

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ СВЧ pHEMT-ТРАНЗИСТОР НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР GaAs X- И Ku-ДИАПАЗОНОВ

М.В.Драгут****, Б.И.Селезнев**

INTEGRATED MICROWAVE pHEMT TRANSISTOR BASED ON GaAs X AND Ku BAND HETEROSTRUCTURES

M.V.Dragut****, B.I.Seleznev**

*АО «ОКБ-Планета», Великий Новгород, dragutmv@okbplaneta.ru

**Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Boris.Seleznev@novsu.ru

Рассматривается технологический цикл изготовления активного элемента pHEMT-транзистора с длиной затвора 0,25 мкм в составе СВЧ монолитной интегральной схемы на арсениде галлия. Основной областью применения этой технологии является проектирование монолитных интегральных схем с рабочими частотами до Ku-диапазона (18 ГГц). Разработаны требования к уровню основных параметров интегрального pHEMT-транзистора. В качестве исходной гетероструктуры выбрана pHEMT-структура с двухсторонним наполнением канала электронами — DpHEMT-структура, обеспечивающая низкие значения коэффициента шума и высокий уровень удельной выходной СВЧ-мощности. Рассмотрены способы формирования металлизации Т-образного затвора, улучшающие адгезию наносимой в дальнейшем пассивирующей пленки SiO₂. Проведен анализ конструкций подзатворных канавок СВЧ pHEMT-транзисторов. Методами ИК Фурье-спектроскопии исследована структура низкотемпературных плёнок SiO₂, полученных химическим осаждением из газовой фазы. Для устранения дефицита по кислороду в пленках использовался фотонный отжиг. Омические контакты на пластине создавались при помощи «взрывной» литографии после процесса вакуумного напыления необходимой системы металлов AuGe/Mo/Au/Mo. Данная система металлизации, включающая Mo, в отличие от систем на основе Ni, обладает рядом преимуществ. Разработанные транзисторы для СВЧ монолитных интегральных схем маломощных усилителей и усилителей мощности Ku-диапазона удовлетворяют требуемому уровню основных параметров интегрального pHEMT-транзистора на арсениде галлия.

Ключевые слова: монолитная интегральная схема, pHEMT-транзистор, арсенид галлия, гетероструктура, технология, параметры

Для цитирования: Драгут М.В., Селезнев Б.И. Интегральный СВЧ pHEMT-транзистор на основе гетероструктур GaAs X- и Ku-диапазонов // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2022. №3(128). С.84–90. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).84-90](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).84-90)

The technological cycle of manufacturing an active element of a pHEMT transistor with a gate length of 0.25 μm as part of a microwave monolithic integrated circuit based on gallium arsenide is considered. The main area of application of this technology is the design of monolithic integration circuits with operating frequencies up to the Ku-band (18 GHz). The requirements for the level of the main parameters of the integrated pHEMT transistor have been developed. As the initial heterostructure, we chose a pHEMT structure with two-sided filling of the channel with electrons that is a DpHEMT structure providing low noise figure and a high level of specific output microwave power. The methods of forming the metallization of a T-shaped gate, which improve the adhesion of a passivating SiO₂ film deposited later, have been considered. An analysis of the structures of the gate grooves of microwave pHEMT transistors has been carried out. The structure of low-temperature SiO₂ films obtained by chemical vapor deposition has been studied by Fourier-transform infrared spectroscopy. Photon annealing was used to eliminate the oxygen deficiency in the films. Ohmic contacts on the plate were created using lift-off lithography after the process of vacuum deposition of the required AuGe/Mo/Au/Mo metal system. This metallization system, which includes Mo, in contrast to systems based on Ni, has several advantages. The developed transistors for microwave monolithic integrated circuits of low-noise amplifiers and Ku-band power amplifiers satisfy the required level of the main parameters of the integral pHEMT gallium arsenide transistor.

Keywords: monolithic integrated circuit, pHEMT transistor, gallium arsenide, heterostructure, technology, parameters

For citation: Dragut M.V., Seleznev B.I. Integrated microwave pHEMT transistor based on GaAs X and Ku band heterostructures // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2022. №3(128). P.84–90. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3\(128\).84-90](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2022.3(128).84-90)

1. Введение

Наиболее сложными изделиями полупроводниковой СВЧ микроэлектроники являются монолит-

ные интегральные схемы (МИС), выполняющие различные функции обработки электрических сигналов (усиление, ослабление, фильтрация, ограничение и т.д.). Более того, производство современной аппаратуры

без их использования в принципе невозможно, поскольку только применение МИС вкупе с передовыми методами сборки позволяет её миниатюризировать и снизить себестоимость [1]. В настоящее время большое внимание уделяется полному освоению X- и Ku-частотных диапазонов 8-18 ГГц, как в гражданских, так и в специальных системах, поэтому задача разработки технологии производства соответствующих СВЧ МИС приоритетна и важна.

Создание МИС СВЧ, способных функционировать в условиях воздействия специальных факторов, а также их последующее массовое воспроизводство являются актуальными задачами в связи с развитием спутниковых систем на базе активных фазированных решёток (АФАР) [2].

