMEFI60714X0011).

References

1. Bessemulen A., Dadello A., Harvi D. i dr. Sozdanie vysokoeffektivnykh usilitel'ev Ka i H diapazonov, *Komponenty i tehnologii*, 2008, no. 87, pp. 10–14 (in Russian).
2. Fedorov Yu. V., Mikhaylovich S. V. Vliyanie parametrov nanogeterostruktury i tehnologii izgotovleniya na shumovye svoystvo AlGaIn/GaN HEMT, *Nano- i mikrosistemnaya tehnika*, 2014, no. 10, pp. 12–17 (in Russian).
3. Fedorov Yu. V., Mikhaylovich S. V. Nitridnye HEMT protiv arsenidnykh: Poslednjaya bitva? *Izvestiya vuzov. Materialy jelektronnoy tehniki*, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 16–22 (in Russian).
4. Galiev R. R., Gnatyuk D. L., Zuev A. V. i dr. Nitridnye tehnologii dlja osvoeniya millimetrovogo diapazona dlin voln, *Nano- i mikrosistemnaya tehnika*, 2015, no. 2, pp. 21–32 (in Russian).
5. Fedorov Yu. V., Mikhaylovich S. V. Perspektivy zameny arsenidnykh MIS na nitridnye, *Nano- i mikrosistemnaya tehnika*, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 217–226 (in Russian).
6. Pavlov V. Yu., Pavlov A. Yu., Slapovskij D. N. i dr. Vliyanie metodov formirovaniya omicheskikh kontaktov na chastotnye harakteristiki polevykh tranzistorov na geterostrukturah AlGaIn/GaN, *Fundamental'nye problemy radioelektronnoy priborostroeniya*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 53–56 (in Russian).
7. Lei M., Adeni K. F., Chang Z., et al. Comparison of Different GaN etching techniques, *Proceedings of the CSMANTECH Conference, Vancouver, British Columbia, Canada*, april 24–27, 2006, pp. 105–108.
8. Pavlov V. Yu., Pavlov A. Yu. Tehnologiya splavnykh i nesplavnykh omicheskikh kontaktov k geterostrukturam na osnove GaN. Obzor, *Nano- i mikrosistemnaya tehnika*, 2016, vol. 18, no. 10, pp. 635–644 (in Russian).
9. Slapovskij D. N., Pavlov A. Yu., Pavlov V. Yu., Klekovkin A. V. Splavnye omicheskije kontakty na osnove Si/Al k nitridnym geterostrukturam AlGaIn/GaN, *Fizika i tehnika poluprovodnikov*, 2017, vol. 51, no. 4, pp. 461–466 (in Russian).
10. Slapovskij D. N., Pavlov A. Yu., Pavlov V. Yu., Klekovkin A. V. Issledovanie morfologii splavnykh omicheskikh kontaktov s kontaktnym sloem kremniya k geterostrukture AlGaIn/GaN, *Fundamental'nye problemy radioelektronnoy priborostroeniya*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 77–80 (in Russian).

