

Исследование конструктивно-технологических особенностей изготовления малошумящих GaAs-транзисторов с длиной Т-затвора 150 нм для систем передачи информации

© А.Е. Шестериков¹, Д.А. Шестерикова¹, Е.В. Ерофеев¹

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050 Томск, Россия

²Институт оптики атмосферы им. академика В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, 634055 Томск, Россия

E-mail: shesterikov.a.e@mail.ru

Поступила в Редакцию 16 января 2024 г.

В окончательной редакции 18 апреля 2024 г.

Принята к публикации 18 апреля 2024 г.

Представлены результаты исследования конструктивно-технологических особенностей изготовления малошумящих транзисторов для систем передачи информации. С помощью программного комплекса Synopsys TCAD Technology Computer-Aided Design были определены оптимальные параметры слоев гетероструктуры при мольной доле индия, равной 20%, толщине барьерного слоя 18 нм, толщине канального слоя 12 нм и концентрации дельта легирования $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Было проведено исследование влияния длины рецесса подзатворной области GaAs-транзисторов на их электрические характеристики. Установлено, что с увеличением длины рецесса происходит увеличение пробивных напряжений затвор-сток транзистора. Выявлено, что дополнительная жидкостная обработка перед осаждением диэлектрика уменьшает удельную плотность тока стока и крутизну вольт-амперной характеристики, но позволяет увеличить напряжение пробоя затвор-сток транзисторов.

Ключевые слова: pHEMT, малошумящий транзистор, углубление затвора, МИС, моделирование, гетероструктура.

DOI: 10.61011/FTP.2024.03.58406.5925

1. Введение

В настоящее время улучшение характеристик монолитных СВЧ (сверхвысокочастотных) интегральных схем во многом определяется развитием технологии эпитаксиального выращивания полупроводниковых гетероструктур [1–8]. Качество выращивания гетероструктуры и слои в структуре определяют предельные характеристики СВЧ полупроводниковых приборов [9–11]. При разработке технологического процесса крайне важно изначально подобрать гетероструктуру, которая обеспечивает наилучшие характеристики разрабатываемых МИС (монолитных интегральных схем).

При изготовлении СВЧ МИС малошумящих усилителей важно обеспечить баланс между максимальным рабочим напряжением сток-исток (напряжение пробоя затвор–сток) полевого транзистора и удельной плотностью тока стока, а также крутизной вольт-амперной характеристики транзистора. С увеличением длины подзатворной области увеличивается пробивное напряжение затвор–сток, но при этом снижается крутизна и плотность тока транзистора. Это приводит к снижению коэффициента усиления и росту коэффициента шума транзистора. В связи с этим существует оптимальное время травления рецесса подзатворной области, при котором обеспечиваются наилучшие электрические характеристики транзисторов с достаточным пробивным напряжением затвор-сток ($\geq 9 \text{ В}$).

Поверхность GaAs насыщена дефектами и свободными энергетическими уровнями. При контакте с внешней средой свободные энергетические уровни могут захватывать носителей заряда, что значительно изменяет форму входных и передаточных характеристик HEMT (high electron mobility transistor) [12–14]. С целью стабилизации параметров транзисторов после формирования затвора проводится пассивация поверхности полупроводника. Обычно в качестве пассивирующего диэлектрика используется SixNy. Данное покрытие получают методом плазмохимического осаждения. Согласно исследованиям других научных коллективов [15–19], входная обработка перед пассивацией позволяет повысить пробивное напряжение транзистора за счет улучшения качества поверхности гетероструктуры.

Цель данной работы — исследование конструктивно-технологических особенностей изготовления малошумящих GaAs-транзисторов с длиной Т-образного затвора 150 нм. Полученные результаты будут использованы для разработки и создания СВЧ МИС малошумящих усилителей для систем передачи информации.