Большое распространение получили технологии изготовления СВЧ МИС на основе гетероструктур GaAs с высокой подвижностью носителей (HEMT). Псевдоморфные (pHEMT) и метаморфные (mHEMT) GaAs-технологии обеспечивают наилучший компромисс между электрическими характеристиками МИС и их стоимостью [3].

2. Технология и параметры pHEMT-транзистора

Типовой профиль структуры СВЧ МИС (её конструкция) показан на рис.1, она имеет следующие основные отличительные особенности:

- два уровня металлизации с изоляцией друг от друга при помощи воздушных мостов;
- активный элемент — pHEMT-транзистор с длиной затвора 0,25 мкм;
- заземление элементов интегральной схемы при помощи сквозных металлизированных отверстий;
- толщина кристалла — 100 мкм.

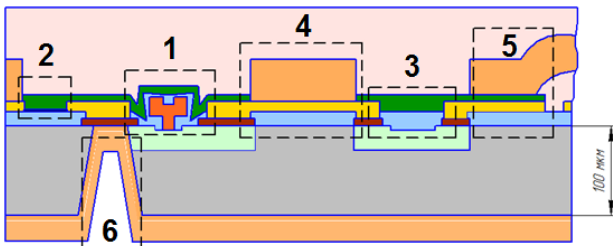


Рис.1. Структура СВЧ МИС: 1 — pHEMT-транзистор с субмикронным Т-образным затвором (в данном случае длина затвора $L_g = 0,25$ мкм); 2 — резистор на основе тонкой плёнки резистивного сплава; 3 — тонкопленочный полупроводниковый резистор; 4 — интегральная линия передачи; 5 — МДМ-конденсатор; 6 — интегральный элемент заземления (металлизированные отверстия)

Если воспользоваться общепринятым условным обозначением, распространённым за рубежом, технологию изготовления СВЧ МИС со структурой, приведённой на рис.1, можно записать как 0,25 pHEMT 2 MI (2MI — 2 metal interconnect).

Разрабатываемая технология интегрального полевого транзистора с длиной затвора 0,25 мкм («четвертьмикронная технология») обеспечивает работоспособность СВЧ МИС до частот 30–40 ГГц. Однако в соответствии с современными схемотехническими представлениями и требованиями, высказываемыми наиболее квалифицированными раз-

работчиками, основная область применения этой технологии при проектировании различных типов усилителей — это МИС с рабочими частотами до Ku-диапазона 18 ГГц. Поэтому при проведении оценочных расчетов частота 18 ГГц принимается как максимальная рабочая.

Для использования в качестве активного элемента в СВЧ МИС маломощных усилителей (МШУ) и усилителей мощности (УМ) Ku-диапазона, pHEMT-транзистор должен удовлетворять следующему минимальному набору требований, (см. табл.).

Требуемый уровень основных параметров интегрального pHEMT-транзистора

№	Название параметра	Буквенное обозначение	Требуемое значение
1.	Максимальный выходной ток	$I_{си}^{max}$	Более 550 мА/мм
2.	Пробивное напряжение затвор / сток	$U_{з/с}^{пр}$	Более 12 В
3.	Пробивное напряжение затвор / исток	$U_{з/и}^{пр}$	Более 12 В
4.	Граничная частота	f_t	$f_t > 3 * f_{раб}^*$ ($f_t > 54$ ГГц)
5.	Максимальная частота генерации	f_{max}	$f_{max} > 5 * f_{раб}^*$ ($f_{max} > 90$ ГГц)
6.	Минимальный коэффициент шума ($f = 12$ ГГц)	$K_{ш мин}$	Не более 0,8 дБ
7.	Оптимальный коэффициент усиления по мощности ($f = 12$ ГГц)	$K_{ур опт}$	Более 12 дБ

Примечание: рабочая частота — $f_{раб}$ в данном случае, это максимальное значение частоты Ku-диапазона.

Указанный в таблице уровень основных статистических параметров — $I_{си}^{max}$, $U_{з/с}^{пр}$, $U_{з/и}^{пр}$ — требуется для получения необходимого значения выходной мощности, которую можно оценить с помощью следующей формулы (*):

$$P_{вых} = \frac{1}{8} \times I_{си}^{max} \times (U_{п} - U_{си}^{нас}), \quad (*)$$

где $P_{вых}$ — выходная мощность, Вт; $U_{п}$ — напряжение питания, В; $U_{си}^{нас}$ — напряжение насыщения, В.

Указанные в таблице значения характеристических частот pHEMT-транзистора f_t и f_{max} , а также нормы $K_{ш мин}$ и $K_{ур опт}$ необходимы для обеспечения работоспособности усилителей в X-, Ku-диапазонах частот при приемлемом количестве усилительных каскадов с заданным уровнем шумовых параметров.

Структура интегрального pHEMT-транзистора, которая обеспечивает получение необходимого набора параметров, указанного в таблице, приведена на рис.2.