11. Yoon S., Song Y., Lee S. M., et al. Localized TiSi and TiN phases in Si/Ti/Al/Cu Ohmic contacts to AlGaIn/GaN heterostructures, *Semiconductor Science and Technology*, 2016, no. 31, pp. 055002.
12. Mohammed F. M., Wang L., Adesida I. Differences in the reaction kinetics and contact formation mechanisms of annealed Ti/Al/Mo/Au Ohmic contacts on n-GaN and AlGaIn/GaN epilayers, *Journal of Applied Physics*, 2007, vol. 101, no. 1, pp. 013702.
13. Guodong G., Shaobo D., Yuanjie L., et al. Low ohmic contact AlN/GaN HEMTs grown by MOCVD, *Journal of Semiconductors*, 2013, vol. 34, no. 11, pp. 114004.
14. Liu Y., Singh S. P., Kyaw L. M., et al. Mechanisms of Ohmic Contact Formation and Carrier Transport of Low Temperature Annealed Hf/Al/Ta on $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}/\text{GaN-on-Si}$, *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2015, vol. 4, no. 2, pp. 30–35.
15. Pang L., Kim K. Analysis of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors with nonalloyed Ohmic contacts achieved by selective area growth using plasma assisted molecular beam epitaxy, *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, 2014, vol. 4, no. 2, pp. 08–13.
16. Arutjunjan S. S., Pavlov A. Yu., Pavlov V. Yu. i dr. Dvuhslonjnaja dijelektricheskaja maska $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ dlja sozdaniya nizkoomnykh omicheskikh kontaktov k AlGaIn/GaN HEMT, *Fizika i tehnika poluprovodnikov*, 2016, vol. 50, no. 8, pp. 1138–1142 (in Russian).
17. Mokerov V. G., Kuznecov A. L., Fedorov Yu. V. i dr. Al-GaN/GaN-SVCh HEMT-tranzistory s probivnym napryazheniem vyshhe 100 V i s predel'noj chastotoj usileniya po moshhnosti f max do 100 GGc, *Fizika i tehnika poluprovodnikov*, 2009, vol. 43, no. 4, pp. 561–567 (in Russian).
18. Tomosh K. N., Pavlov A. Yu., Pavlov V. Yu. i dr. Issledovanie processov izgotovleniya HEMT AlGaIn/AlN/GaN c passivaciej Si_3N_4 in situ, *Fizika i tehnika poluprovodnikov*, 2016, vol. 50, no. 10, pp. 1434–1438 (in Russian).
19. Fedorov Yu. V., Maytama M. V. Topologija IMS "Integral'nyj usilitel' moshhnosti dlja diapazona chastot 8–12 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii no. 2016630104 ot 19.08.2016 (in Russian).
20. Fedorov Yu. V., Maytama M. V. Topologija IMS "Integral'nyj maloshumjashhij usilitel' dlja diapazona chastot 8–12 GGc", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii no. 2016630103 ot 19.08.2016 (in Russian).
21. Fedorov Yu. V., Maytama M. V. Topologija IMS "Integral'nyj SVCh pereklyuchatel' 1h2 dlja diapazona 4–18 GGc v koplanarnom ispolnenii", Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii no. 2016630003 ot 11.01.2016 (in Russian).
22. Maltsev P. P., Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L. i dr. Integral'nyj anten'nyj jelement so vstroennym maloshumjashhim usilitelem dlja diapazona 57–64 GGc. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2013630159 ot 06.11.2013 (in Russian).
23. Maltsev P. P., Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L. i dr. Preobrazovatel' signala dlja diapazona 57–64 GGc. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2013630171 ot 05.12.2013 (in Russian).
24. Maltsev P. P., Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L. i dr. Integral'nyj anten'nyj jelement so vstroennym usilitelem moshhnosti dlja diapazona 57–64 GGc. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2015630131 ot 02.12.2015 (in Russian).
25. Maltsev P. P., Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L. i dr. Integrirovannyj priemo-peredajushhij modul dlja diapazona chastot 57–64 GGc. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii № 2016630080 ot 12.07.2016 (in Russian).
26. Fedorov Yu. V., Maltsev P. P., Matveenko O. S. i dr. MIS usilitel'ev so vstroennymi antennami SVCh-diapazona na nanogeterostrukturah, *Nanoindustrija*, 2015, no. 3, pp. 44–51 (in Russian).
27. Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L., Bugaev A. S. i dr. Razrabotka monolitnykh integral'nykh shem dlja Ka-, V- i W-diapazonov na osnove nitrida gallija, *Mikroelektronika*, 2016, vol. 45, no. 2, pp. 135–143 (in Russian).
28. Fedorov Yu. V., Maltsev P. P., Gnatyuk D. L. i dr. Sozdanie SVCh monolitnykh IS 5-millimetrovogo diapazona dlja primeniya v perspektivnykh KS, *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informacionnye sistemy*, 2016, no. 2, pp. 73–78 (in Russian).
29. Krapukhin D. V., Maltsev P. P. Monolitnaja integral'naja shema maloshumjashhego usilitelja na nitride gallija dlja diapazona 57–64 GGc, *Rossijskij tehnologicheskij zhurnal*, 2016, vol. 4, no. 4, pp. 42–53 (in Russian).
30. Maltsev P. P., Fedorov Yu. V., Gnatyuk D. L. i dr. Monolitnaja integral'naja shema GUN V-diapazona, *Nano- i mikrosistemnaya tehnika*, 2016, vol. 18, no. 10, pp. 645–648 (in Russian).