

УДК 621.382.032.27

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЧ GaAs МОНОЛИТНОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ МАЛОШУМЯЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ С МЕДНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ ЛИЦЕВОЙ СТОРОНЫ

© 2015 г. С. В. Ишуткин¹, В. А. Кагадей*, Е. В. Ерофеев*, Е. В. Анищенко*, В. С. Арыков*¹Научно-исследовательский институт систем электрической связи
Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники

*ЗАО Научно-производственная фирма “Микран”

E-mail: ishsv@mail.ru

Поступила в редакцию 14.11.2014 г.

Представлены конструктивно-технологические решения по формированию GaAs СВЧ монолитной интегральной схемы (МИС) с металлизацией лицевой стороны на основе меди. В качестве металлизации омических и затворных контактов транзисторов с высокой подвижностью электронов использовались многослойные композиции Pd/Ge/Al/Mo и Ti/Al/Mo соответственно. Металлизация первого уровня была выполнена на W/Cu/WN_x. Металлизация второго уровня формировалась методом электрохимического осаждения меди, в качестве подслоя для осаждения была использована пленка Ti/Cu. Пленки Si_xN_y использовались для формирования межуровневого диэлектрика и диэлектрика конденсаторов. Для защиты пленок меди от воздействия внешней среды лицевая сторона МИС покрывалась пленкой бензоциклобутена (BCB) толщиной 5 мкм. Металлизация обратной стороны была выполнена пленкой Ni/Au общей толщиной 3 мкм. Разработанные конструктивно-технологические решения были апробированы на примере монолитной интегральной схемы малошумящего усилителя, выполненного на основе транзисторов с высокой подвижностью электронов, с длиной затвора 250 нм. Изготовленная СВЧ МИС в диапазоне частот 8–10 ГГц имела коэффициент усиления 28 ± 1 дБ, коэффициент шума не превышал 2 дБ.

DOI: 10.7868/S0544126915060046

1. ВВЕДЕНИЕ

Сверхвысокочастотные GaAs монолитные интегральные схемы (СВЧ GaAs МИС) традиционно изготавливаются с металлизацией омических и барьерных контактов, а также металлизацией разводки на основе пленок золота. Известно [1–8], что в GaAs МИС металлизация на основе Cu может с успехом заменить металлизацию на основе Au за счет лучших электрофизических параметров меди — более высоких проводимости и теплопроводности. Кроме этого, за счет низкой стоимости Cu можно ожидать и снижение себестоимости изготовления GaAs МИС. Задача промышленного производства GaAs МИС с медной металлизацией на традиционных арсенидгаллиевых технологических линиях до сегодняшнего дня не решена. Во многом это обусловлено тем, что Cu является быстродиффундирующей примесью, а в GaAs еще и примесью *p*-типа проводимости [9]. В результате при переходе на медную металлизацию технология изготовления GaAs МИС должна быть модернизирована таким образом, чтобы обеспечить формирование диффузионных барьеров, эффективно препятствующих диффузии меди. Задел, имею-

щийся в этом направлении в кремниевой микроэлектронике (дамасский или двойной дамасский процесс изготовления многослойной медной металлизации), не может быть впрямую использован в GaAs микроэлектронике, так как металлизации GaAs МИС изготавливаются с применением других технологических процессов.

К настоящему времени опубликован ряд работ, посвященных разработке различных технологических блоков маршрута изготовления GaAs МИС с медной металлизацией. Во всех этих работах в качестве основы была использована традиционная технология GaAs МИС с Au металлизацией, но конструкция элементов и технологические блоки изготовления МИС были модернизированы таким образом, чтобы нивелировать недостатки применения меди. Так, в работах [2, 6, 10–11] описаны различные варианты транзистора с омическими контактами на основе Pd/Ge/Cu [2], Cu/Ge [10], Pd/Ge/Al/Ti [6] и затвором на основе Ti/Mo/Cu [10], Ti/Al/Ti [6], Ti/Mo/CuGe [11]. В работах [2–8, 12–14] представлены технологические блоки изготовления металлизации первого [4, 6, 12] и второго [2, 3, 5] уровней, а также металлизации об-

ратной стороны пластины [7–8, 13–14] на основе меди. Интеграция технологических блоков, разработанных в различных работах, в единый маршрут изготовления GaAs МИС не является процессом простого сложения и требует, с одной стороны, разработки оптимальной конструкции элементов МИС, а с другой, учета влияния предыдущих операций технологического маршрута на результат последующих.

Настоящая работа посвящена разработке конструктивно-технологических решений формирования элементов GaAs СВЧ МИС маломощного усилителя (МШУ) на основе транзистора с высокой подвижностью электронов с длиной затвора 250 нм, с металлизацией лицевой стороны на основе меди, а также разработке и апробации технологического маршрута ее изготовления.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах были использованы полуизолирующие пластины GaAs, на поверхности которых методом молекулярно-лучевой эпитаксии была выращена гетероструктура AlGaAs/InGaAs/AlGaAs. Формирование элементов МИС проводилось с использованием методов контактной и электронно-лучевой литографий.

