

УДК 621.382

На правах рукописи



Ишуткин Сергей Владимирович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И СОЗДАНИЕ МОНОЛИТНОГО GaAs
СВЧ МАЛОШУМЯЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ С МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ НА
ОСНОВЕ ПЛЕНОК Al и Cu**

Специальность 01.04.04 – Физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Томск 2016

Работа выполнена в акционерном обществе «Научно-производственная фирма «Микран» и федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

- Научный руководитель:** **Кагадей Валерий Алексеевич,**
доктор физико-математических наук,
профессор, АО «НПФ«Микран», г.Томск
- Официальные оппоненты:** **Айзенштат Геннадий Исаакович,**
доктор технических наук, АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов», г.Томск
- Нефёдцев Евгений Валерьевич,**
кандидат физико-математических наук, доцент,
ФГБУН «Институт сильноточной электроники СО РАН», г.Томск
- Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск

Защита диссертации состоится «29» декабря 2016 г. в 15 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д212.268.04 при ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте <https://tusur.ru/urls/rhvmv3iy>

Автореферат разослан « » ноября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

Ю.П. Акулиничев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Сверхвысокочастотные GaAs монолитные интегральные схемы (GaAs СВЧ МИС) традиционно изготавливаются с металлизацией контактов металл-полупроводник, межэлементной металлизацией и металлизацией обратной стороны пластины на основе тонких плёнок Au. В то же время в технологии Si интегральных схем (ИС) основными металлами межэлементной металлизации являются Cu или Al. В технологии GaAs СВЧ МИС металлизация на основе пленок Cu, вследствие более высокой проводимости, теплопроводности и стойкости меди к электродиффузии, перспективна для замены традиционной металлизации на основе Au. Низкая стоимость Cu и Al позволяет ожидать снижения себестоимости изготовления GaAs СВЧ МИС с металлизацией на их основе.

Опубликованные работы, с одной стороны, свидетельствуют об актуальности исследований в данном направлении, а с другой стороны – о нерешённости этой проблемы в целом. До настоящего времени не разработана полноценная технология производства GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu. Факторами, сдерживающими создание этой технологии, являются более высокая химическая активность Al и Cu в сравнении с Au, а также тот факт, что Cu является быстро диффундирующей примесью, формирующей глубокие акцепторные уровни в GaAs. Таким образом, разработка конструкции и технологии изготовления GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu является актуальной задачей.

Цель работы

Целью настоящей работы является исследование, разработка и создание конструкции и технологии изготовления GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu, а также оценка надежности МИС малошумящих усилителей (МШУ), изготовленных по разработанной технологии.

Для реализации поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- 1) разработать и оптимизировать конструкции активных и пассивных элементов GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu с учетом особенностей их интеграции в состав МИС;
- 2) разработать и апробировать технологический маршрут изготовления GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu;
- 3) исследовать и оптимизировать процессы формирования омических и барьерных контактов металл-полупроводник, межэлементной металлизации и металлизации обратной стороны пластины GaAs, а также защиты фронтальной стороны МИС;

4) оценить надежность и определить закономерности деградации активных и пассивных элементов GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu;

5) исследовать электрические параметры и оценить надежность GaAs СВЧ МИС малошумящего усилителя с металлизацией на основе пленок Al и Cu.

Научная новизна работы

1) Разработаны конструкции активных и пассивных элементов, осуществлена их интеграция в состав МИС, а также создана технология, изготовления GaAs СВЧ МИС малошумящего усилителя с металлизацией на основе пленок Al и Cu, позволяющие изготавливать МИС с электрическими параметрами на уровне МИС с традиционной металлизацией на основе пленок Au.

2) Предложена конструкция и технология формирования методом обратной литографии межэлементной металлизации GaAs СВЧ МИС на основе пленки Cu с планарными и торцевыми диффузионными барьерами, расположенной между слоями Si_xN_y , которая характеризуется повышенной термостойкостью и термостабильностью параметров относительно металлизации, имеющей только планарные диффузионные барьеры.

3) Разработана методика формирования трехслойной резистивной маски T-образных затворов и затворных шин СВЧ транзисторов с высокой подвижностью электронов с использованием методов электронно-лучевой и UV-литографий, позволяющая сократить время формирования резистивной маски, улучшить планарность затворных шин, а также упростить совмещение рисунка затворов с рисунком стоков/истоков транзистора при низкой контрастности знаков совмещения.

4) Предложена конструкция и технология формирования многослойной металлизации обратной стороны и сквозных отверстий пластины GaAs на основе пленки Cu с выравнивающим слоем Ni, характеризующейся лучшей сплошностью пленки диффузионного барьера, формируемой методом магнетронного осаждения, а также повышенной термостойкостью и термостабильностью.

5) По результатам испытаний на долговечность ($T = 125\text{ }^\circ\text{C}$, $U = 5\text{ В}$, $t = 1000\text{ ч}$) показано, что GaAs СВЧ МИС малошумящих усилителей с металлизацией на основе пленок Al и Cu не уступают МИС с традиционной металлизацией на основе пленок Au.

Практическая значимость работы

1) Разработанные конструкции активных и пассивных элементов, а также технология изготовления GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu позволяют организовать серийный выпуск МИС на

действующих технологических линиях, производящих МИС с металлизацией на основе плёнок Au.

2) Разработанная технология GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu позволяет снизить себестоимость производства за счёт замены Au на Al и Cu, а также создаёт предпосылки для гетероинтеграции GaAs и Si интегральных схем.

Научные положения, выносимые на защиту

1) GaAs СВЧ монолитные интегральные схемы малошумящего усилителя, включающие активные и пассивные элементы, у которых омические контакты и Т-образные затворы транзисторов с высокой подвижностью электронов выполнены на основе многослойных композиций Pd/Ge/Al/Mo и Ti/Al/Mo, соответственно, межэлементная металлизация на основе композиций $Si_xN_y/W/Cu/W/Ti/Cu$, или $Si_xN_y/W/Cu/WN_x/Ti/Cu$, защита фронтальной стороны МИС на основе композиций Si_xN_y/BCB , а металлизация обратной стороны и сквозных отверстий пластины GaAs на основе композиции Pd/Ni/W/Cu/W, изготовленные по модернизированной технологии с обратной литографией, имеют электрические параметры на уровне МИС с традиционной металлизацией на основе Au.

2) Межэлементная металлизация на основе плёнки Cu с планарными и торцевыми диффузионными барьерами на основе слоёв Mo, Ta, W и/или WN_x , формируемая методом обратной литографии, в которой для осаждения слоев диффузионных барьеров используется метод магнетронного распыления, а для осаждения слоя Cu – термическое испарение, расположенная между двух слоев Si_xN_y , обладает повышенной термостойкостью и термостабильностью параметров по сравнению с металлизацией на основе плёнки Cu, имеющей только планарные диффузионные барьеры.

3) Методика формирования трехслойной резистивной маски Т-образных затворов и затворных шин транзисторов с использованием электронно-лучевой и UV-литографий, включающая формирование маски затворных шин и окон к знакам совмещения с использованием двух экспонирований методом UV-литографии, которые проводятся после нанесения первого и третьего слоев резиста, в сочетании с проявлением трех слоев резиста, проводимых перед формированием методом электронно-лучевой литографии маски затворов, позволяет сократить время формирования трехслойной резистивной маски, улучшить планарность затворных шин за счёт формирования трапецевидного профиля, а также упростить совмещение рисунков затворов и стоков/истоков транзисторов в процессе электронно-лучевой литографии при низкой контрастности знаков совмещения.