2. Материалы и методы

Для выбора оптимальной конструкции гетероструктуры, обеспечивающей требуемые электрические характеристики малошумящих GaAs-транзисторов, было произ-

Таблица 1. Параметры слоев гетероструктуры

| Слой | Материал | Толщина | Концентрация легирования |
|--------------------------|---------------------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| Слой омического контакта | n^+ -GaAs | 300 Å | $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ |
| Стоп-слой | AlAs | 20 Å | i |
| Барьерный слой | AlGaAs | 350 Å | i |
| δ -легирование | Si | — | $N_\delta, \text{ см}^{-2}$ |
| Разделительный слой | AlGaAs | 20 Å | i |
| Канальный слой | $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ | h_{channel} | i |
| Буферный слой | GaAs | 500 Å | i |
| Сверхрешетка | AlGaAs/GaAs | — | — |
| Буферный слой | GaAs | 2000 Å | i |
| Подложка | GaAs (100) | 650 мкм | i |

Таблица 2. Виды входных обработок перед пассивацией

| Номер образца | Время травления рецесса, с | Предварительная обработка | Время, с | Дополнительная обработка | Время, с |
|---------------|----------------------------|---------------------------|----------|--|----------|
| 1 | 60 | Изопропиловый спирт | 600 | — | — |
| 2 | | | | HCl:H ₂ O (1:9) | 60 |
| 3 | 90 | Изопропиловый спирт | 600 | — | — |
| 4 | | | | H ₂ SO ₄ :H ₂ O (1:9) | 60 |
| 5 | 120 | Изопропиловый спирт | 600 | — | — |
| 6 | | | | NH ₄ OH:H ₂ O (1:9) | 60 |

ведено моделирование гетероструктуры в программном комплексе Synopsis TCAD (technology computer-aided design) с целью определения оптимальной мольной доли индия в канальном слое $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, поверхностной концентрации δ -легирования (N_δ) и толщины канального слоя транзистора. Параметры слоев гетероструктуры представлены в табл. 1.

На основе результатов моделирования были выбраны две оптимальные конструкции гетероструктуры, отличающиеся толщиной барьерного слоя. Данные конструкции были выращены на пластинах GaAs диаметром 4 дюйма. Слои выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). На данных гетероструктурах был проведен эксперимент с целью оценки влияния времени жидкостного травления рецесса подзатворной области и различных видов обработок перед пассивацией на электрические характеристики транзисторных структур.

Процесс изготовления экспериментальных образцов транзисторов состоял из следующих блоков технологических операций. Сначала было проведено формирование мезаизоляции методом жидкостного травления на глубину 200 нм. После этого были сформированы омические контакты со структурой Ni/Ge/Au/Ni/Au с общей толщиной 300 нм с удельным контактным сопротивлением $\rho_k = 0.15 \text{ Ом/мм}$ на установке электронно-лучевого испарения.

Для создания T-затвора проводилось экспонирование трехслойной маски 495PMMA A4/LOR5B/495PMMA A4 на установке электронно-лучевой литографии. Методом жидкостного травления формировался рецесс подзатворной области в селективном травителе на основе лимонной кислоты. Время травления рецесса подзатворной области было равно 60, 90 и 120 с. Затем проводилось напыление металлизации затвора Ti/Pt/Au с общей толщиной 475 нм на установке электронно-лучевого испарения.

Для стабилизации характеристик транзисторов проводилась пассивация поверхности диэлектриком Si_xN_y на установке плазмохимического осаждения PECVD (plasma-enhanced chemical vapor deposition). Толщина пленки диэлектрика составляла 100 нм. Перед пассивацией использовались четыре вида жидкостной обработки, представленные в табл. 2.

Обработка в чистом изопропиловом спирте (ИПС) использовалась в качестве эталона для сравнения каждого из видов входной обработки перед пассивацией на характеристики транзисторных структур при фиксированном времени травления рецесса подзатворной области.

После проведения пассивации было произведено травление диэлектрика с целью вскрытия окон под контактные площадки истока, стока и затвора pHEMT (pseudomorphic high electron mobility transistor). Затем

Таблица 3. Исследуемые параметры транзисторов

| Параметр | Описание |
|--------------------|--|
| I_{dss} , мА/мм | Ток стока на единицу ширины канала при напряжении на затворе 0 В |
| I_{max} , мА/мм | Максимальный ток стока на единицу ширины канала |
| I_{d0} , мА/мм | Ток утечки по поверхности пластины (определяется при напряжении на затворе -2 В) |
| G_{max} , мСм/мм | Максимальная крутизна на единицу ширины канала |
| V_p , В | Напряжение отсечки транзистора (определяется при токе стока 1 мА/мм) |
| V_{bd} , В | Напряжение пробоя транзистора |

на зондовой станции с помощью анализатора полупроводниковых приборов были измерены передаточные характеристики транзисторов, а также зависимости крутизны от напряжения на затворе при напряжении между стоком и истоком 1.5 В. Из данных зависимостей были рассчитаны основные статические параметры НЕМТ, представленные в табл. 3.