Формирование межэлементной изоляции активных элементов МИС выполнялось посредством жидкостного травления GaAs меза-структуры в растворе $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$. В качестве металлизации омических контактов транзисторов с высокой подвижностью электронов была использована многослойная тонкопленочная композиция Pd/Ge/Al/Mo, осаждаемая методом электронно-лучевого испарения. Отжиг омических контактов проводился на горячей плите в диапазоне температур 200–450°C в течение 5–20 мин. Т-образные затворы транзисторов на основе трехслойной композиции Ti/Al/Mo имели длину основания 250 нм и осаждались методом электронно-лучевого испарения.

Металлизация первого уровня и металлизация нижней обкладки конденсатора изготавливалась из тонкопленочной композиции W/Cu/WN_x с толщинами слоев 40/380/50 нм. Слои планарных и торцевых W и WN_x диффузионных барьеров формировались с помощью магнетронного распыления вольфрамовой мишени в газовой среде аргона в DC режиме, а также в среде аргона и азота в импульсном DC режиме соответственно. Слой Cu осаждался методом направленного электронно-лучевого испарения.

Металлизация второго уровня формировалась методом электрохимического осаждения пленки Cu толщиной 3 мкм из электролита $\text{CuSO}_4 : \text{H}_2\text{SO}_4$ (100 : 70 г/л) на постоянном токе, а также в ре-

версном режиме. Плотность тока варьировалась в диапазоне 0.05–0.5 мА/мм². В реверсных режимах частота реверса менялась в диапазоне 0.1–100 Гц, а соотношение длительности приложения прямого тока к длительности обратного тока варьировалось от 9 : 1 до 6 : 4. В качестве подслоя для электрохимического осаждения Cu была использована двухслойная композиция Ti/Cu, получаемая методом электронно-лучевого испарения, с толщинами слоев 30 и 80 нм соответственно. Шероховатость поверхности тонких пленок оценивалась визуально.

Тонкопленочные резисторы формировались магнетронным распылением мишени из сплава PC5406H в среде аргона на постоянном токе.

Для формирования диэлектрика конденсатора, обеспечения межуровневой изоляции, а также для пассивации элементов МИС использовались пленки Si₃N₄. Окна в диэлектрической пленке к нижележащим элементам МИС формировались методом реактивно-ионного травления в индуктивно-связанной плазме. Финальная пассивация поверхности МИС была выполнена пленкой BCB толщиной 5 мкм.

Для формирования обратной стороны МИС пластина утонялась до толщины 100 мкм. Формирование сквозных отверстий производилось методом реактивно-ионного травления в индуктивно-связанной плазме. Металлизация обратной стороны пластины выполнялась на основе пленок Ni и Au, осажденных химическим и электрохимическим методами соответственно. Общая толщина металлизации составляла 3 мкм.

Микроскопические изображения элементов МИС получались с помощью сканирующей электронной микроскопии. Измерение малосигнальных параметров МИС проводилось на пластине с помощью зондовой станции Suss-PA200 с использованием векторного анализатора цепей P4M-18 и измерителя коэффициента шума N8975A.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Конструкция элементов GaAs СВЧ МИС

Конструкции элементов GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе меди представлены на рис. 1. Применение меди вместо золота в составе металлизации потребовало внесения ряда изменений, позволяющих ограничить ее диффузию в GaAs, а также взаимодействие с окружающей средой. Основные принципы, положенные в основу конструкций, можно сформулировать следующим образом.

1. Исключение прямого контакта пленок меди с поверхностью GaAs. В данной работе затворные и омические контакты были выполнены с ис-