4) Выравнивающий слой Ni, формируемый методом химического осаждения, с последующим напылением диффузионного барьера методом

магнетронного распыления позволяет улучшить сплошность пленки диффузионного барьера металлизации на основе плёнки Cu, осаждаемой на боковые стенки сквозных отверстий в пластине GaAs, а также повысить термостойкость и термостабильность металлизации обратной стороны пластины GaAs по отношению к металлизации на основе плёнки Cu без выравнивающего слоя Ni.

5) Разработанные конструкции активных и пассивных элементов МИС, а также технология изготовления GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu, позволяют изготавливать GaAs МИС малошумящих усилителей с долговечностью на уровне долговечности GaAs МИС с традиционной металлизацией на основе пленок Au.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы доложены на 20-й Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, Украина, 2010г.), 5th European Microwave Integrated Circuits Conference (Париж, Франция 2010г.), International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM (Эрлагол, 2011 г.), IX Международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск 2012г.), Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (Томск 2012г.), XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2012г.), Юбилейной научно-технической конференции «СВЧ-электроника. 70 лет развития» (Фрязино 2013г.), V Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики» «АПР – 2013» (Томск 2013г.).

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 26 работах, в том числе 6 статей опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК, 4 статьи в зарубежных журналах, 3 патента РФ, одна заявка на патент РФ.

Личный вклад автора

Диссертация является результатом исследований проводившихся автором совместно с сотрудниками АО «НПФ «Микран» и НОЦ «Нанотехнологии» ФГБОУ ВО ТУСУР. Автором, совместно с научным руководителем формулировались цель и задачи исследования, обсуждались пути их достижения, анализировались результаты экспериментов, а также проводилось обобщение полученных результатов исследования. Личный вклад автора заключается в выборе направлений исследования, разработке и оптимизации конструкции МИС, операций, технологических блоков и технологического маршрута изготовления GaAs СВЧ МИС, выполнении экспериментальных

исследований, обработке и анализе результатов экспериментов. Разработка технологического блока формирования защиты фронтальной стороны GaAs СВЧ МИС пленками нитрида кремния и бензоциклобутена (BCB) проводилась Краснослободцевой Т. В. Организация изготовления пластин GaAs СВЧ МИС осуществлялось автором совместно с Анищенко Е. В.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Объем работы составляет 207 страниц машинописного текста, включая 118 рисунков, 2 таблицы и списка литературы из 103 наименований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по соглашению № 14.577.21.0204. Уникальный идентификатор проекта: RFMEFI57715X0204.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен литературный обзор по тематике исследования. Анализ научно-технической литературы показал, что в настоящее время Au является основным материалом металлизации в GaAs СВЧ МИС. Формирование элементов металлизации на фронтальной стороне МИС преимущественно проводится с использованием методов обратной литографии и термического осаждения тонких пленок в вакууме. При формировании пленок Au толщиной более 1,5 – 2 мкм предпочтение отдается методу электрохимического осаждения. Межэлементная металлизация GaAs СВЧ МИС обычно содержит 2 – 3 уровня, и формируется с использованием слоев межуровневого диэлектрика или с «воздушными» мостами. В качестве слоев межуровневого диэлектрика и для защиты поверхности МИС используются пленки Si_xN_y , полиимида, BCB, полибензоксазола (PBO) и др. Для формирования диэлектрика конденсаторов используются пленки Si_xN_y . Металлизация обратной стороны пластины состоит из одного или нескольких слоев обеспечивающих адгезию металлизации к GaAs, защиту от диффузии Au в GaAs и пленки Au толщиной в несколько микрон, формируемой методом электрохимического осаждения.

В современной Si микроэлектронике главным материалом межэлементной металлизации является Cu. Основными технологическими процессами формирования межэлементной металлизации стали дамасский и двойной дамасский процессы. Базовые принципы технологии формирования

межэлементной металлизации в Si ИС, подтвержденные большим опытом практического использования, могут быть использованы при разработке GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu.

Исследования по разработке технологии GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu охватывают все основные элементы металлизации МИС, а именно металлизацию контактов металл-полупроводник, межэлементную металлизацию и металлизацию обратной стороны пластины GaAs. Также в работах рассмотрены аспекты формирования дискретных транзисторов с металлизацией на основе пленок Cu, показано, что по электрическим параметрам такие транзисторы не уступают аналогам с металлизацией на основе пленок Au. Реализуются работы по формированию пассивных элементов на основе пленок Cu, расположенных в отдельных уровнях на поверхности GaAs СВЧ МИС, изготовленной по технологии с металлизацией на основе Au (формирование так называемых redistribution layers – RDL). Технология обратного монтажа (flip-chip) с Cu бампами (pillar bumps) находит применение для поверхностного монтажа GaAs СВЧ МИС. Несмотря на несомненный интерес исследователей к данному направлению до настоящего времени не разработана полноценная технология производства GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu.

Обзор исследований также показал перспективность использования металлизации на основе Cu в технологии мощных GaN приборов, что связано с более высокими проводимостью, теплопроводностью и стойкостью к электромиграции Cu в сравнении с традиционно используемыми слоями Au.

В конце главы сделаны выводы по литературному обзору, сформированы цель и задачи исследования.

Во **второй** главе представлены оборудование и экспериментальные методики, использовавшиеся при выполнении данной работы.

Для формирования GaAs СВЧ МИС МШУ и тестовых транзисторов были использованы 100 мм полуизолирующие пластины GaAs, на поверхности которых методом молекулярно-лучевой эпитаксии были выращены псевдоморфные гетероструктуры AlGaAs/InGaAs/AlGaAs. Для снижения сопротивления омических контактов, формируемых к гетероструктуре, верхний слой AlGaAs дополнительно были выращены слои AlAs (стоп-слой для селективного травления n^+ -GaAs) и n^+ -GaAs ($n^+ = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$). В остальных случаях применялись полуизолирующие пластины GaAs.

Для оценки термостойкости и термостабильности тестовых элементов проводилась их термообработка в режимах 150 – 300 °С, с шагом 25 °С в течение 1 часа (на каждую температуру по отдельному образцу) и 250 °С в течение 24 часов соответственно. Обработка проводилась на горячих плитах в атмосфере азота. До обработки, периодически в процессе и после обработки

выполнялись измерения электрических параметров тестовых элементов. Также контролировались изменения внешнего вида средствами оптической и сканирующей электронной микроскопии.

Для проведения ускоренных испытаний на долговечность GaAs СВЧ МИС МШУ были смонтированы в СВЧ-модули. Модули помещались в климатическую камеру с температурой среды 125 °С при одновременной подаче на МИС напряжения питания 5 В, что соответствовало номинальному напряжению питания данной МИС. Общее время ускоренных испытаний составляло 1000 часов. В процессе испытаний периодически контролировались изменения коэффициентов усиления и шума, а также тока потребления МИС.

В **третьей главе** представлены результаты исследований, направленных на разработку конструкций активных и пассивных элементов GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu.