На основе анализа исследуемых параметров транзистора было выбрано оптимальное время травления подзатворной области и вид входной обработки перед пассивацией поверхности полупроводника. Для изучения работы транзисторов, полученных при оптимальных параметрах технологического процесса, было рассмотрено семейство вольт-амперных характеристик транзисторов.

Контроль формы и размеров Т-затвора, глубины и длины рецесса подзатворной области проводился с помощью сканирующего электронного микроскопа.

На основе технологического процесса GaAs p НЕМТ с наилучшими параметрами транзисторов, подобранными в рамках эксперимента, были изготовлены МИС малошумящего усилителя для X диапазона частот.

3. Результаты моделирования

Моделирование электрических характеристик p НЕМТ гетероструктуры проводилось в программном комплексе Synopsys TCAD с целью определения оптимальной мольной доли индия в канале $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (x_{channel}), толщины канального слоя (h_{channel}) и концентрации δ -легирования (N). Параметры остальных слоев структуры представлены в табл. 1.

Для расчета электрических характеристик НЕМТ использовалась гидродинамическая модель распределения плотности тока в канале. Электронная плотность сосредоточена на границе раздела широкозонного и узкозонного полупроводников. Это говорит об образовании канала с двумерным электронным газом (2DEG).

На рис. 1 представлены результаты моделирования передаточных характеристик транзистора в зависимости от концентрации δ -легирования при толщине канального слоя InGaAs $h_{\text{channel}} = 120 \text{ \AA}$ и мольной доли индия в канале $x = 0.2$.

Из полученных данных на рис. 1 видно, что с увеличением концентрации δ -легирования увеличивается ток стока при фиксированном напряжении на затворе, но при этом увеличивается требуемое напряжение на затворе для закрытия транзистора. Для достижения требуемого напряжения отсечки транзистора порядка $V_p = 0.6-0.9 \text{ В}$ минимальная концентрация δ -легирования должна составлять порядка $N = (3-5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

На рис. 2 представлены результаты расчета передаточных характеристик транзистора в зависимости от толщины канального слоя на основе InGaAs транзистор-

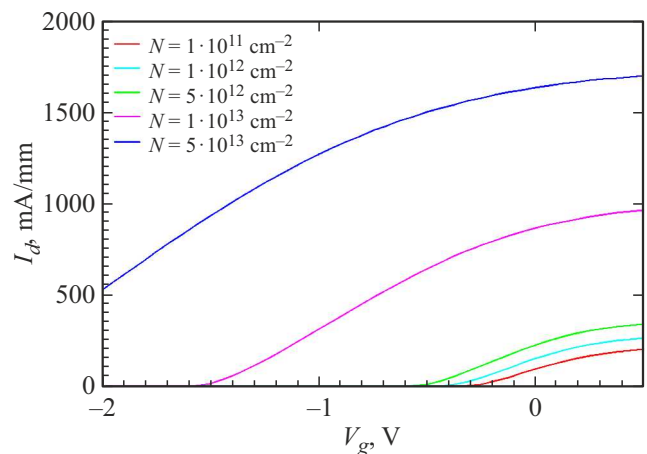


Рис. 1. Результаты моделирования передаточных характеристик транзистора в зависимости от концентрации δ -легирования. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