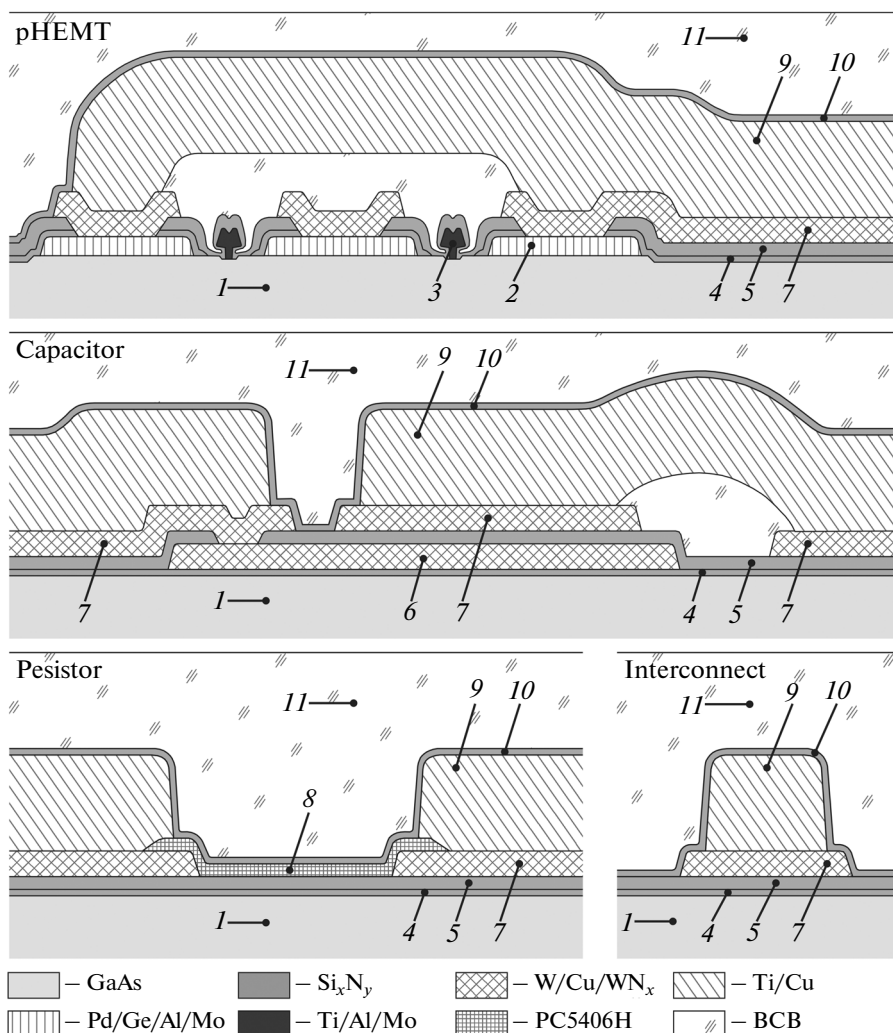


Рис. 1. Конструкция элементов GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе меди: 1 – подложка; 2 – омический контакт; 3 – затвор; 4, 5, 10 – слои Si_xN_y; 6 – нижняя обкладка конденсатора; 7 – металлизация первого уровня; 8 – резистор; 9 – металлизация второго уровня; 11 – слой BCB.

пользованием пленок Al [6], а все пассивные элементы МИС формировались на поверхности диэлектрической пленки Si_xN_y.

2. Формирование пассивации всей поверхности медного проводника слоями планарных (горизонтальных) и торцевых (вертикальных) диффузионных барьеров, препятствующих распространению меди в близлежащий материал. В настоящей работе для этого использовались слои Mo, W, WN_x и Si_xN_y.

3. Предотвращение взаимодействия меди с окружающей средой (атмосферой и химическими веществами, используемыми при изготовлении МИС). Для этого поверхность медных элементов МИС покрывалась пленками WN_x, Si_xN_y и BCB.

Рассмотрим более подробно конструкцию отдельных элементов МИС. На рис. 1 сверху представлена конструкция транзистора с высокой подвижностью электронов. На поверхности пластины

GaAs (рис. 1, поз. 1), располагаются Pd/Ge/Al/Mo омические контакты (рис. 1, поз. 2). Затвор на основе композиции Ti/Al/Mo (рис. 1, поз. 3) формируется в щели шириной 1 мкм, вытравленной в первом слое Si_xN_y (рис. 1, поз. 4). При этом металлизированная шина, объединяющая отдельные затворы транзистора, располагается на поверхности первого слоя Si_xN_y. Второй слой Si_xN_y (рис. 1, поз. 5) используется для пассивации поверхности GaAs в области подзатворного заглубления, а также поверхности транзистора. Первый уровень металлизации W/Cu/WN_x располагается на поверхности двух слоев диэлектрика. Для формирования электрического контакта между металлизацией первого уровня (рис. 1, поз. 7), а также омическими и затворными контактами в двух слоях диэлектрика сформированы окна. Боковые стенки окон имеют пологий профиль, что препятствует образо-

ванию разрывов в слоях металлизации. Слой W образует нижний планарный барьер, который препятствует диффузии меди в нижележащие элементы МИС. Слой WN_x создает верхний планарный и торцевые барьеры, которые, с одной стороны, препятствуют диффузии меди, а с другой — защищают ее от воздействия внешней среды. Непосредственно над первым уровнем располагается второй уровень металлизации, выполненный на основе двухслойной композиции Ti/Cu общей толщиной 3 мкм (рис. 1, поз. 9). Для электрического соединения площадок контактов истоков транзистора используется второй уровень металлизации, выполненный в виде “воздушных” мостов. Поверх второго уровня металлизации поверхность МИС покрыта третьим слоем Si_xN_y (рис. 1, поз. 10) и слоем BCB (рис. 1, поз. 11).

Ниже на рис. 1 представлена конструкция конденсатора. Нижняя обкладка конденсатора (рис. 1, поз. 6) лежит на первом слое Si_xN_y (рис. 1, поз. 4) и выполнена на основе композиции $W/Cu/WN_x$ с планарными и торцевыми диффузионными барьерами. Второй слой Si_xN_y (рис. 1, поз. 5) используется в качестве диэлектрика конденсатора, в нем сформировано окно к нижней обкладке конденсатора, стенки которого имеют пологий профиль. Металлизация первого уровня на основе $W/Cu/WN_x$ (рис. 1, поз. 7) формирует верхнюю обкладку конденсатора и электрический контакт к нижней обкладке. “Воздушный” мост во втором слое металлизации обеспечивает электрическое соединение между верхней обкладкой конденсатора и металлизацией МИС (рис. 1, поз. 9). Поверхность конденсатора защищена третьим слоем Si_xN_y (рис. 1, поз. 10) и слоем BCB (рис. 1, поз. 11).