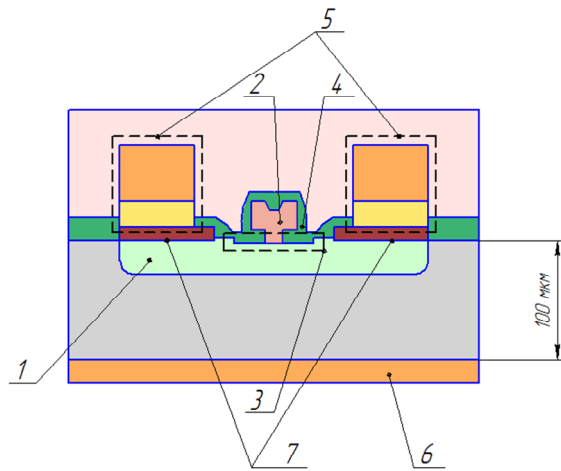


Рис.2. Структура интегрального рНЕМТ-транзистора: 1 — рНЕМТ-гетероструктура, выращенная на полуизолирующей подложке GaAs; 2 — Т-образный субмикронный затвор; 3 — подзатворная канавка; 4 — пассивирующая диэлектрическая плёнка; 5 — система металлизации лицевой стороны, состоящая из двух уровней; 6 — система металлизации обратной стороны; 7 — омические контакты стока и истока

рНЕМТ-гетероструктура (рис.2, п.1) является основой транзистора. Именно её конструкция и качество во многом определяют предельно достижимый уровень СВЧ-параметров транзисторов ($K_{ш}$, $K_{ур}$, $P_{вых}$) и однородность их характеристик по пластине. Существует только один метод производства (роста) таких структур — молекулярно лучевая эпитаксия (МЛЭ). Для реализации полевых GaAs-транзисторов, обладающих благоприятным сочетанием приемлемо низкого значения коэффициента шума и высокого уровня удельной выходной СВЧ-мощности, наиболее оптимальным вариантом исходной гетероструктуры будет рНЕМТ структура с двухсторонним наполнением канала электронами — DрНЕМТ структура (double channel pseudomorphic high electron mobility transistor) [4,5]. В современных серийно выпускаемых рНЕМТ-транзисторах объемное легиро-

вание используется редко — проводится планарное дельта-легирование донорами слоя, выращиваемого над слоями спейсера и канала, что позволяет получить большие величины μ_e и n_s . В целях достижения еще большей проводимости канала для увеличения ширины динамического диапазона и линейности транзисторов используется двойное (двухстороннее) дельта-легирование структуры донорной примесью. При таком легировании дельта-слои примеси формируются в процессе роста структуры как выше, так и ниже слоя канала, при обязательном введении промежуточных слоев нелегируемых спейсеров (в DрНЕМТ-структурах).

Применение подобного типа структур позволяет поднять поверхностную концентрацию двумерного электронного газа в канале транзистора до значений примерно $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, а это, в свою очередь, приводит к увеличению максимального выходного тока транзисторов до требуемых значений (см. табл.) и, соответственно, позволяет повысить уровень удельной СВЧ выходной мощности.

Т-образный затвор рНЕМТ-транзистора (в литературе иногда используется термин «грибообразный») состоит из двух частей — верхней (шляпка) и нижней (ножка) (рис.2, п.2) [6]. Размеры нижней части (длина затвора, L_g) определяют частотные свойства транзистора и являются важнейшим показателем уровня технологии. Широкая верхняя часть необходима для минимизации паразитного сопротивления затвора, что позволяет существенно улучшить усилительные и шумовые характеристики транзисторов. Для получения необходимого уровня СВЧ-параметров в X- и Ku-диапазонах длина затвора рНЕМТ-транзистора должна быть не более 0,25 мкм. Это позволяет выполнить требования по значениям $K_{ш}$ и $K_{ур \text{ опт}}$, а также величинам характеристических частот транзистора f_i и f_{max} , указанным в таблице. Профильная технологическая схема формирования Т-образного затвора рНЕМТ-транзистора приведена на рис.3.

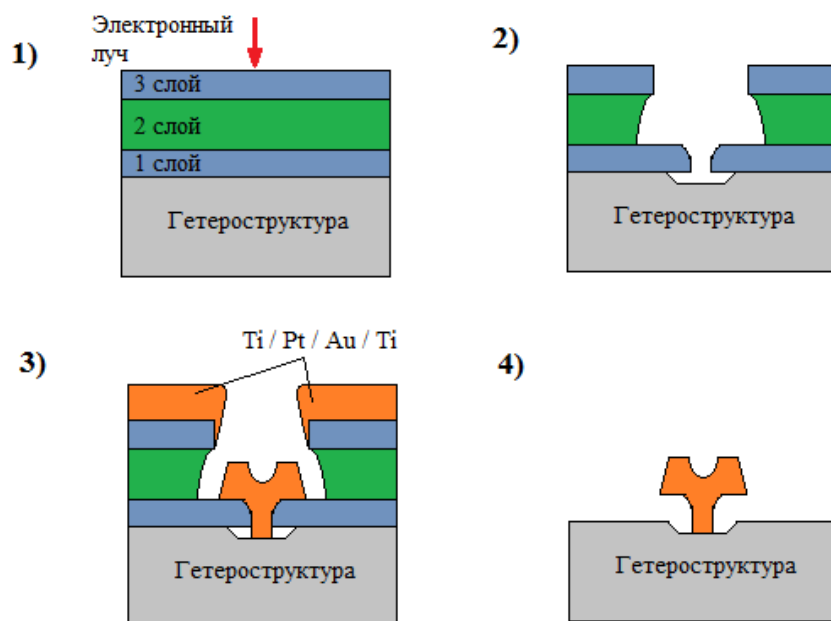


Рис.3. Профильная схема формирования субмикронного Т-образного затвора рНЕМТ-транзистора