Были разработаны различные конструкции металлизации дискретных транзисторов с высокой подвижностью электронов, проведена оценка надежности транзисторов, изготовленных по этим конструкциям. Всего рассмотрено шесть схем металлизации транзисторов различающихся составом металлизации омических контактов (ОК), затворов (З) и наличием пленок Si_xN_y :

- 1) ОК: Ni/Ge/Au/Ni/Au 5/25/100/20/150 нм, З: Ti/Pt/Au 50/25/400 нм, конструкция 1 (рис. 1, а);
- 2) ОК: Ge/Cu/Mo 78/122/100 нм, З: Ti/Al/Mo 50/400/30 нм, конструкция 1 (рис. 1, а);
- 3) ОК: Pd/Ni/Ge/Mo/Cu/Mo 15/10/150/50/100/50 нм, З: Ti/Al/Mo 50/400/30 нм, конструкция 2 (рис. 1, б);
- 4) ОК: Pd/Ge/Al/Mo 15/150/150/30 нм, З: Ti/Al/Mo 50/400/30 нм, конструкция 1 (рис. 1, а);
- 5) ОК: Pd/Ge/Al/Mo 15/150/150/30 нм, З: Ti/Mo/Cu/Mo 50/30/350/30 нм, конструкция 1 (рис. 1, а);
- 6) ОК: Pd/Ge/Al/Mo 15/150/150/30 нм, З: Ti/ WN_x /Cu/ WN_x 50/40/350/40 нм, конструкция 3 (рис. 1, в).

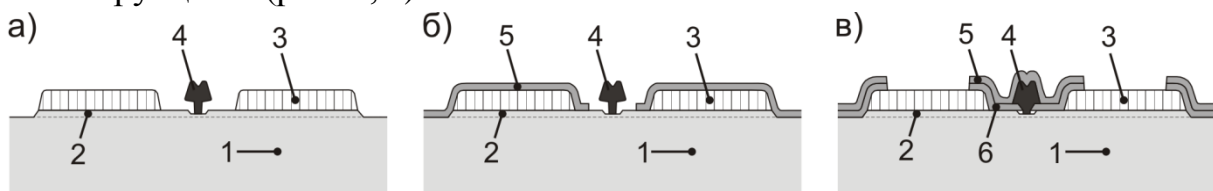


Рис. 1. Конструкции GaAs pHEMT: а) – №1; б) – №2; в) – №3. 1 – GaAs подложка, 2 – активный слой (гетероструктура), 3 – омический контакт, 4, 6 – слои Si_xN_y , 5 – затвор

Транзисторы с ОК Ni/Ge/Au/Ni/Au использовались в качестве реперных, в тестах по оценке термостойкости и термостабильности они демонстрировали

отсутствие деградации электрических параметров и внешнего вида металлизации. Транзисторы с затвором Ti/Al/Mo и ОК Pd/Ge/Al/Mo и Pd/Ni/Ge/Mo/Cu/Mo (варианты 3 и 4) с точки зрения термостойкости и термостабильности электрических параметров не уступали реперным транзисторам. Несколько худшие термостойкость и термостабильность электрических параметров показали транзисторы с ОК Ge/Cu/Mo (вариант 2). При этом было обнаружена деградация морфологии поверхности и торцов металлизации омических контактов при температурах обработки 200 °С и выше уже в течение первого часа. По-видимому, это было обусловлено диффузией Cu по направлению к поверхности металлизации. Транзисторы с металлизацией затворов Ti/Mo/Cu/Mo и Ti/WN_x/Cu/WN_x (варианты 5 и 6) имели крайне низкую термостойкость электрических параметров. В первом случае, по всей видимости, это было связано с диффузией Cu по торцам затворной металлизации, имеющей только планарные диффузионные барьеры, в канал транзистора, во втором случае – из-за диффузии Cu по разрывам в пленках Ti и WN_x на границе окна в нижнем слое Si_xN_y. Оптимальным для продолжения работы был признан транзистор с ОК Pd/Ge/Al/Mo и затвором Ti/Al/Mo (вариант 4).

В процессе разработки оптимальной конструкции металлизации межсоединений на основе Cu для транзистора были рассмотрены две конструкции. Первая Mo/Cu/Mo (40/380/40 нм) с планарными диффузионными барьерами Mo (рис. 2, а) была составлена на основании литературного обзора работ посвященных разработке металлизации на основе пленок Cu в технологии GaAs. Недостатком этой конструкции является то, что открытыми остаются торцы слоя Cu. Для устранения этого недостатка в данной работе была предложена оригинальная методика позволяющая традиционным для GaAs методом обратной литографии сформировать металлизацию на основе Cu с планарными и торцевыми слоями диффузионных барьеров (рис. 2, б). Для оценки второй конструкции были сформированы образцы с металлизацией W/Cu/W (40/380/40 нм).

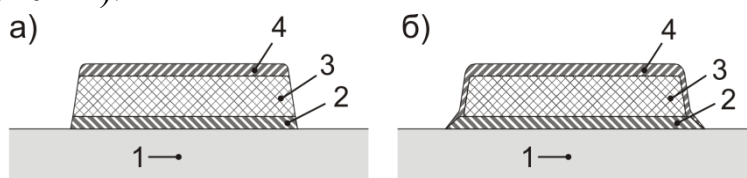


Рис. 2. Конструкции металлизации на основе Cu без (а) и с (б) торцевыми диффузионными барьерами. 1 – подложка GaAs, 2, 4 – слои диффузионных барьеров, 3 – слой Cu

Формирование торцевых диффузионных барьеров позволило повысить термостойкость металлизации. Так если в металлизации Mo/Cu/Mo, имеющей

только планарные диффузионные барьеры, изменения наблюдались уже после термообработки при 125 °С в течение одного часа. В металлизации W/Cu/W с планарными и торцевыми диффузионными барьерами изменений не наблюдалось вплоть до температуры обработки 200 °С. В повторных экспериментах использование планарных и торцевых барьеров на основе Mo, Ta или WN_x вместо W, приводило к подобным результатам.

Для дальнейшего повышения термостойкости было предложено размещать металлизацию между двумя слоями диэлектрика Si_xN_y . Тестовые элементы были подвергнуты термообработке при 250 °С в атмосфере азота. Использование слоев Si_xN_y повысило термостойкость обоих видов конструкций металлизации. При этом край металлизации с торцевыми и планарными барьерами W (рис. 3, г - е) в процессе термообработки оставался значительно ровнее края металлизации только с планарными барьерами Mo (рис. 3, а - в). Измерения зависимости удельного сопротивления различных металлизаций на основе Cu с использованием пленок диэлектрика Si_xN_y от времени термообработки в атмосфере азота при температуре 250 °С показали, что варианты металлизации с торцевыми барьерами обладают большей стабильностью удельного сопротивления.