На рис. 1 внизу представлена конструкция тонкопленочного резистора. Резистор расположен поверх двух слоев Si_xN_y (рис. 1, поз. 4 и 5). Контактные площадки резисторов выполнены на основе $W/Cu/WN_x$ металлизации первого уровня (рис. 1, поз. 7), поверх которых расположен резистивный слой (рис. 1, поз. 8). Справа от резисторов на рисунке представлена конструкция металлизации, которая состоит из первого $W/Cu/WN_x$ (рис. 1, поз. 7) и непосредственно лежащего на нем Ti/Cu второго уровня (рис. 1, поз. 9). Конструкция индуктивностей совпадает с конструкцией металлизации, при этом часть катушки выполнена в виде “воздушных” мостов, что обеспечивает соединение концов индуктивности с элементами МИС. Поверхность резистора, металлизации и индуктивности покрыта третьим слоем Si_xN_y (рис. 1, поз. 10) и слоем BCB (рис. 1, поз. 11).

3.2. Технологический маршрут формирования GaAs СВЧ МИС

За основу технологического маршрута изготовления GaAs СВЧ МИС с медной металлизацией лицевой стороны был использован маршрут изготовления МИС с традиционной металлизацией на основе золота. Маршрут был переработан и оптимизирован в соответствии с конструкцией элементов, представленной в разделе 3.1. Последовательность технологических блоков была следующей:

- формирование межэлементной изоляции;
- формирование омических контактов $Pd/Ge/Al/Mo$;
- осаждение Si_xN_y (1-й слой);
- формирование шели в пленке Si_xN_y под затворы транзисторов;
- формирование нижней обкладки конденсаторов на основе $W/Cu/WN_x$;
- формирование $Ti/Al/Mo$ затворов транзисторов;
- осаждение Si_xN_y (2-й слой);
- травление окон в слоях Si_xN_y для формирования металлизации;
- формирование металлизации первого уровня на основе $W/Cu/WN_x$;
- формирование тонкопленочных резисторов;
- формирование металлизации второго уровня на основе Ti/Cu ;
- осаждение Si_xN_y (3-й слой);
- формирование пленки BCB;
- травление окон в слоях Si_xN_y/BCB к контактными площадкам МИС;
- утонение пластины до 100 мкм;
- травление сквозных отверстий;
- формирование металлизации обратной стороны на основе Ni/Au .

Далее рассмотрим особенности технологических блоков маршрута изготовления GaAs СВЧ МИС с металлизацией на основе меди, а также результаты изготовления как элементов микросхемы, так и самой МИС.

3.3. Формирование GaAs pHEMT

В работе [11] была исследована термостабильность параметров транзисторов с металлизацией омических контактов и затворов на основе Cu/Ge и $Ti/Mo/Cu$ соответственно. Сформированные транзисторы подвергались термообработке в среде азота при температуре 250°C в интервале времени 5—120 мин. Показано, что надежность данных транзисторов недостаточна для практического применения, вследствие быстрого проникновения

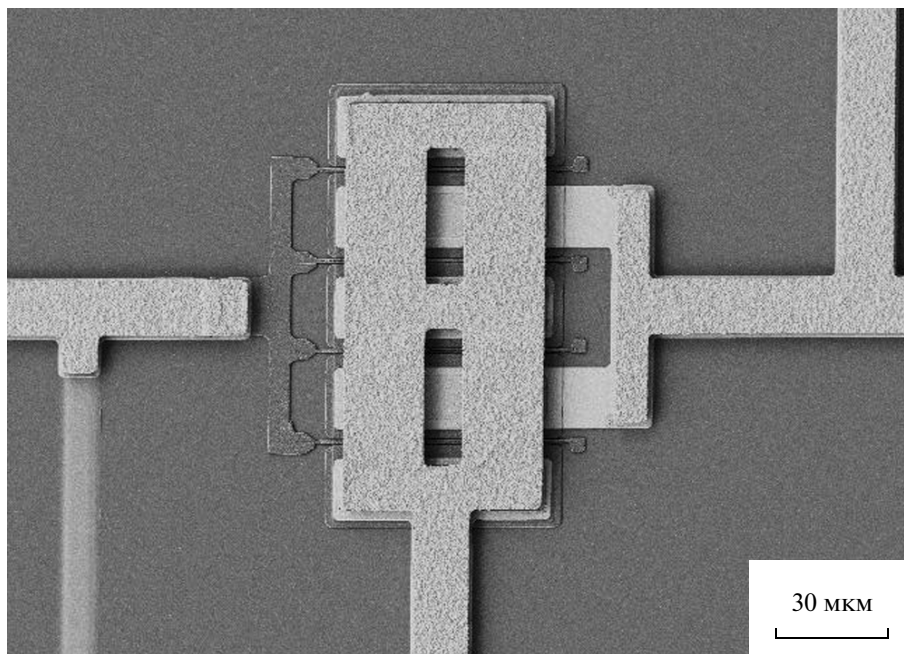


Рис. 2. Микроскопическое изображение pHEMT транзистора.

Си из металлизации контактов в GaAs. В работе [6] исследован GaAs транзистор с металлизацией омических контактов и затвора на основе композиции Pd/Ge/Al/Ti и Ti/Al/Ti соответственно. Металлизации первого и второго уровней, а также обратной стороны были выполнены на основе меди, с использованием в качестве планарных диффузионных барьеров пленок Mo и W. Показано, что такие транзисторы обладают параметрами близкими к параметрам транзисторов с традиционной металлизацией на основе Au.