Как видно из рис.3, Т-образный затвор полевого транзистора с субмикронной ножкой создаётся при помощи двух процессов:

— формирования специальной трёхслойной резистивной маски с необходимым профилем при помощи электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ) (рис.4 — фото с растрового электронного микроскопа (РЕМ));

— вакуумным напылением системы металлов на пластину с резистивной маской и последующим удалением слоя металлизации, напылённого на электронный резист в органическом растворителе (взрывная литография, или lift off).

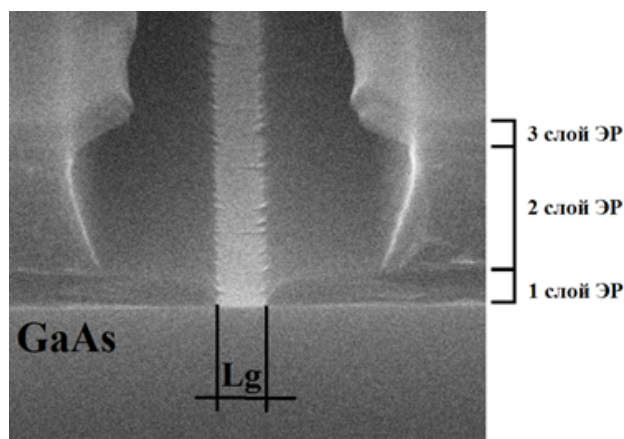
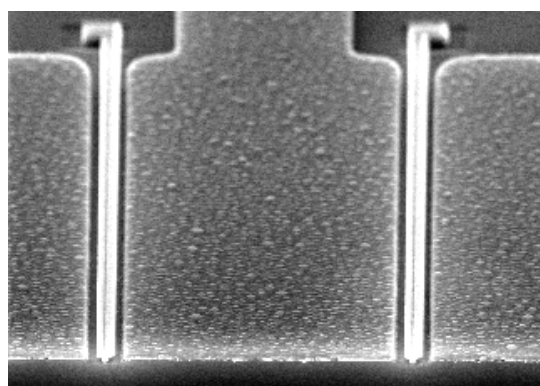


Рис.4. РЭМ изображение профиля трёхслойной резистивной маски для формирования Т-образного затвора рНЕМТ-транзистора

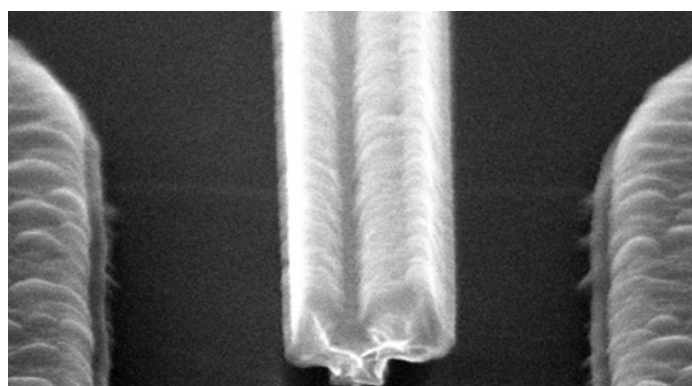
Микрофотографии поперечного сечения сформированного на основе системы металлов Ti/Pt/Au/Ti Т-образного затвора рНЕМТ транзистора с длиной 0,25 мкм приведены на рис.5. Особенностью формирования металлизации Т-образного затвора в настоящей работе является нанесение на слой Au тонкого слоя Ti толщиной 4–5 нм с целью улучшения адгезии наносимой в дальнейшем пассивирующей пленки SiO₂.

Подзатворная канавка (рис.2, п.3) является одним из важнейших элементов структуры рНЕМТ транзистора. Как и длина затвора, геометрические параметры и технология её изготовления во многом определяют важнейшие частотные и статические характеристики транзистора. Подзатворная канавка создаётся для удаления контактного n^+ -слоя исходной гетероструктуры в области формирования затвора СВЧ полевого транзистора. От её продольных размеров зависят значения ряда паразитных сопротивлений, а глубина устанавливает расстояние между слоем двумерного электронного газа гетероструктуры и металлическим затвором транзистора, от которого зависит напряжение отсечки (а соответственно, и $I_{си}^{max}$), крутизна переходной характеристики транзистора, паразитная ёмкость затвористок C_{gs} и т.д. Также от конструкции подзатворной канавки и её геометрических размеров во многом зависят пробивные напряжения полевого транзистора, уровень которых напрямую определяет предельное значение выходной мощности в СВЧ-диапазоне (см. табл.).

На рис.6 показаны две наиболее распространённые конструкции подзатворных канавок рНЕМТ-транзисторов.