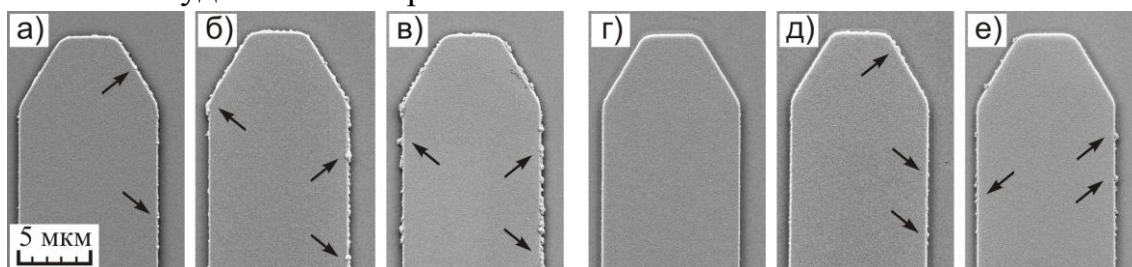


Рис. 3. Микроскопические изображения металлизаций Mo/Cu/Mo без торцевых барьеров (а - в) и W/Cu/W с торцевыми барьерами (г - е), с использованием пленок диэлектрика Si_xN_y , до и после термообработки в атмосфере азота при температуре 250 °С: а, г) – без обработки; б, д) – после 1 ч; в, е) – после 5 ч

На основе анализа экспериментальных данных была разработана конструкция транзистора с двухуровневой металлизацией на основе пленок Al и Cu (рис. 4, а). Основываясь на конструкции транзистора, были разработаны конструкции пассивных элементов GaAs СВЧ МИС (рис. 4, б - г).

После изготовления транзисторы оптимальной конструкции имели ток насыщения $I_{dss} = 340 - 360$ мА/мм, максимальную крутизну $g_m = 355 - 380$ мСм/мм при напряжении сток-исток $U_{ds} = 3$ В. Напряжение отсечки составило $U_p = -1,25 - 1,4$ В, напряжение пробоя затвор-сток $BV_{gd} = 10,4 - 11,5$ В (при удельном токе утечки затвор-сток $I_{dg} = 1$ мА/мм). Удельное сопротивление резистивного слоя резисторов составляло 18-19 Ом/кв. Напряжение пробоя конденсаторов превышало 100 В. После термообработки при 250 °С в течение

24 часов не наблюдалось существенного изменения, как электрических параметров так и внешнего вида элементов. Как показали эксперименты относительно тонкий контактный уровень металлизации Ti/Pt/Au (слой Au толщиной 400 нм) поверх Cu контактной площадки МИС, позволяет обеспечить высокую прочность сварного соединения.

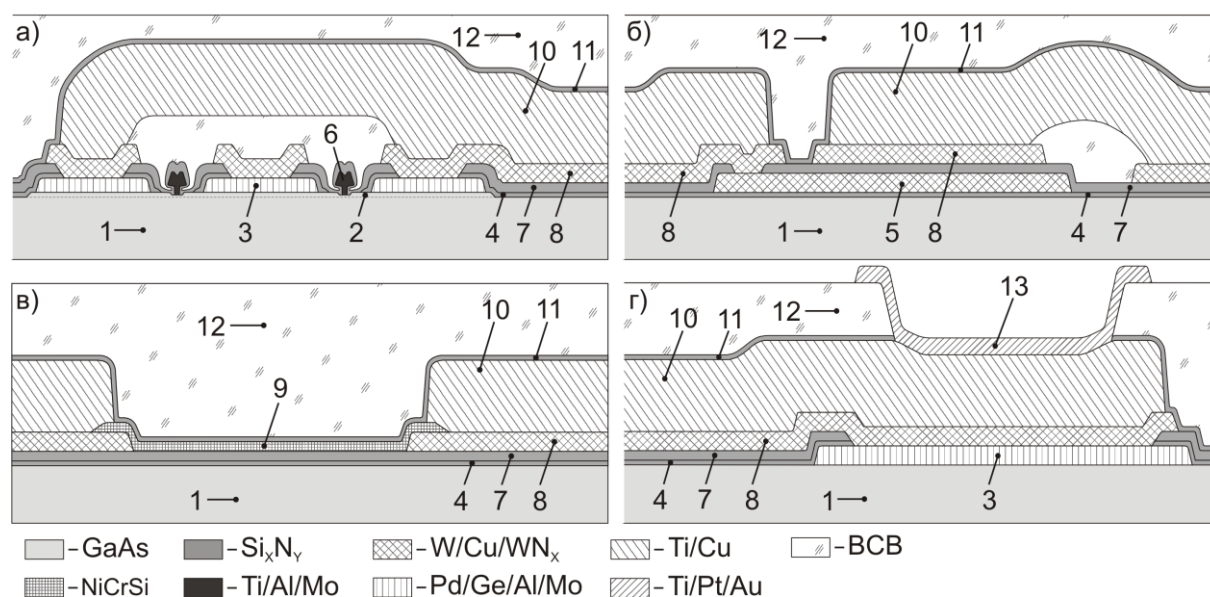


Рис. 4. Конструкции активных и пассивных элементов GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu: а) – транзистор; б) – конденсатор; в) – резистор; г) – контактная площадка МИС. 1 – GaAs подложка, 2 – активный слой (гетероструктура), 3 – омический контакт, 4, 7, 11, 12 – слои диэлектрика, 5 – нижняя обкладка конденсатора, 6 – затвор, 8 – металлизация первого уровня, 9 – резистивный слой, 10 – металлизация второго уровня, 13 – металлизация контактного слоя

Эксперименты с формированием металлизации обратной стороны на основе композиции W/Cu/W 100/3000/100 нм показали, недостаточную прочность слоя диффузионного барьера W формируемого методом магнетронного осаждения, на боковых стенках сквозных отверстий в GaAs. Наличие развитого рельефа на боковых стенках отверстий, образовавшегося в процессе их плазмохимического травления мешало формированию сплошной пленки W. После термообработки металлизации при 250 °C в течение 24 часов наблюдались следы диффузии Cu в GaAs, пленка металлизации стала рыхлой (рис. 5, а).

Для повышения термостойкости металлизации в сквозных отверстиях в работе было предложено ввести в конструкцию выравнивающий слой Ni, формируемый методом химического осаждения, перед формированием металлизации W/Cu/W. Микроскопическое изображение поперечного сечения сквозного отверстия со сформированной металлизацией Ni/W/Cu/W

(1000/100/4000/100 нм) после термообработки при 250 °С в течение 24 ч в атмосфере азота показано на рисунке 5, б. После термообработки отсутствовали следы диффузии Cu в нижележащие слои и GaAs подложку, границы между слоями были резкими, слой W диффузионного барьера ясно прослеживался, по всей глубине отверстия.