В настоящей работе также были использованы омические контакты на основе Pd/Ge/Al и затворные контакты на основе Ti/Al. При этом в качестве диффузионного барьера вместо пленки Ti была использована пленка Mo, обладающая лучшими барьерными свойствами [15]. Для увеличения контрастности меток совмещения, используемых в процессе электронно-лучевой литографии, выполненных на основе металлизации омических контактов, была оптимизирована толщина пленки Mo. Оптимальная толщина, обеспечивающая необходимые значения комплекса параметров омических контактов, а также достаточный уровень контрастности меток совмещения, составила 100 нм.

Данное изменение состава металлизации омических контактов не повлияло на характер зависимости величины приведенного контактного сопротивления от температуры отжига, полученной в работе [6]. Зависимость для контактов Pd/Ge/Al/Mo также имеет характерный вид с минимумом, достигаемым после отжига при темпе-

ратуре 250°C в течение $t = 20$ мин. Приведенное контактное сопротивление при этом составляет 1.3×10^{-6} Ом см².

На рис. 2 представлено микроскопическое изображение изготовленного pHEMT транзистора. Транзистор изображен после этапа формирования второго уровня металлизации микросхемы.

Микроскопическое изображение поперечного сечения контактной площадки истока транзистора после осаждения третьего слоя Si_xN_y представлено на рис. 3. Дополнительно на врезке справа показано увеличенное изображение места соединения омического контакта с первым уровнем металлизации.

3.4. Формирование пассивных элементов

На рис. 4 представлены микроскопические изображения поперечного сечения пассивных элементов МИС: конденсатора (а), резистора (б), проводника (в). Номера позиций, представленные на рисунках, отражают последовательность выполнения технологических блоков. Слои, обозначенные одним номером, изготавливаются в рамках одного технологического блока. Например, слой 5 одновременно является металлизацией первого уровня, верхней обкладкой конденсатора, а также контактной площадкой резистора.

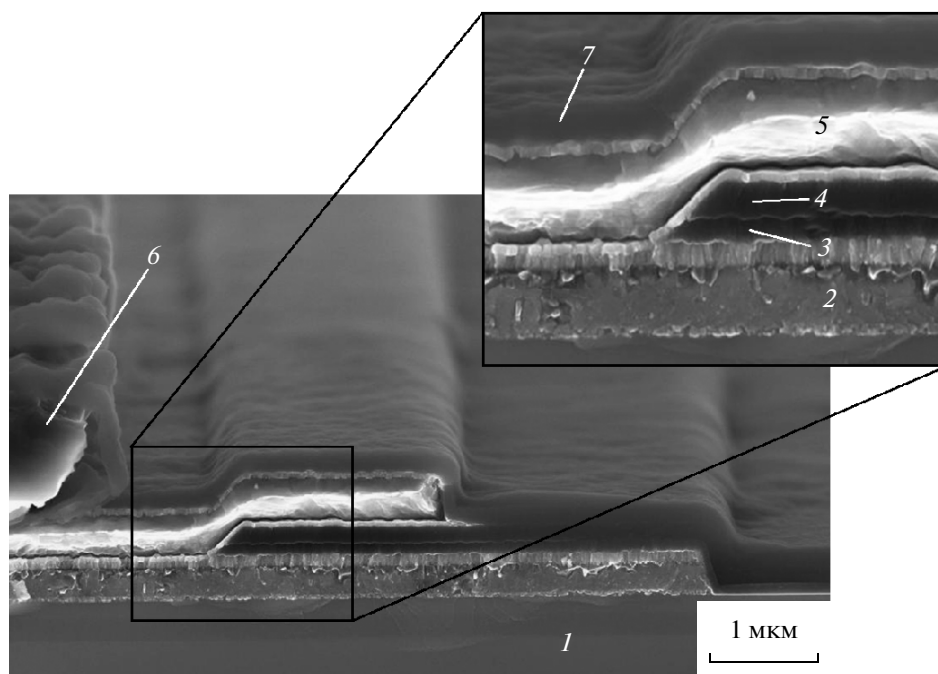


Рис. 3. Микроскопическое изображение поперечного сечения контактной площадки истока транзистора: 1 – GaAs подложка; 2 – Pd/Ge/Al/Мо омический контакт; 3, 4, 7 – слои Si_xN_y ; 5 – W/Cu/ WN_x металлизация первого уровня, 6 – Ti/Cu металлизация второго уровня.

3.5. Формирование металлизации второго уровня

На рис. 5 представлено микроскопическое изображение участка МИС со сформированной металлизацией второго уровня Ti/Cu. Оптимизация технологии изготовления металлизации проводилась по таким параметрам пленок меди, как удельное сопротивление и шероховатость поверхности.

Электрохимическое осаждение медных проводников из электролита $\text{CuSO}_4 : \text{H}_2\text{SO}_4$ на постоянном токе показало, что оптимальная плотность тока составляет 0.1 мА/мм^2 . Удельное сопротивление осажденной пленки при этом составило $2.1 \text{ мОм} \cdot \text{см}$, а поверхность пленки имела высокую шероховатость. Скорость осаждения в данном режиме составляла около 0.2 мкм/мин . Рост плотности тока приводил к дальнейшему росту шероховатости. При снижении плотности тока до 0.05 мА/мм^2 пленка меди формировалась рыхлой, с низкой адгезией и высоким удельным сопротивлением.