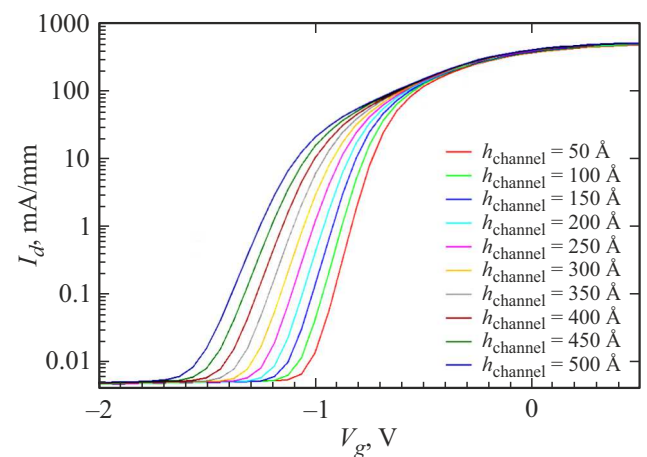


Рис. 2. Результаты расчета передаточных характеристик транзистора в зависимости от толщины канального слоя транзисторной гетероструктуры.

ной гетероструктуры при концентрации δ -легирования $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и мольной доли индия в канале $x = 0.2$.

Из рис. 2 видно, что толщина канального слоя InGaAs определяет напряжение отсечки транзистора. Для достижения требуемого напряжения отсечки транзистора от 0.6 до 0.9 В толщина канального слоя должна находиться в пределах $h_{\text{channel}} = 100\text{--}150 \text{ \AA}$. Чтобы обеспечить высокую степень воспроизводимости характеристик гетероструктуры от пластины к пластине, необходимо увеличивать толщину эпитаксиальных слоев для уменьшения вклада погрешности установки молекулярно-лучевой эпитаксии. Основываясь на данных технологических рекомендаций, была выбрана толщина канального слоя 120 \AA .

4. Результаты эксперимента и их анализ

С помощью анализатора полупроводниковых приборов были измерены зависимости тока стока и крутизны транзистора на единицу ширины затвора от напряжения на затворе между стоком и истоком, равном 1.5 В,

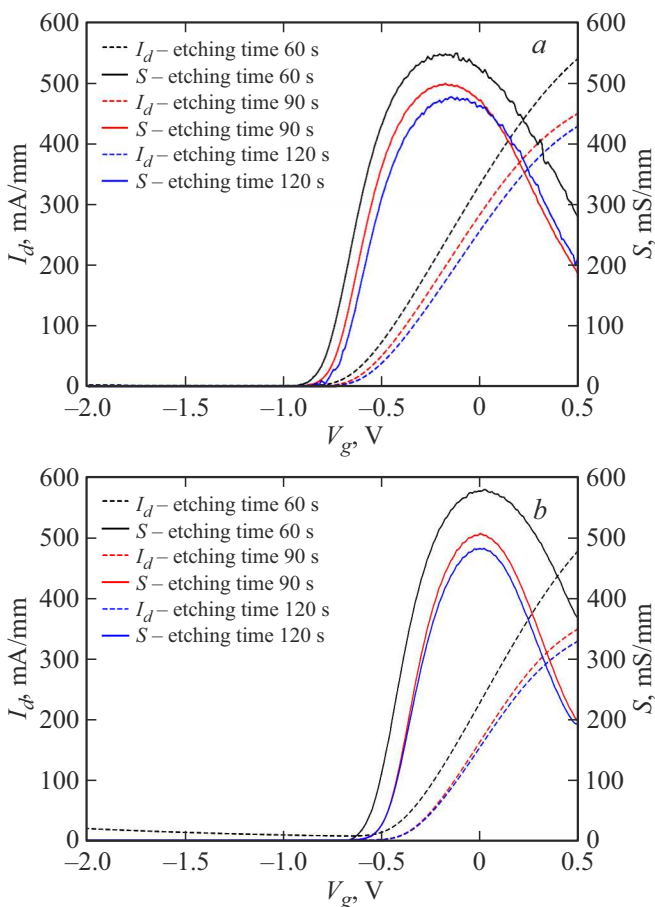


Рис. 3. *a* — влияние времени травления рецесса подзатворной области на передаточные характеристики НЕМТ (структура 1). *b* — влияние времени травления рецесса подзатворной области на передаточные характеристики НЕМТ (структура 2).