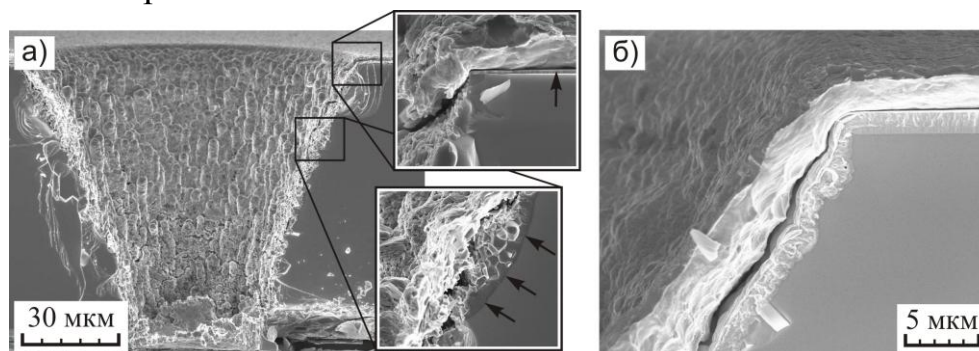


Рис. 5. Микроскопические изображения поперечного сечения сквозных отверстий в GaAs с металлизацией W/Cu/W (а) и Ni/W/Cu/W (б) после термообработки при 250 °С в течение 24 ч в атмосфере азота

В **четвертой главе** приводятся результаты исследований, направленных на разработку, технологии изготовления GaAs СВЧ МИС МШУ с металлизацией на основе тонких пленок Al и Cu. Разработанный технологический маршрут, изготовления GaAs СВЧ МИС МШУ включал следующую последовательность блоков операций: формирование межэлементной изоляции; формирование омических контактов Pd/Ge/Al/Mo; формирование нижней обкладки конденсаторов W/Cu/WN_x; формирование затворов транзисторов Ti/Al/Mo; формирование межэлементной металлизации первого уровня W/Cu/WN_x; формирование тонкопленочных резисторов NiCrSi; формирование межэлементной металлизации второго уровня Ti/Cu; формирование защиты фронтальной стороны МИС Si_xN_y/BCB; утонение GaAs пластины до 100 мкм; травление сквозных отверстий; формирование металлизации обратной стороны Ni/W/Cu/W со «streets» на границах кристаллов МИС; резка GaAs пластины на отдельные кристаллы МИС.

Формирование межэлементной изоляции выполнялось посредством жидкостного химического травления слоев гетероструктуры. Формирование элементов металлизации фронтальной стороны МИС проводилось с использованием методов обратной литографии, термического и магнетронного осаждения тонких пленок. Второй уровень межэлементной металлизации формировался по технологии с «воздушными» мостами с электрохимическим осаждением слоя Cu. Травление окон в Si_xN_y и травление сквозных отверстий в GaAs пластине выполнялось методом реактивного ионного травления в индуктивно связанной плазме. Осаждение слоев металлизации обратной

стороны осуществлялось методами химического (Ni), магнетронного (W и Cu 100 нм) и электрохимического (Cu 4 мкм) осаждения.

На рисунке 6 представлено поперечное сечение МИС МШУ с металлизацией на основе пленок Al и Cu, изготовленной с использованием разработанных конструкций элементов и технологического маршрута.

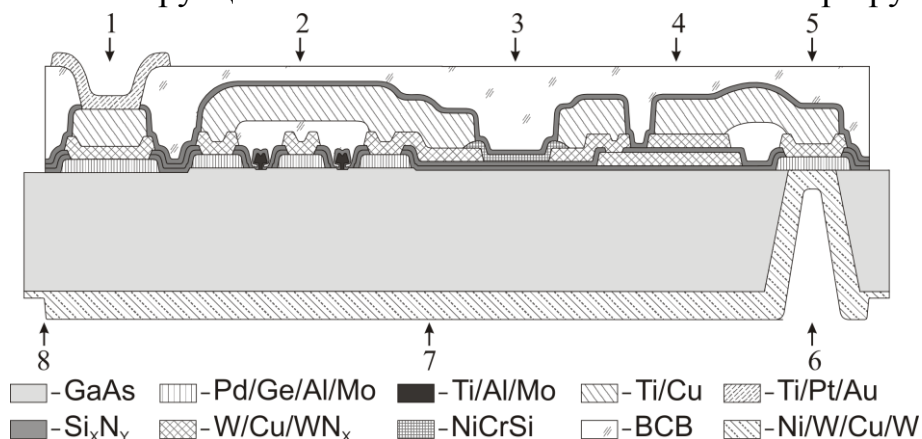


Рис. 6. Схема межсоединений GaAs СВЧ МИС МШУ. 1 – контактная площадка МИС, 2 – транзистор, 3 – тонкопленочный резистор, 4 – МДМ конденсатор, 5 – контактная площадка сквозного отверстия, 6 – сквозное отверстие, 7 – металлизация обратной стороны МИС, 8 – street в металлизации

Резистивная маска для субмикронных Т-образных затворов транзисторов обычно формируется методом электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ) по многослойной резистивной пленке. Выбор в пользу ЭЛЛ объясняется высокой разрешающей способностью метода. Однако существенным недостатком ЭЛЛ, является его низкая производительность в сравнении с другими литографическими методами. Обычно при формировании резистивной маски помимо затворов формируются и затворные шины, которые могут иметь значительную площадь, формирование под них окон методом ЭЛЛ может занимать больше времени, чем экспонирование маски под сами затворы. Также недостатком формирования затворных шин по одной резистивной маске с затворами, является образование Т-образного профиля на затворных шинах. Что увеличивает высоту рельефа шин и усложняет формирование электрического контакта между затворной шиной и металлизацией первого уровня из-за разрывов в последней. Это может привести к нарушению целостности слоев диффузионных барьеров для Cu в составе межэлементной металлизации первого уровня и как следствие диффузию Cu в нижележащие слои.

В данной работе была разработана оригинальная методика формирования трехслойной резистивной маски для субмикронного Т-образного затвора и затворных шин транзисторов с использованием ЭЛЛ и UV-литографии. На первом этапе формировалась маска затворных шин и окон к знакам совмещения

с использованием двух экспонирований методом UV-литографии, которые проводились после нанесения первого и третьего слоев резиста, с последующим проявлением всех трех слоев резиста. На втором этапе в той же трехслойной резистивной пленке проводилось формирование маски затворов методом ЭЛЛ. После повторного проявления всех трех слоев резистивная маска была готова к осаждению металлизации затвора и затворных шин.

Разработанная методика позволила сократить время формирования трехслойной резистивной маски, улучшить планарность затворных шин за счёт формирования трапецевидного профиля, а также упростить совмещение рисунков затворов и стоков/истоков транзисторов в процессе электронно-лучевой литографии при низкой контрастности знаков совмещения. На рисунках 7 показаны микроскопические изображения металлизации затвора и затворной шины, сформированных по резистивной маске, изготовленной по данной методике.

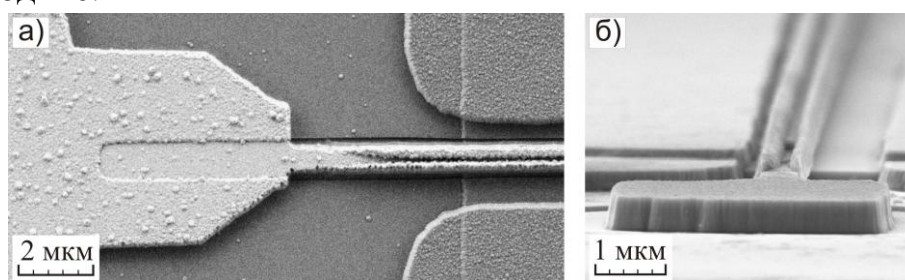


Рис. 7. Микроскопические изображения металлизации Т-образного затвора и трапецевидной затворной шины, созданные с использованием трехслойной резистивной маски, сформированной методами ЭЛЛ и UV-литографии

Межэлементная металлизация первого уровня (как и нижняя обкладка конденсаторов) выполнялась на основе композиции $W/Cu/WN_x$, с планарными и торцевыми диффузионными барьерами. Слои диффузионных барьеров напылялись методом магнетронного осаждения, слой Cu методом электронно-лучевого испарения. Для более эффективного формирования торцевых диффузионных барьеров (повышения толщины и улучшения сплошности пленок) была проведена оптимизация профиля резистивной маски. Экспериментально было показано, что соотношение между толщинами нижнего слоя двухслойной резистивной маски и осаждаемой металлизации (2 : 1), является достаточным для формирования сплошной пленки диффузионного барьера на торцах металлизации. На рисунке 8, а представлено микроскопическое изображение поперечного сечения металлизации $W/Cu/W$ 50/350/100 нм, осажденной по двухслойной резистивной маске LOR 5B/AZ1505 900/500 нм, для повышения наглядности слой Cu был вытравлен.