Известно [16], что использование реверсных режимов способствует снижению удельного сопротивления и шероховатости осаждаемой пленки. Исследование зависимостей шероховатости пленки от частоты реверса и плотности тока осаждения, при фиксированном соотношении длительностей прямого и обратного токов, показало, что при плотности тока 0.1 мА/мм^2 в диапазоне частот $0.1\text{--}100 \text{ Гц}$ морфология поверхности пленки не зависела от частоты реверса. При плотности

тока 0.3 мА/мм^2 повышение частоты реверса с 0.1 до 1 Гц приводило к значительному увеличению шероховатости. Дальнейший рост частоты до 10 Гц приводил к образованию на поверхности пленки отдельных четко выраженных зерен размером $1\text{--}2 \text{ мкм}$. На частоте 100 Гц характер расположения и форма зерен снова изменялись, морфология поверхности пленки становилась схожей с поверхностью пленки, осажденной на частоте реверса в 1 Гц . При увеличении плотности тока до 0.5 мА/мм^2 характер зависимости морфологии поверхности пленки от частоты реверса сохранялся. При этом шероховатость пленки становилась выше.

Установлено, что оптимальным режимом является осаждение при плотности тока 0.3 мА/мм^2 , с частотой реверса 0.1 Гц и соотношением длительностей прямого и обратного токов $7 : 3$. Удельное сопротивление пленки меди при этом составило $1.8 \text{ мОм} \cdot \text{см}$, а поверхность пленки имела сниженную по отношению к осаждению на постоянном токе шероховатость. Скорость осаждения в данном режиме составляла около 0.2 мкм/мин .

3.6. Характеристики GaAs СВЧ МИС

Разработанная технология изготовления СВЧ МИС с медной металлизацией была апробирована на примере МИС трехкаскадного маломощного усилителя, изначально спроектированного

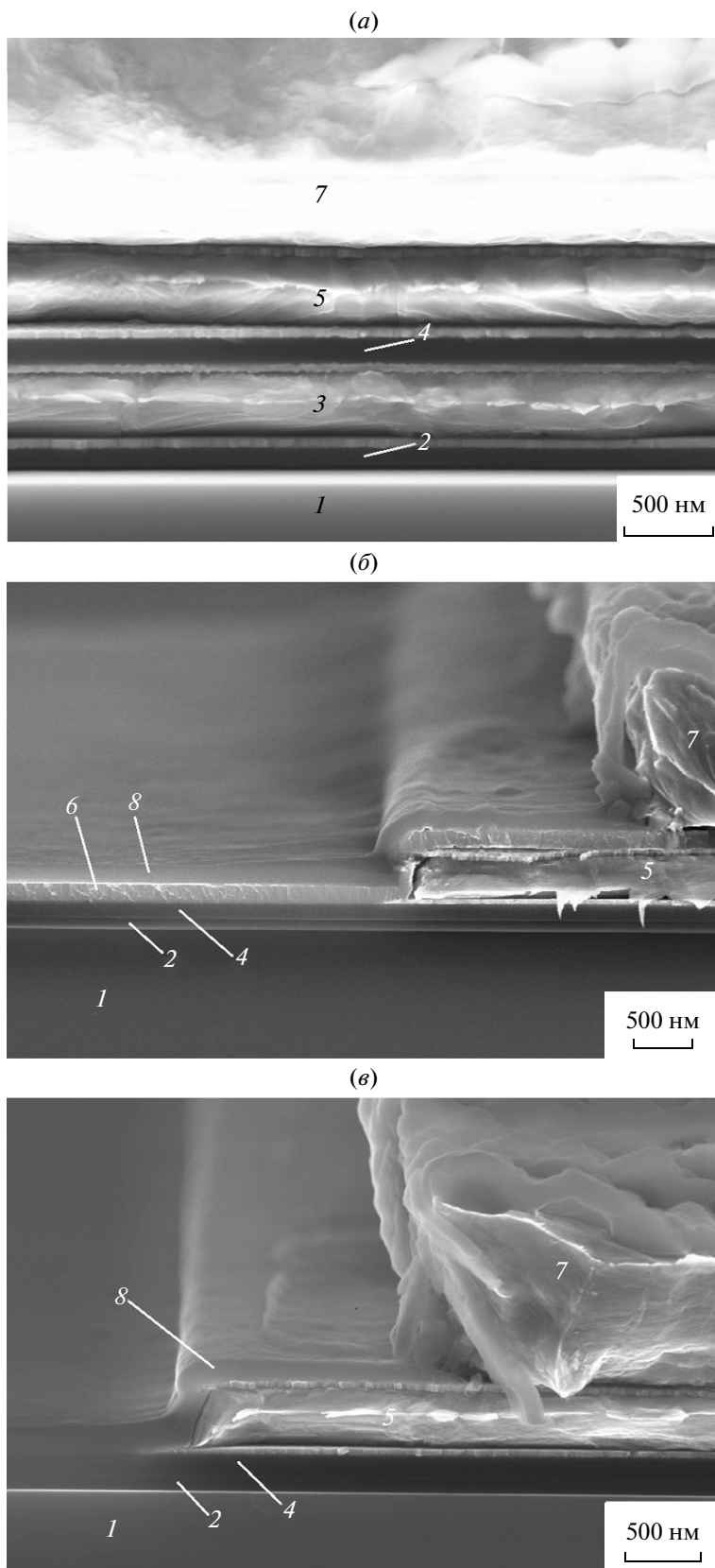


Рис. 4. Микроскопические изображения поперечного сечения конденсатора (а), резистора (б) и проводника (в) в GaAs МИС: 1 – GaAs подложка, 2, 4, 8 – слои Si_xN_y , 3 – W/Cu/WN_x нижняя обкладка конденсатора, 5 – W/Cu/WN_x металлизация первого уровня; 6 – резистор; 7 – Ti/Cu металлизация второго уровня.