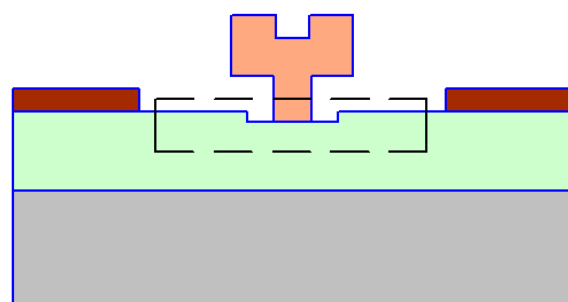


а)

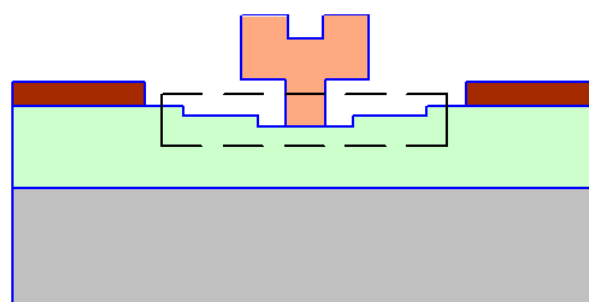


б)

Рис.5. РЭМ изображение Т-образного затвора рНЕМТ-транзистора длиной 0,25 мкм: а) скол GaAs пластины в области расположения рНЕМТ-транзистора; б) Т-образный затвор рНЕМТ-транзистора с длиной 0,25 мкм



а)



б)

Рис.6. Конструкции подзатворных канавок СВЧ рНЕМТ-транзисторов: а) «простая» канавка (recess); б) двойная канавка (double recess)

Простая подзатворная канавка (рис.6а) даёт возможность минимизировать значения паразитных элементов структуры рНЕМТ транзистора, обладает большей технологической простотой и позволяет создавать транзисторы с более высокими значениями характеристических частот f_t и f_{max} , коэффициентом усиления $K_{ур}$, и меньшим уровнем коэффициента шума $K_{ш}$. Основным недостатком этой конструкции являются не очень большие значения пробивных напряжений. Структура рНЕМТ транзистора с двойной канавкой (рис.6б), напротив, обладает высокими значениями пробивных напряжений (более 12 В), но из-за более высокого уровня паразитных сопротивлений — худшими усилительными и шумовыми характеристиками. Конструкция подзатворной канавки конкретного транзистора и её размеры обычно определяются в ходе опытной работы на основании требований, предъявляемых к прибору.

Продольный размер подзатворной канавки, как правило, составляет 0,5–0,8 мкм, кроме того, она должна быть прецизионно сформирована между омическими контактами стока и истока полевого транзистора. В качестве метода её создания для современных рНЕМТ обычно используется селективное жидкостное химическое травление, маска для которого изготавливается при помощи ЭЛЛ. На рис.7 показана подзатворная канавка рНЕМТ-транзистора длиной 0,5 мкм после удаления электроннорезистивной маски.

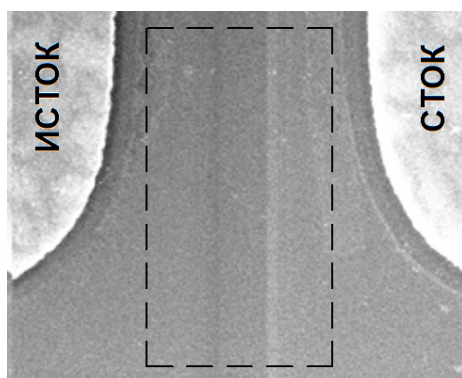


Рис.7. Микрофотография сформированной подзатворной канавки

Пассивирующая плёнка (рис.2, п.4) — обязательный элемент структуры рНЕМТ-транзистора, поскольку она формирует стабильную границу раздела между каналом транзистора (активной областью транзистора) и окружающей средой. От её параметров зависит возможный временной дрейф статических и СВЧ-характеристик транзистора и показатели надёжности в целом. Важно также отметить, что при пассивации СВЧ-приборов (особенно Ку-диапазона и выше) толщина диэлектрической пленки не должна превышать 100–150 нм, поскольку это может ухудшить частотные характеристики транзисторов из-за увеличения краевых паразитных ёмкостей затвора (C_{gs} и C_{gd}). Кроме того, специфическим требованием является необходимость осаждения плёнки под «шляпку» Т-образного затвора (не все методы это позволяют делать), где, собственно, и формирует-

ся граница раздела канал/окружающая среда. В качестве пассивации обычно используются следующие типы диэлектрических плёнок: SiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3 , или их комбинации, полученные при помощи низкотемпературных методов, таких как плазмохимическое осаждение, химическое осаждение из газовой фазы или атомно-слоевое осаждение. В настоящей работе для пассивации рНЕМТ транзисторов применяется низкотемпературная плёнка SiO_2 ($T = 250^\circ\text{C}$), полученная при помощи химического осаждения из газовой фазы. В спектрах ИК-пропускания пленок SiO_2 наблюдается полоса пропускания в области 883 см^{-1} , обусловленная дефицитом по кислороду (Si_2O_3). Для устранения дефицита по кислороду использовался фотонный отжиг (быстрый термический отжиг) [7].