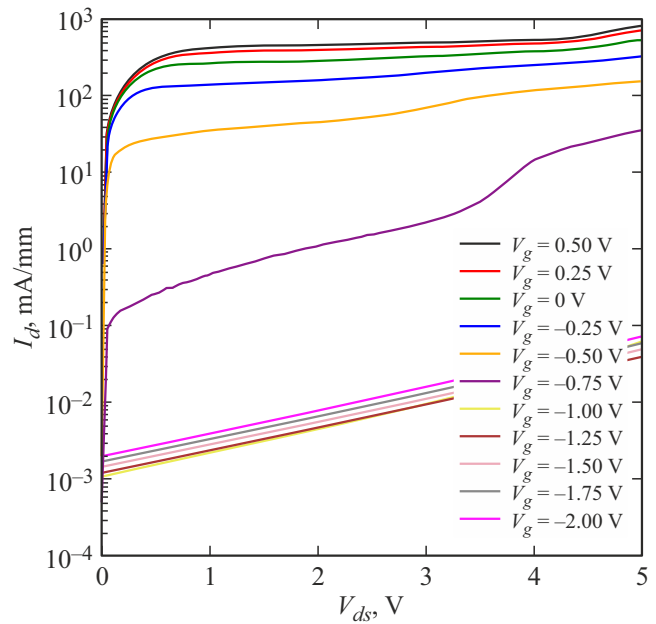


Рис. 4. Результаты измерения семейства вольт-амперных характеристик транзистора на основе структуры 1, полученного при времени травления рецесса подзатворной области 90 с и дополнительной входной обработке в $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}$ (1:9).

для различных видов обработок и времени травления рецесса подзатворной области. Измерения проводились для двух видов структур. На рис. 3, *a* и *b* представлены результаты измерений для образцов, обработанных в чистом спирте, при различном времени травления рецесса подзатворной области. Ширина затвора для каждого транзистора составляет 100 мкм.

Как видно из рис. 3, *a* и *b*, с ростом времени травления рецесса подзатворной области происходит уменьшение максимальной крутизны и тока стока на единицу ширины канала транзистора.

Согласно табл. 3, перед пассивацией диэлектрика для каждого из образцов транзисторных структур были вычислены статические характеристики НЕМТ. В табл. 4 представлены результаты расчетов статических характеристик НЕМТ.

Как видно из результатов, представленных в табл. 4, независимо от типа используемой гетероструктуры только при времени травления более 90 с достигается требуемое значение напряжения пробоя затвор-сток транзистора $> 9 \text{ В}$.

С учетом всех полученных данных наилучшими параметрами для создания малошумящих GaAs-транзисторов и СВЧ МИС на их основе обладает структура 1 при времени травления рецесса подзатворной области 90 с и дополнительной входной обработке в $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}$ (1:9). Выбор структуры 1 обусловлен тем, что она обеспечивает более высокие значения максимального тока стока при соответствующей величине максимальной крутизны транзистора. На рис. 4 представлены результаты измерения семейства вольт-амперных характеристик транзи-

Таблица 4. Результаты расчетов статических характеристик НЕМТ

| Время травления рецесса, с | Вид входной обработки | I_{ds0} , мкА/мм | I_{max} , мА/мм | I_{dss} , мА/мм | g_{max} , мСм/мм | $V_{S\ max}$, В | V_p , В | V_{BD} , В |
|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------|--------------|-----------------|
| Структура 1 | | | | | | | | |
| 60 | ИПС | 2060 | 540 | 334 | 546 | -0.20 | - 0.87 | 3.0 |
| | ИПС+HCl | 2680 | 534 | 324 | 544 | -0.20 | - 0.95 | 5.5 |
| Изменение, % | | 3,1 | -1.1 | -3.0 | -0.4 | 0 | 9.2 | 83.3 |
| 90 | ИПС | 3.84 | 450 | 285 | 498 | -0.18 | - 0.78 | 9.5 |
| | ИПС+H ₂ SO ₄ | 3.72 | 433 | 268 | 490 | -0.18 | - 0.76 | 10.8 |
| Изменение, % | | -3.1 | -3.8 | -6.0 | -1.6 | 0 | -2.6 | 13.7 |
| 120 | ИПС | 3.10 | 430 | 258 | 476 | -0.15 | - 0.75 | 11.0 |
| | ИПС+NH ₄ OH | 2.70 | 380 | 233 | 446 | -0.15 | - 0.73 | 13.0 |
| Изменение, % | | -12.9 | -11.6 | -9.7 | -6.3 | 0 | -2.7 | 18.2 |
| Структура 2 | | | | | | | | |
| 60 | ИПС | 19300 | 476 | 227 | 576 | 0 | - 0.70 | 2.5 |
| | ИПС+HCl | 9730 | 461 | 208 | 575 | 0 | - 0.70 | 4.5 |
| Изменение, % | | -49.6 | -3.2 | -8.4 | -0.2 | - | 0 | 80.0 |
| 90 | ИПС | 3.95 | 348 | 163 | 504 | 0 | - 0.50 | 9.0 |
| | ИПС+H ₂ SO ₄ | 4.20 | 336 | 155 | 500 | 0 | - 0.49 | 10.7 |
| Изменение, % | | 6.3 | -3.4 | -4.9 | -0.8 | - | -2.0 | 18.9 |
| 120 | ИПС | 3.01 | 328 | 154 | 479 | 0 | - 0.51 | 10.5 |
| | ИПС+NH ₄ OH | 2.49 | 274 | 131 | 432 | 0 | - 0.48 | 12.5 |
| Изменение, % | | -17.3 | -16.5 | -14.9 | -9.8 | - | -5.9 | 19.0 |