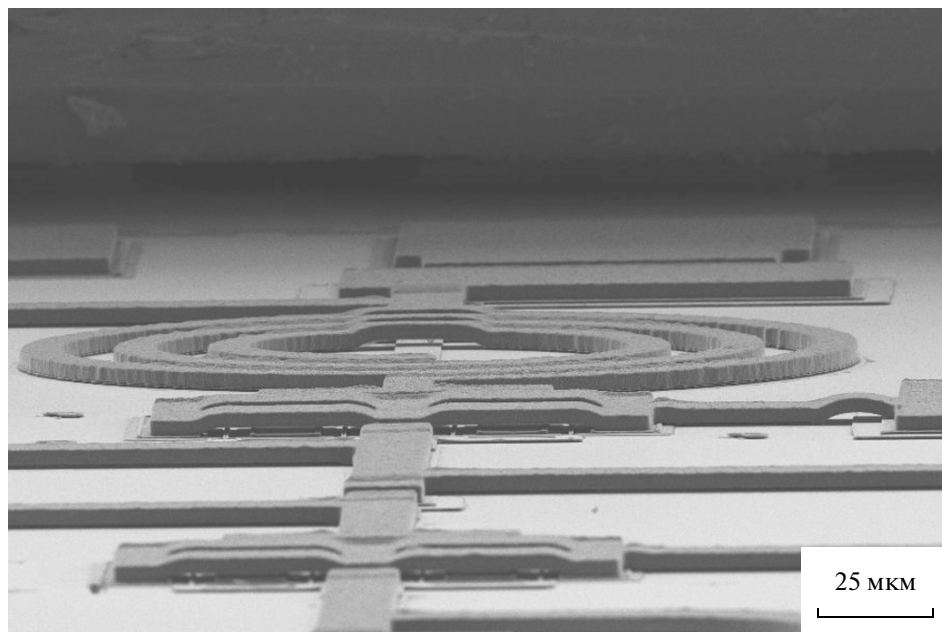


Рис. 5. Микроскопическое изображение участка GaAs МИС со сформированным вторым уровнем металлизации Ti/Cu.

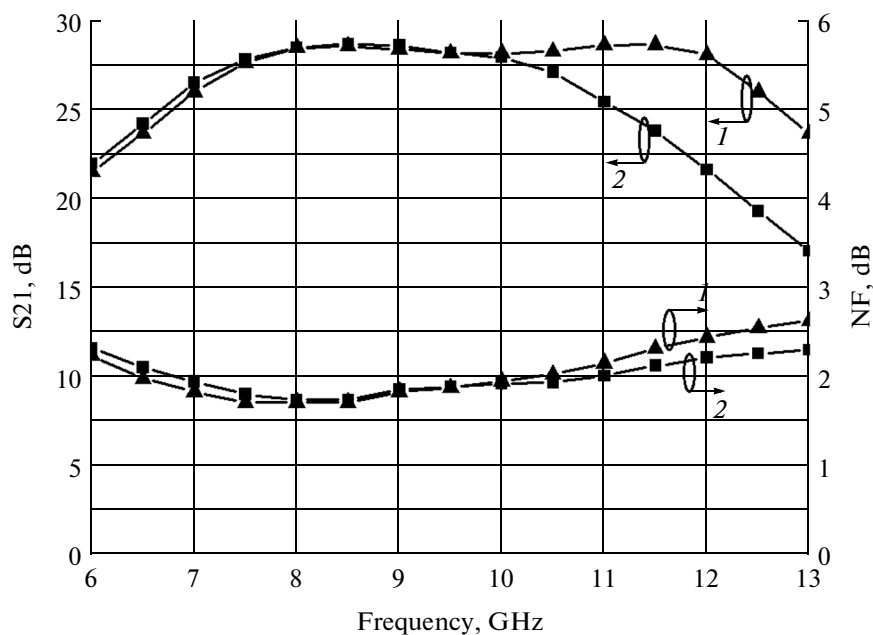


Рис. 6. Зависимость коэффициента усиления и шума от частоты для МИС МШУ с металлизацией на основе Au (1) и Cu (2).

на основе транзистора с золотой металлизацией [17]. СВЧ МИС была изготовлена без оптимизации согласующих и частотно-задающих цепей СВЧ тракта.

Сравнительный анализ параметров МИС с металлизацией на основе Au и Cu, приведенных на рис. 6, показал, что:

— МИС с металлизацией на основе Cu имела более узкий диапазон рабочих частот 8–10 ГГц, вместо 8–12 ГГц для МИС с металлизацией на основе Au;

— коэффициенты усиления и шума обоих типов МИС совпадали в пределах погрешности измерения в диапазоне частот 8–10 ГГц.

Сужение диапазона рабочих частот микросхемы обусловлено более высоким значением коэффициента стоячей волны по напряжению для МИС с металлизацией на основе меди на частотах выше 10 ГГц, что связано с несовпадением входных и выходных импедансов транзисторов с металлизациями на основе Au и Cu.