Система металлизации лицевой стороны (рис.2, п.5) у интегрального транзистора, как правило, двухуровневая. Первый уровень создаётся при помощи «взрывной» литографии (lift off) на основе различных систем металлов, таких как $\text{Ti}/\text{Au}/\text{Ti}$, Ti/Au , V/Au и т.д. Металлы напыляются на холодную подложку электронно-лучевым напылением (толщина слоя золота при этом 0,4–0,6 мкм). Второй уровень металлизации формируется комбинацией вакуумного напыления системы металлов (обычно Ti/Au) и последующего гальванического наращивания слоя золота до толщин 2–3 мкм. Изоляция между уровнями металлизации обеспечивается либо слоем воздуха (технология воздушных мостов), либо толстой полимерной плёнкой.

Система металлизации обратной стороны (рис.2, п.6) является земляным экраном интегральных линий передачи и металлизацией, которая при монтаже кристалла СВЧ МИС обеспечивает уменьшение теплового сопротивления. Она формируется вакуумным напылением системы металлов на обратную сторону пластины (например, как в нашем случае, $\text{Ti}/\text{Ni}/\text{Au}$) и последующим гальваническим осаждением слоя золота, толщиной 2–3 мкм.

Омические контакты стока и истока (рис.2, п.7) обеспечивают «соединение» металлизации СВЧ МИС со слоем двумерного электронного газа, поэтому их параметры сильно влияют на все характеристики рНЕМТ транзистора. Основное требование к системе металлизации омических контактов — низкое значение удельного контактного сопротивления ($\rho_{\text{конт}} < 2,8 \cdot 10^{-6}\text{ Ом}\cdot\text{см}^2$). В системах металлизации омических контактов к GaAs *n*-типа проводимости в основном используется эвтектический сплав AuGe, который позволяет формировать низкоомные контакты с хорошей морфологией при температурах не более $400\text{--}420^\circ\text{C}$. Системе Ni-GaAs уделяется значительное внимание в результате широкого использования слоев Au-Ge-Ni в качестве омических контактов с *n*-GaAs [8,9]. В настоящей работе необходимая конфигурация омических контактов на пластине создаётся при помощи «взрывной» литографии после процесса вакуумного напыления необходимой системы металлов, например, в нашем случае, $\text{AuGe}/\text{Mo}/\text{Au}/\text{Mo}$. Для оценки удельного сопротивления омического контакта для *n*-типа GaAs был выбран контакт на основе $\text{AuGe}/\text{Mo}/\text{Au}$ [10] при толщине Mo, равной 50 нм. Данная система металлиза-

ции, в отличие от систем на основе Ni, обладает наименьшей глубиной диффузии металлов в полупроводник, наиболее гладкой морфологией поверхности и удовлетворяет требованиям к внешнему виду.

Для рационального использования площади кристалла МИС топологии транзисторов в большинстве случаев проектируются гребенчатыми (встречно-штыревыми). Для примера, на рис.8 показан типовой интегральный ДрНЕМТ транзистор с шириной затвора 4-50 мкм, изготовленный по опытной технологии АО «ОКБ-Планета».

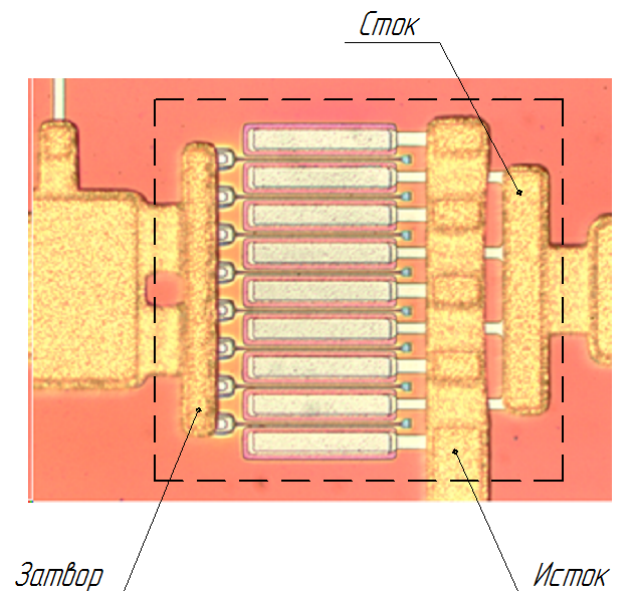


Рис.8. Топология интегрального ДрНЕМТ-транзистора

Для подтверждения требуемого уровня частотных свойств (см. табл.) на рис.9 приведены измеренная при помощи СВЧ-зондов частотная зависимость модуля коэффициента передачи S_{21} изготовленного ДрНЕМТ-транзистора с шириной затвора 4-50 мкм и для определения граничной частоты — расчётная зависимость модуля H_{21} .