сторона на основе структуры 1 при времени травления рецесса подзатворной области 90 с и использовании дополнительной входной обработки в H₂SO₄:H₂O (1:9). Напряжение на затворе изменялось от -2 до 0.5 В с шагом 0.25 В.

Как видно из рис. 4, максимальное значение тока стока составляет ~800 мА/мм при напряжении на затворе 0.5 В и напряжении между стоком и истоком 5 В. Закрывание транзистора происходит при напряжении на затворе между -0.75 и -1.00 В, что соответствует полученным данным в табл. 4.

Контроль формы и размеров Т-затвора, глубины и длины травления рецесса подзатворной области проводился с помощью электронного микроскопа. Для этого на об-

разцах с различным временем травления подзатворной области делался скол по сечению, перпендикулярному каналу в топологии транзисторной структуры.

Результаты измерения длины рецесса подзатворной области при различном времени травления представлены в табл. 5.

Из табл. 5 видно, что с увеличением времени травления пропорционально увеличивается длина рецесса. Также увеличивается глубина травления рецесса ввиду ограниченной селективности травителя к стоп-слою. Таким образом, оптимальные параметры транзисторных структур были достигнуты при длине рецесса подзатворной области 380 нм.

Таблица 5. Результаты измерения длины рецесса подзатворной области при различном времени травления

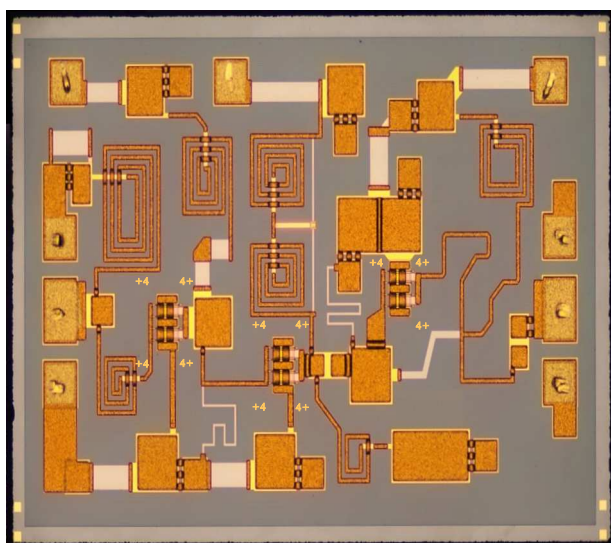
| Время травления, с | 60 | 90 | 120 |
|--------------------|-----|-----|-----|
| Длина рецесса, нм | 280 | 380 | 415 |

Таблица 6. Основные электрические и СВЧ характеристики изготовленного малошумящего усилителя

| Параметр | Значение | Единица измерения |
|-----------------------------|-----------|-------------------|
| Диапазон частот | 8–11 | ГГц |
| Коэффициент усиления | 27 | дБ |
| Возвратные потери по входу | -12 | « |
| Возвратные потери по выходу | -10 | « |
| Коэффициент шума | 1.6 | « |
| Напряжение питания | 5 | В |
| Ток потребления | 50 | мА |
| Размер кристалла | 1.7 × 1.1 | мм ² |