Изготовленная МИС МШУ с металлизацией на основе Cu в диапазоне частот 8–10 ГГц имела коэффициент усиления 28 ± 1 дБ, при этом коэффициент шума не превышал 2 дБ. Ток потребления МИС при напряжении питания +5 В составлял 35 мА. В качестве критерия годности выступал коэффициент усиления МИС. Выход годных кристаллов по пластине диаметром 100 мм составил 49%.

4. ВЫВОДЫ

В работе представлены конструктивно-технологические решения по формированию элементов GaAs СВЧ МИС и технология изготовления микросхем с металлизацией лицевой стороны на основе меди. На примере МИС малошумящего усилителя, выполненного на основе транзисторов с высокой подвижностью электронов с длиной затвора 250 нм, показано, что разработанная технология позволяет изготавливать МИС с параметрами близкими к параметрам МИС с металлизацией на основе Au.

Авторы работы выражают благодарность коллективу НПК “Микроэлектроника” ЗАО “НПФ “Микран” за содействие в проведении экспериментальной части работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, договор № 02.G25.31.0091.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wu Y.C., Chang E.Y., Lin Y.C., Hsu H.T., Chen S.H., Wu W.C., Chu L.H., Chang C.Y. SPDT GaAs switches with copper metallized interconnects // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2007. V. 17. № 2. P. 133.
2. Wang S.P., Lin Y.C., Tseng Y.L., Chen K.S., Huang J.C., Chang E.Y. A Cu metalized power InGaP/GaAs heterojunction bipolar transistor with Pd/Ge/Cu alloyed ohmic contact. CS MANTECH Conf. Proc. Tampa, USA, 2009. <http://www.csmantech.org/Digests/2009/2009%20Papers/6.2.pdf>
3. Chang C.W., Chen P.C., Lee H.M., Chen S.H., Sahoo K.C., Chang E.Y., Liang M.W., Hsien T.E. InAlAs/InGaAs metamorphic high electron mobility transistor with Cu/Pt/Ti gate and Cu airbridges // Jap. J. Appl. Phys. 2007. V. 46. № 5A. P. 2848.
4. Chang S.W., Chang E.Y., Chen K.S., Hsieh T.L., Tseng C.W. A gold free fully copper metallized InGaP/GaAs HBT. 12th GAAS Symposium, Amsterdam, Netherlands, 2004.
5. Lee C.S., Lien Y.C., Chang E.Y., Chang H.C., Chen S.H., Lee C.T., Chu L.H., Chang S.W., Hsien Y.C. Copper air bridged low-noise GaAs PHEMT with Ti/WN_x/Ti diffusion barrier for high frequency applications // IEEE Trans. Electron Dev. 2006. V. 53. № 8. P. 1753.
6. 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. V. 1. № 12. P. 191.
7. Chen C.Y., Chang L., Chang E.Y., Chen S.H., Lin Y.C. The performance of the power MESFET with copper backside metallization // Solid-State Electronics. 2002. V. 46. P. 2085.
8. Chen C.Y., Chang E.Y., Chang L., Chen S.H. Backside copper metallisation of GaAs MESFET's using TaN as the diffusion barrier // IEEE Trans. Electron Dev. 2001. V. 48. № 6. P. 1033.
9. Wang Z.G., Gislason H.P., Monemar B. Acceptor associates and bound excitons in GaAs : Cu // J. Appl. Phys. 1985. V. 58. P. 230.
10. Erofeev E.V., Arykov V.S., Anishchenko E.V., Kagadei V.A. 150 nm copper metalized GaAs pHEMT with Cu/Ge ohmic contacts. EuMIC, Paris, France, 2010.
11. Erofeev E.V., Arykov V.S., Anishchenko E.V., Kagadei V.A. Thermal stability of gold free fully Cu/Ge metalized GaAs pHEMT. EuMIC, Manchester, UK, 2011.
12. Ишуткин С.В., Анищенко Е.В., Ерофеев Е.В., Кагадей В.А. Формирование межэлементной металлизации на основе меди в GaAs СВЧ МИС // Электронная техника. СВЧ-техника. 2013. Т. 4. С. 201.
13. Tsunami D., Nishizawa K., Oka T., Shiga T., Oku T., Takemi M. Palladium diffusion barrier grown by electroplating for backside Cu metallization of GaAs devices. CS MANTECH Conf. Proa, New Orleans, USA, 2013. <http://www.csmantech.org/Digests/2013/papers>
14. Chen J., Hua C.H., Chu W. Patent US20130277845 A1.
15. Bassiri G. Diffusion effect of intermetallic layers on adhesion and mechanical properties of electrical contacts // Fundamentals of Nanotechnology: From Synthesis to Self-Assembly. <http://fp.okstate.edu/nanotech/Reports/Review%20Papers/finalprojectbassire.pdf>
16. Гальванические покрытия в машиностроении / Под ред. Шлугера М.А., Тока Л.Д. М.: Машиностроение, 1985.
17. Кондратенко А.В., Баров А.А., Арыков В.С. GaAs МИС малошумящего усилителя X-диапазона. Матер. Всеросс. конф. Микроэлектроника СВЧ, Санкт-Петербург, 4–7 июня 2012. С. 160.