Так как метод магнетронного осаждения не полностью совместим с методом обратной литографии, после удаления резистивной маски по

периметру металлизации образуются «вуали» (рис. 8, *а*, поз. 3) – тонкие прерывистые пленки, образованные паразитным осаждением материала на вертикальные стенки резистивной маски. В работе была проведена оптимизация процесса удаления резистивной маски позволившая эффективно удалить «вуали» и сформировать ровный край металлизации (рис. 8, *б*). Оптимизация заключалась в предварительной обработке резистивной маски с напыленной металлизацией в водном растворе проявителя марки MF319 с применением ультразвука перед удалением резиста в метилпирролидоне. Возможный механизм удаления «вуалей» может быть следующим. В водных растворах MF319 происходит селективное растворение нижнего слоя резистивной маски LOR 5B, при неизменном верхнем слое маски AZ1505. По мере растворения резиста в окне маски образуется растущая полузакрытая полость, а «вуаль» под воздействием волн давления, генерированных ультразвуком, открепляется как от вертикальной стенки маски, так и от поверхности пластины GaAs.

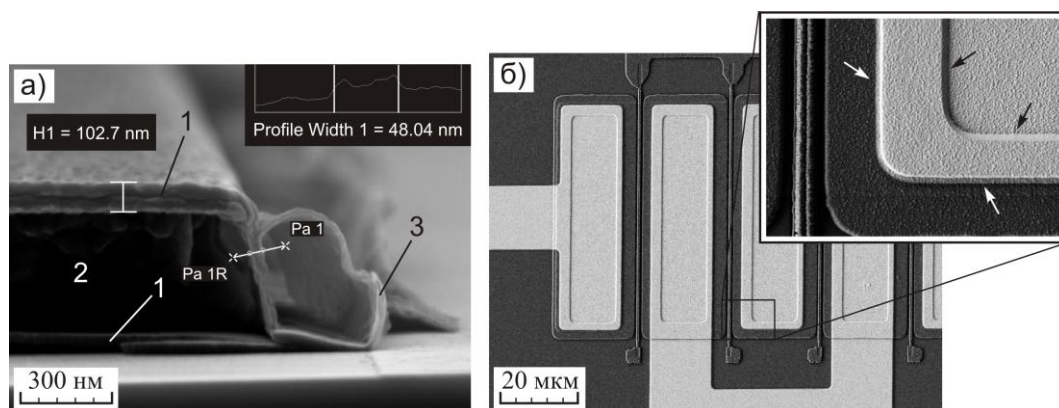


Рис. 8. Микроскопические изображения поперечного сечения металлизации W/Cu/W 50/350/100 нм, осажденной по резистивной маске LOR 5B/AZ1505 900/500 нм (*а*) и области транзистора на поверхности GaAs СВЧ МИС, со сформированной межэлементной металлизацией первого уровня W/Cu/WN_x 40/380/50 нм (*б*). 1 – слой W, 2 – слой Cu, 3 – «вуаль» из пленки W

В **пятой главе** разработанные конструкции активных и пассивных элементов, а также технология изготовления GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu были апробированы при создании МИС трехкаскадного МШУ. В качестве прототипа была выбрана МИС МШУ с металлизацией на основе Au, серийно производимая АО «НПФ «Микран». На рисунке 9 показаны частотные зависимости коэффициентов усиления и шума МИС МШУ с обоими видами металлизации.

Сравнительный анализ параметров МИС с различной металлизацией показал, что коэффициенты усиления и шума обоих типов МИС совпадали, в пределах погрешности измерения, в диапазоне частот 8 – 10 ГГц, МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu имела более узкий диапазон рабочих

частот 8 – 10 ГГц, вместо 8 – 12 ГГц для МИС прототипа с металлизацией на основе пленок Au.

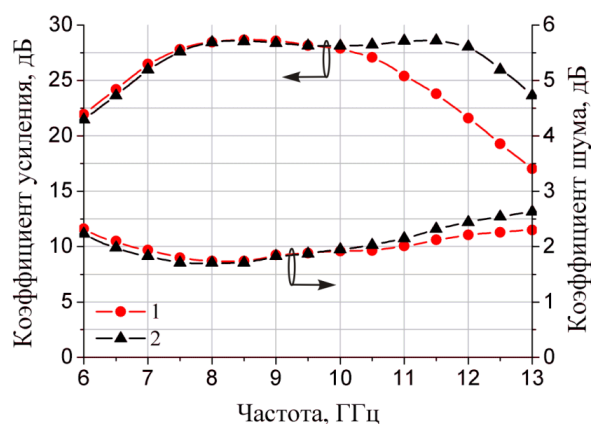


Рис. 9. Зависимости коэффициентов усиления и шума от частоты для GaAs СВЧ МИС МШУ с металлизацией на основе пленок: 1 – Al и Cu, 2 – Au

МИС МШУ с металлизацией на основе Al и Cu в диапазоне частот 8 – 10 ГГц имела коэффициент усиления 28 ± 1 дБ, коэффициент шума не превышал 2 дБ. Теоритический анализ позволил сделать вывод о том, что некоторое сужение диапазона рабочих частот у МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu обусловлено более высоким значением коэффициента стоячей волны по напряжению на частотах выше 10 ГГц. Это связано с неполным совпадением входных и выходных импедансов транзисторов с различным типом металлизаций и может быть преодолено коррекцией номиналов элементов МИС МШУ с металлизацией на основе Al и Cu.

Разбраковка по электрическим параметрам 864 МИС МШУ, изготовленных на одной пластине GaAs, проводилась в два этапа. На первом этапе отбраковывались кристаллы с низкими значениями коэффициента передачи и повышенным/пониженным токопотреблением. На втором этапе проводилось выявление скрытых дефектов. Для этого подложка с МИС подвергалась термообработке при температуре 200 °С в течение 24 ч после чего проводилось повторное измерение параметров МИС прошедших первый этап разбраковки. Граничные условия отбраковки на обоих этапах были следующими: коэффициент передачи S_{21} на частоте 9 ГГц не менее 28 дБ и ток потребления 35 – 45 мА.

После первого этапа разбраковки выход годных МИС по электрическим параметрам по всей пластине составил 47 % (403 шт.). После второго этапа – общее число годных МИС МШУ уменьшилось на 15 шт. (388 шт., выход годных 45 %).

Статистический анализ причин брака с применением методов визуального контроля показал, что основной причиной брака было повреждение диэлектрика конденсаторов в цепях питания каскадов МИС,

произошедшее из-за растрыва и рассовмещения сквозных отверстий в GaAs подложке относительно контактных площадок на фронтальной стороне МИС. Это приводило к повышенному токопотреблению и снижению коэффициента передачи S21.