5. Разработка и изготовление СВЧ МИС малошумящего усилителя

На основе подобранных оптимальных режимов изготовления p -НЕМТ была разработана и изготовлена СВЧ МИС малошумящего усилителя диапазона частот от $f = 8–11$ ГГц. В качестве резистивного материала использовался NiCr с удельным поверхностным сопротивлением 20 Ом/квadrat. Для конденсаторного материала использовался Si_3N_4 с удельной емкостью 400 пФ/мм². Проводники для межэлементной металлизации и распределенных СВЧ элементов были изготовлены на основе слоев Ti/Au с последующим гальваническим осаждением

**Рис. 5.** Фото кристалла СВЧ МИС малошумящего усилителя.

Аu толщиной 4 мкм. Обратная сторона МИС полностью металлизирована золотом толщиной 4 мкм. На рис. 5 представлена фото кристалла изготовленного СВЧ МИС малошумящего усилителя.

Габаритные размеры кристалла СВЧ МИС малошумящего усилителя составляют 1.7×1.1 мм. С помощью векторного анализатора цепей были исследованы СВЧ параметры и шумовые характеристики усилителя.

В табл. 6 представлены основные характеристики СВЧ МИС малошумящего усилителя.

Среднее значение коэффициента усиления в данном диапазоне составило 27 дБ. Максимальное значение коэффициента шума составляет 1.6 ГГц, что является достаточно хорошим показателем [20].

6. Заключение

В рамках данной работы были исследованы конструктивно-технологические особенности изготовления малошумящих GaAs-транзисторов с длиной T-затвора 150 нм.

С помощью моделирования в программном комплексе Synopsys TCAD были подобраны оптимальные характеристики гетероструктуры: мольная доля индия в канале $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, толщина барьерного и канального слоев гетероструктуры, концентрация δ -легирования барьерного слоя AlGaAs.

В рамках исследования влияния длины рецесса подзатворной области на характеристики НЕМТ выявлено, что с увеличением длины рецесса происходит увеличение пробивных напряжений транзисторов вследствие увеличения электрического пути между затвором и стоком. Дополнительная обработка ухудшает электрические характеристики, но позволяет увеличить на 20% напряжение пробоя транзисторов. По результатам измерений статических параметров наилучшие характеристики были получены при использовании дополнительной обработки в $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}$ (1 : 9) после предварительной обработки в изопропиловом спирте при времени травления рецесса подзатворной области 90 с (длина рецесса 380 нм).

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта FEWM 2024-0004.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Chaturvedi. Materials Today: Proceedings, 37, 1567 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.158>