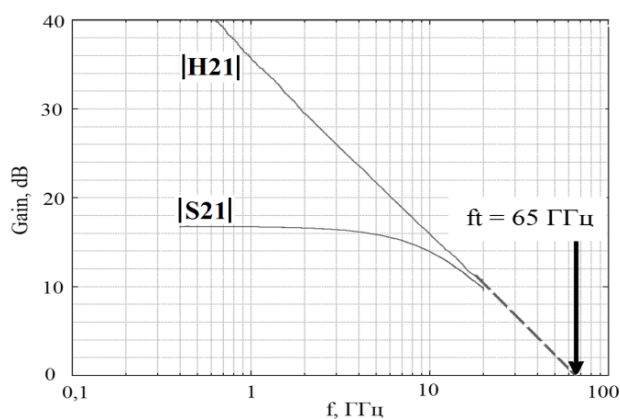


Рис.9. Определение граничной частоты изготовленного ДрНЕМТ-транзистора с шириной затвора 4-50 мкм ($U_{си} = 2$ В, $I_{си} = 15$ мА)

Как видно из рис.9, граничная частота ДрНЕМТ транзистора равна 65 ГГц, что достаточно для применения разработанной технологии для производства СВЧ МИС X- и Ku-диапазонов.

Исследование шумовых свойств изготовленных опытных ДрНЕМТ транзисторов осуществлялось после резки пластины на кристаллы при помощи специальной измерительной оснастки, позволяющей выполнять подключение кристалла транзистора в измерительный тракт и производить учёт величины потерь в нём (рис.10).

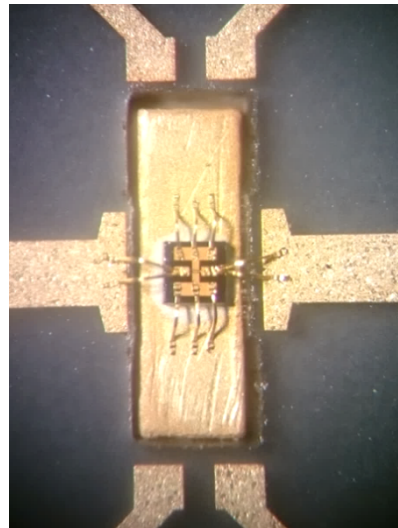


Рис.10. Кристалл ДрНЕМТ транзистора в измерительной оснастке

Измеренные значения коэффициента шума и усиления по мощности на частоте 12 ГГц составили: $K_{ш\text{ мин}} \leq 0,6$ дБ, $K_{у\text{Р опт}} \geq 12,5$ дБ ($U_{си} = 2$ В, $I_{си} = 15$ мА).

3. Заключение

Проведен анализ технологических особенностей изготовления активного элемента — рНЕМТ-транзистора с длиной затвора 0,25 мкм в составе СВЧ монолитной интегральной схемы на арсениде галлия. Основная область применения этой технологии при проектировании различных типов усилителей — это МИС с рабочими частотами до Ku-диапазона 18 ГГц. Сформулированы требования к уровню основных параметров интегрального рНЕМТ-транзистора. Предложена структура интегрального рНЕМТ-транзистора, обеспечивающая получение необходимого набора параметров. В качестве исходной гетероструктуры выбрана рНЕМТ-структура с двухсторонним наполнением канала электронами — ДрНЕМТ-структура, обеспечивающая низкие значения коэффициента шума и высокий уровень удельной выходной СВЧ мощности. Особенностью формирования металлизации Т-образного затвора в настоящей работе является нанесение на слой Au тонкого слоя Ti толщиной 4-5 нм с целью улучшения адгезии наносимой в дальнейшем пассивирующей пленки SiO_2 . Проведен анализ конструкций подзатворных канавок СВЧ рНЕМТ-транзисторов. Методами ИК Фурье-спектроскопии исследована структура низкотемпературных плёнок SiO_2 , полученных химическим осаждением из газовой фазы. В спектрах ИК-пропускания плёнок SiO_2 наблюдается полоса пропускания в области 883 см^{-1} , обусловленная дефицитом по кислороду (Si_2O_3), для устранения которого использовался фотонный

отжиг. Омические контакты на пластине создавались при помощи «взрывной» литографии после процесса вакуумного напыления необходимой системы металлов AuGe/Mo/Au/Mo. Данная система металлизации, включающая Mo, в отличие от систем на основе Ni, обладает рядом преимуществ.

Разработанные транзисторы для СВЧ МИС малошумящих усилителей и усилителей мощности Ku-диапазона удовлетворяют требуемому уровню основных параметров интегрального pHEMT-транзистора на арсениде галлия. Измеренные значения коэффициента шума и усиления по мощности на частоте 12 ГГц составили: $K_{ш\text{ мин}} \leq 0,6$ дБ, $K_{ур\text{ опт}} \geq 12,5$ дБ ($U_{си} = 2$ В, $I_{си} = 15$ мА).