Для проведения ускоренных испытаний на долговечность были подготовлены две группы МИС МШУ по 5 шт. в каждой. В первую группу вошли МИС МШУ, у которых металлизация фронтальной стороны пластины GaAs была выполнена на основе плёнок Al и Cu, а металлизации обратной стороны – на основе двухслойной композиции Ni/Au общей толщиной 3 мкм. Для этого была изготовлена дополнительная пластина, которая также прошла процедуру разбраковки. Во вторую группу были включены МИС с металлизацией фронтальной и обратной стороны на основе пленок Al и Cu, прошедшие оба этапа разбраковки. Две группы МИС были сформированы для независимой оценки надежности конструкции металлизации фронтальной стороны МИС без учета влияния металлизации обратной стороны. На рисунке 10 представлены зависимости коэффициента усиления и шума на частоте 9 ГГц, а также тока потребления МИС обеих групп от прошедшего времени испытания.

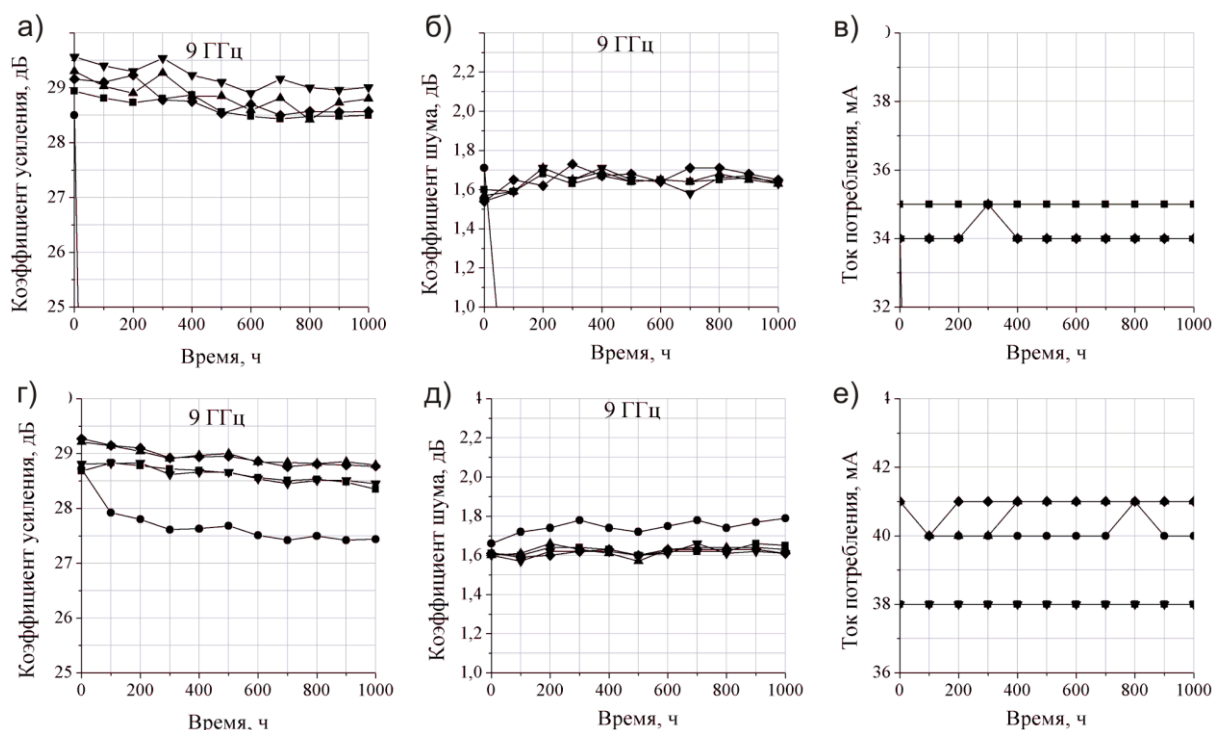


Рис. 10. Зависимости коэффициента усиления (а, г) и шума (б, д) на частоте 9 ГГц, а также тока потребления (в, е) GaAs СВЧ МИС МШУ с металлизацией фронтальной стороны на основе пленок Al и Cu, а металлизацией обратной стороны Ni/Au (а - в) и Ni/W/Cu/W (г - е) от времени выдержки МИС при температуре 125 °С, при одновременной подаче на МИС номинального напряжения питания 5 В

В процессе испытаний по одной МИС в каждой из групп сошло с испытаний по причине резкого роста тока потребления. Анализ показал, что причиной этого было короткое замыкание обкладок конденсатора в фильтре питания одного из каскадов усилителя. Для МИС из первой группы наиболее вероятной причиной могло быть наличие скрытого дефекта в пленке диэлектрика конденсатора, для МИС второй группы повреждением диэлектрика в процессе травления сквозного отверстия в пластине GaAs.

За время испытаний снижение коэффициента усиления для МИС с металлизацией обратной стороны Ni/Au не превышало 3 %, а для МИС с металлизацией обратной стороны Ni/W/Cu/W не превышало 2 %. Изменения коэффициента шума и тока потребления МИС обеих групп находились в пределах погрешности измерений.

Полученные результаты продемонстрировали, что при соблюдении технологических режимов GaAs СВЧ МИС МШУ с металлизацией на основе пленок Al и Cu, изготовленные по разработанной технологии, обладают долговечностью сравнимой с долговечностью МИС с традиционной металлизацией на основе Au. Сравнительные ускоренные испытания МИС с металлизацией обратной стороны на основе композиций Ni/Au и Ni/W/Cu/W с выравнивающим слоем Ni в исследованных режимах не выявили отличий в надежности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1) Разработаны конструкции активных и пассивных элементов GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu, позволяющие изготавливать термостойкие и термостабильные элементы с электрическими параметрами на уровне параметров, характерных для элементов на основе пленок Au, способные выдерживать термообработку при 250 °С в течение как минимум 24 ч без значимой деградации электрических параметров и изменения внешнего вида.

2) Транзистор с металлизацией затвора и омических контактов на основе композиций Ti/Al/Mo (50/400/30 нм) и Pd/Ge/Al/Mo (15/150/150/30 нм), соответственно, а также транзистор с металлизацией затвора и омических контактов на основе композиций Ti/Al/Mo 50/400/30 нм и Pd/Ni/Ge/Mo/Cu/Mo 15/10/150/50/100/50 нм, соответственно, с осаждённым поверх омического контакта слоем Si_xN_y толщиной 250 нм, характеризуются высокой термостойкостью и термостабильностью параметров, и способны выдерживать термообработку при 250 °С в течение как минимум 24 ч без значимой деградации электрических параметров и изменения внешнего вида.

3) Металлизация Т-образных затворов транзисторов на основе композиции Ti/Mo/Cu/Mo (50/30/350/30 нм) с планарными слоями диффузионных барьеров на основе Mo характеризуется низкой термостойкостью, проявляющейся в диффузии Cu по торцам металлизации в нижележащие слои и приводящей к деградации параметров транзисторов уже после термообработки при температуре 150 °С в течение одного часа, а при повышении температуры обработки, начиная уже с 200 °С – к деформации затворной металлизации.

4) Формирование планарных и торцевых слоев диффузионных барьеров на основе пленок W, Ta, Mo и/или WN_x позволяет повысить термостойкость межэлементной металлизации на основе пленки Cu, в сравнении с металлизацией имеющей только планарные слои диффузионных барьеров.