- [2] A.S. Adonin, A.Yu. Evgrafov, Yu.V. Kolkovskii, V.M. Minnebaev. *Russ. Microelectron.*, **50**, 197 (2021). <https://doi.org/10.1134/S1063739721020025>
- [3] M.A. Alim, A.A. Rezazadeh. *Solid-State Electron.*, **132**, 24 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.sse.2017.03.001>
- [4] N. Haris, P.B.K. Kyabaggu, M.A. Alim, A.A. Rezazadeh. 11th Eur. Microwave Integrated Circuits Conf. (EuMIC), (3–5 October, London, United Kingdom), 169 (2016).
- [5] D.Y. Protasov, D.V. Dmitriev, K.S. Zhuravlev, G.I. Ayzenshtat, A.Y. Yushchenko, A.B. Pashkovsky. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **153**, 107148 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2022.107148>
- [6] K.K. Abgaryan, V.A. Kharchenko. *Russ. Microelectron.*, **46**, 564 (2017). <https://doi.org/10.1134/S1063739717080029>
- [7] F. Thome, F. Heinz, A. Leuther. *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.*, **30**, 11, 1089 (2020). <https://doi.org/10.1109/LMWC.2020.3025674>
- [8] K.S. Zhuravlev, D.Yu. Protasov, A.K. Bakarov, A.I. Toropov, D.V. Gulyaev, V.G. Lapin, V.M. Lukashin, A.B. Pashkovskii. *Optoelectron. Instrum. Proc.*, **56** (5), 478 (2020). <https://doi.org/10.3103/S8756699020050155>
- [9] A. Leuther, M. Ohlrogge, L. Czornomaz, T. Merkle, F. Bernhardt, A. Tessmann. 12th Eur. Microwave Integrated Circuits Conf. (EuMIC), (Nuremberg, Germany), 130 (2017). <https://doi.org/10.23919/EuMIC.2017.8230677>
- [10] M. Squartecchia, T.K. Johansen, J-Y. Dupuy, V. Nodjiadjim, V. Midili, M. Riet, A. Konczykowska. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, **61** (2), 550 (2019). <https://doi.org/10.1002/mop.31558>
- [11] M.A. Alim, A.A. Rezazadeh. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **64** (4), 1511 (2017). <https://doi.org/10.1109/TED.2017.2658685>
- [12] Y.S. Lin, B.Y. Chen. *Microelectron. Eng.*, **214**, 100 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.mee.2019.04.028>
- [13] Y.Q. Chen, Y.C. Zhang, Y. Liu, X.Y. Liao, Y.F. En, W.X. Fang, Y. Huang. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **65** (4), 1321 (2018). <https://doi.org/10.1109/TED.2018.2803443>
- [14] H. Mehdi, F. Reveret, C. Robert-Goumet, L. Bideux, B. Gruzza, P.E. Hoggan, J. Leymarie, Y. Andre, E. Gil, B. Pelissier, T. Levert, D. Paget, G. Monier. *Appl. Surf. Sci.*, **579**, 152191 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.152191>
- [15] Y.S. Lin, C.C. Lin. *Sci. Adv. Mater.*, **13**(4), 638 (2021). <https://doi.org/10.1166/sam.2021.3928>
- [16] Yu-S. Lin, J-J. Huang. *J. Korean Phys. Soc.*, **79**, 828 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40042-021-00299-5>
- [17] X. Zou, C. Li, X. Su, Y. Liu, D. Finkelstein-Shapiro, W. Zhang, A. Yartsev. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12** (25), 28360 (2020). <https://doi.org/10.1021/acsami.0c04892>
- [18] J. B. Hacker, J. Bergman, G. Nagy, G. Sullivan, C. Kadow, H.-K. Lin, A.C. Gossard, M. Rodwell, B. Brar. *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest.*, 1029 (2005). <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2005.1516844>
- [19] P.J. Riemer, B.R. Buhrow, J.D. Coker, B.A. Randall, R.W. Tchentintin, B.K. Gilbert, E.S. Daniel. *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest.*, 1037 (2005). <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2005.1516846>
- [20] D.P. Chang, I.B. Yom, S.H. Oh. *Asia-Pacific Microwave Conf. Proc.*, **5**, 4 (2005). <https://doi.org/10.1109/APMC.2005.1607073>

Редактор Г.А. Оганесян

Research of design and technological features of manufacturing of low-noise GaAs transistors with T-gate length of 150 nm for information transmission systems

A.E. Shesterikov¹, D.A. Shesterikova¹, E.V. Erofeev^{1,2}

¹ Tomsk State University
of Control Systems and Radioelectronics,
634050 Tomsk, Russia

² Zuev Institute of Atmospheric Optics
Russian Academy of Sciences, Siberian Branch,
634055 Tomsk, Russia

Abstract The work presents the results of research of design and technological features of manufacturing of low-noise transistors for information transmission systems. With the software system Synopsys Technology Computer-Aided Design, the optimal parameters of heterostructure layers were determined at mole fraction of indium in the channel equal to 20%, thickness of the barrier layer 18 nm, thickness of the channel layer 12 nm and delta doping concentration $5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Research was conducted on the effect of the recess length of the sub-gate region of GaAs transistors on their electrical characteristics. It was found that with the increase of the recess length there is an increase in the gate-to-stock breakdown voltages of the transistor. It is revealed that additional liquid treatment before dielectric deposition decreases the specific drain current density and the steepness of the volt-ampere characteristic, but allows increasing the gate-stock breakdown voltage of transistors.