1. Бабак Л.И., Черкашин М.В., Шеерман Ф.И. и др. Разработка GaAs и SiGe СВЧ монолитных интегральных схем, библиотек элементов и модулей САПР в Томском университете систем управления и радиоэлектроники // Электронная техника. Сер.3: Микроэлектроника. 2015. №4 (160). С.4–17.
2. Кондратенко А. Разработка GaAs mHEMT МИС МШУ Ku-диапазона частот на основе технологического процесса компании OMMIC // Современная электроника. 2018. №3. С.64–65.
3. Суханов Д.А. Модернизация производства СВЧ МИС // Наноиндустрия. 2019. №89. С.450–452.
4. Лапин В.Г. Перспективы развития и применения DA-pHEMT в СВЧ МИС // Электронная техника. Сер.1: СВЧ-техника. 2017. №1(532).С.26–44.
5. Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Журавлев К.С. и др. Перспективы развития мощных полевых транзисторов на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием // ФТП. 2014. №5(48). С.684–692.
6. Anishchenko E.V., Erofeev E.V., Ishutkin S.V. et al. The formation of multilayer resist mask for transistor T-gates fabrication using electron-beam lithography // International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices Proceedings. 2011. P.146–149. DOI: <https://doi.org/10.1109/EDM.2011.6006918>
7. Селезнев Б.И., Москалев Г.Я., Федоров Д.Г. Фотонный отжиг имплантированных кремнием слоев нитрида галлия // ФТП. 2016. №6(50). С.848–853.
8. Sandsa T., Keramidas V.G., Yu A.J. et al. Ni, Pd, and Pt on GaAs: A comparative study of interfacial structures, compositions, and reacted film morphologies // J. Mater. Res. 1987. Vol.2. №2. P.262–275. DOI: <https://doi.org/10.1557/JMR.1987.0262>
9. Каргин Н.И., Кузнецов А.Л., Сейдман Л.А. и др. Формирование омических контактов в транзисторе с высокой подвижностью электронов с метаморфным гетеропереходом на основе арсенида галлия // Электронная техника. Серия 2 Полупроводниковые приборы. 2014. №1(232). С.75–84.
10. Воробаев К.О., Селезнев Б.И., Ионов А.С., Петров А.В. Омические контакты для вертикально-излучающих ла-

зеров с внутррезонаторными контактами на основе гетероэпитаксиальных структур арсенида галлия // Вестник НовГУ. Сер: Технические науки. 2017. №6 (104). С.13–16.

References

1. Babak L.I., Cherkashin M.V., Sheyerman F.I., et al. Razrabotka GaAs i SiGe SVCh monolitnykh integralnykh skhem [Development of GaAs and SiGe microwave monolithic integrated circuits, element libraries and CAD modules at Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics]. Elektronnaya tekhnika. Ser. 3: Mikroelektronika, 2015, no. 4(160), pp. 4–17.
2. Kondratenko A. Razrabotka GaAs mHEMT MIS MShU Ku diapazona chastot na osnove tekhnologicheskogo protsessa kompanii OMMIC [Kondratenko A. Development of GaAs mHEMT MIC LNA Ku-band frequencies based on the technological process of the company OMMIC]. Sovremennaya elektronika, 2018, no. 3, pp. 64–65.
3. Sukhanov D.A. Modernizatsiya proizvodstva SVCh MIS [Modernization of the production of microwave MIC]. Nanoindustriya — Nanoindustry, 2019, no. 89, pp. 450–452.
4. Lapin V. G. Perspektivy razvitiya i primeneniya DA-pHEMT v SVCh MIS [Prospects for development and application DA-pHEMT in microwave MIS]. Elektronnaya tekhnika. Ser. 1: SVC-tehnika, 2017, no. 1(532), pp. 26–44.
5. Lukashin V.M., Pashkovskiy A.B., Zhuravlev K.S., et al. Perspektivy razvitiya moshchnykh polevykh tranzistorov na geterostrukturakh s donorno-akseptornym legirovaniyem [Prospects for the development of high-power field-effect transistors based on heterostructures with donor-acceptor doping]. FTP — Semiconductors, 2014, no. 5(48), pp. 684–692.
6. Anishchenko E.V., Erofeev E.V., Ishutkin S.V., et al. The formation of multilayer resist mask for transistor T-gates fabrication using electron-beam lithography. Proc. of the International Conference of Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2011, pp. 146–149. doi: <https://doi.org/10.1109/EDM.2011.6006918>
7. Seleznev B.I., Moskaev G.Ya., Fedorov D.G. Fotonnnyy otzhig implantirovannykh kremniyem sloeyev nitrida galliya [Photon annealing of silicon-implanted layers of gallium nitride]. FTP — Semiconductors, 2016, no. 6(50), pp. 848–853.
8. Sandsa T., Keramidas V.G., Yu A.J., et al. Ni, Pd, and Pt on GaAs: A comparative study of interfacial structures, compositions, and reacted film morphologies. J. Mater. Res., 1987, vol. 2, no. 2, pp. 262–275. doi: <https://doi.org/10.1557/JMR.1987.0262>
9. Kargin N.I., Kuznetsov A.L., Seidman L.A., et al. Formirovaniye omicheskikh kontaktov v tranzistore s vysokoy podvizhnostyu elektronov s metamorfnyy geteroperekhodom na osnove arsenida galliya [Formation of ohmic contacts in a transistor with high electron mobility with a metamorphic heterojunction based on gallium arsenide]. Elektronnaya tekhnika. Ser. 2: Poluprovodnikovyye pribory, 2014, no. 1(232), pp. 75–84.
10. Voropayev K.O., Seleznev B.I., Ionov A.S., Petrov A.V. Omicheskiye kontakty dlya vertikalno-izluchayushchikh lazerov s vnutrirezonnatormyimi kontaktami na osnove geteroepitaksialnykh struktur arsenida galliya [Ohmic contacts for vertically emitting lasers with intracavity contacts based on gallium arsenide heteroepitaxial structures]. Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2017, no. 6(104), pp. 13–16.