5) Упаковка межэлементной металлизации на основе Cu в слои Si_xN_y позволяет повысить ее термостойкость и термостабильность, при этом наилучшие результаты достигаются с использованием в составе металлизации одновременно как планарных, так и торцевых диффузионных барьеров на основе пленок W, Ta, Mo и/или WN_x , что позволяет формировать межэлементную металлизацию, изменение удельного сопротивления которой после термообработки в режиме 250 °С в течение 24 ч не превышает 3 %.

6) Формирование верхних слоёв металлизации контактных площадок МИС на основе композиции Ti/Pt/Au (толщина слоя Au 400 нм) поверх слоя Cu, входящего в состав межэлементной металлизации, позволяет выполнять проволочный монтаж кристаллов МИС золотой проволокой с высокой прочностью сварных соединений.

7) Формирование методом химического осаждения дополнительного выравнивающего слоя Ni, реализуемого перед осаждением слоя диффузионного барьера, позволяет улучшить сплошность пленки диффузионного барьера на боковых стенках сквозных отверстий в пластине GaAs, а также повысить термостойкость и термостабильность металлизации обратной стороны пластины GaAs на основе Cu по отношению к металлизации без выравнивающего слоя Ni.

8) Разработанная методика формирования трехслойной резистивной маски для Т-образных затворов транзисторов методами UV- и электронно-лучевой литографии, позволяет сократить время создания резистивной маски, улучшить планарность затворных шин, а также упростить совмещение рисунков затворов и стоков/истоков транзисторов в процессе электронно-лучевой литографии при низкой контрастности знаков совмещения.

9) Оптимизация профиля знаков совмещения на основе металлизации омических контактов Pd/Ge/Al/Mo для электронно-лучевой литографии с

использованием детектора вторичных электронов по Эверхарту и Торнли, позволяет за счет «краевого» эффекта улучшить топографическую составляющую контраста знаков совмещения, а увеличение толщины слоя Mo до 100 нм повысить контрастность металлизации знаков, за счет увеличения фазовой составляющей контраста.

10) Соотношение толщин нижнего слоя двухслойной резистивной маски и слоев осаждаемой металлизации, равное 2 : 1, при формировании межэлементной металлизации методом обратной литографии, является достаточным для формирования методом магнетронного осаждения сплошной пленки диффузионного барьера на торцах Cu проводника, напыленного методом термического осаждения в вакууме.

11) Ультразвуковая обработка резистивной маски с осажденной по ней межэлементной металлизацией на основе пленки Cu с планарными и торцевыми диффузионными барьерами, формируемыми методом магнетронного осаждения, проводимая перед удалением резистивной маски в водном растворе MF319 в диапазоне концентраций раствора от 1 : 1 до 1 : 10, позволяет эффективно удалять «вуали» по периметру элементов металлизации, образованные паразитным осаждением материалов диффузионных барьеров на вертикальные стенки резистивной маски, что обеспечивает формирование элементов межсоединений с ровными краями.

12) Электрохимическое осаждение пленки Cu из электролита CuSO_4 : H_2SO_4 : $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (100 : 70 : 10 г/л) в реверсном режиме при равных плотностях токов осаждения/травления $0,3 \text{ мА/мм}^2$, частоте реверса 0,1 Гц и соотношении длительностей полупериодов осаждения/травления 7 : 3, позволяет сформировать пленку Cu, характеризующуюся гладкой морфологией поверхности и низким удельным сопротивлением на уровне $0,018 \text{ мОм}\cdot\text{м}$.

13) Разработанные конструкции активных и пассивных элементов, технологический маршрут и технологические операции изготовления GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Al и Cu, позволяют организовать серийный выпуск МИС на действующих технологических линиях, занятых в производстве GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе пленок Au.

14) Сравнительные ускоренные испытания на долговечность GaAs СВЧ МИС маломощных усилителей, изготовленных по разработанной технологии с металлизацией фронтальной стороны на основе пленок Al и Cu, в течение 1000 ч при $T = 125 \text{ }^\circ\text{C}$ и $U = 5 \text{ В}$ показали, что МИС с металлизацией обратной стороны на основе композиций Ni/Au и Ni/W/Cu/W с выравнивающим слоем Ni в исследованных режимах имеют одинаковую долговечность.

15) Разработанные конструкции активных и пассивных элементов, а также технология изготовления GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе

пленок Al и Cu, позволяют изготавливать GaAs СВЧ МИС малошумящего усилителя с электрическими параметрами и долговечностью на уровне электрических параметров и долговечности МИС с традиционной металлизацией на основе пленок Au. Полученные результаты могут быть использованы при разработке устройств на GaN с металлизацией на основе пленок Cu.

Содержание диссертации отражено в 26 работах, в числе которых следующие основные:

1) Ерофеев Е. В., Кагадей В. А., Ишуткин С. В., Носаева К. С. Разработка бездрагметалльного GaAs pHEMT транзистора с субмикронным T-образным затвором // Доклады ТУСУРа. – 2010. – №2(22), часть 1. – С. 183-186.

2) Ишуткин С. В., Анищенко Е. В., Ерофеев Е. В., Кагадей В. А. Формирование межэлементной металлизации на основе меди в GaAs СВЧ МИС // "Электронная Техника", серия 1 "СВЧ - техника". – 2013. – №4(519), часть II. – С. 201-204.

3) Ишуткин С. В., Анищенко Е. В., Ерофеев Е. В., Кагадей В. А. Формирование межэлементной металлизации на основе Cu в GaAs СВЧ МИС с использованием магнетронного осаждения слоев диффузионных барьеров // «Известия вузов. Физика». – 2013. – Т.56. – №8. – С. 135-138.

4) Ишуткин С. В., Анищенко Е. В., Ерофеев Е. В., Кагадей В. А. Оптимизация процесса «взрыва» фоторезистивной маски при формировании межэлементной металлизации на основе меди в GaAs СВЧ МИС // "Электронная Техника", серия 1 "СВЧ - техника". – 2013. – №4(519), часть II. – С. 198-201.

5) Erofeev E. V., Arykov V. S., Anishchenko E. V., Kagadei V. A., Ishutkin S. V., Kazimirov A. I. A gold free aluminum metalized GaAs pHEMT with copper based air bridges and backside // IEEE J. El. Dev. Soc. – 2013. – Vol. 1. – no. 12. – P. 191-195.

6) Ишуткин С. В., Кагадей В. А., Ерофеев Е. В., Анищенко Е. В. Формирование межэлементной металлизации GaAs монолитных интегральных схем на основе меди.// Микроэлектроника. – 2015. – Т. 44. – № 4. – С. 282-289.

7) Ишуткин С. В., Кагадей В. А., Ерофеев Е. В., Анищенко Е. В., Арыков В. С. Конструктивно-технологические особенности изготовления СВЧ GaAs монолитной интегральной схемы малошумящего усилителя с медной металлизацией лицевой стороны // Микроэлектроника. – 2015. – Т. 44. – № 6. – С. 428-436.

8) Lysenko I., Zykov D., Ishutkin S., Meshcheryakov R.. The use of TCAD in technology simulation for increasing the efficiency of semiconductor manufacturing // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1772. – P. 060012(7).