

Экз. №

На правах рукописи

ЛАПИН Владимир Григорьевич

УДК.621.385.6

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ
КОНТАКТОВ И ГРАНИЦЫ АКТИВНОГО СЛОЯ С
ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ И
УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СВЧ ПОЛЕВЫХ
ТРАНЗИСТОРОВ**

**Специальность 05.27.01 «Твердотельная электроника,
радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника,
приборы на квантовых эффектах»**

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

г. Фрязино 2009 г.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-производственное предприятие «Исток».

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук **Пашковский А.Б.**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, начальник лаборатории **Вальд-Перлов В.М.**

кандидат технических наук, начальник отдела **Обрезан О.И.**

Ведущая организация Институт СВЧ полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ) г. Москва.


Защита состоится 20 октября в 11 часов на заседании диссертационного совета Д409.001.01 при ФГУП «НПП «Исток» по адресу: 141190, Московская область, г.Фрязино, Вокзальная, д. 2а. Большой конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НПП «Исток»

Автореферат разослан 4 сентября 2009 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета

кандидат физико-математических наук  **Погорелова Э.В.**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из основных задач современной электроники является улучшение характеристик полупроводниковых приборов, повышения их быстродействия, рабочих частот и увеличения выходной мощности, а также уменьшение размеров и создание монолитных интегральных схем (МИС). Несмотря на огромный прогресс в развитии элементной базы за последние годы, основными активными элементами в диапазоне частот от единиц до сотен ГГц остаются полевые транзисторы с барьером Шоттки (ПТШ) на арсениде галлия, других соединениях A_3B_5 , и различных гетероструктурах на их основе. Полевые транзисторы термостабильны, а также имеют высокие характеристики в СВЧ диапазоне и более универсальны в части их применения по сравнению с гетеробиполярными транзисторами или различными типами диодов в ряде частотных диапазонов. Кроме того технология ПТ позволяет формировать их одновременно с другими элементами в едином цикле изготовления МИС СВЧ.

Несмотря на огромное количество разработок в этой области и сообщений о рекордных результатах наметился колоссальный разрыв между лабораторными исследованиями, проводимыми на уникальном дорогостоящем и малопроизводительном оборудовании и промышленным производством, в котором на первое место выходят не единичные уникальные результаты, а возможность массового производства, стабильность параметров, низкая стоимость, возможность изготовления на достаточно простом и дешевом оборудовании и т.д.

Именно по этим причинам на мировом рынке в основном задействована небольшая группа компаний производящих мощные полевые транзисторы и монолитные интегральные схемы на их основе.

Требования экономической независимости и национальной безопасности приводят к необходимости иметь отечественную элементную базу, параметры которой были бы сравнимы с серийными мировыми аналогами с учетом особенностей и возможностей имеющегося оборудования. Исходя из этого, специфика представленной работы заключается именно в том, что практически

все разработки полевых транзисторов производились с учётом этих требований.

Вопросы расчёта и проектирования и изготовления ПТ отражены во множестве статей и научных работ, однако, ряд вопросов по стабилизации и улучшения параметров приборов при массовом производстве на серийном оборудовании до сих пор остается открытым. Влияние глубоких энергетических уровней и поверхностных состояний, проблемы формирования омических контактов, обработка поверхности и проблемы формирования барьерных контактов, а также достижение минимальной длины затвора при минимальном сопротивлении и точное его позиционирование в канале – вот неполный перечень проблем, которые необходимо решать при разработке и серийном выпуске полевых транзисторов.

Это приводит, в ряде случаев, к необходимости создания дополнительных методик, дополняющих общепринятые методы изготовления полевых транзисторов.

Цель работы – разработка способов изготовления и технологических процессов, позволяющих существенно улучшить и стабилизировать выходные параметры транзисторов.

Постановка задачи – для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- исследовалось влияние глубоких уровней на характеристики серийных полевых транзисторов;
- разрабатывался способ легирования позволяющий минимизировать как утечки по буферному слою, так и влияние глубоких уровней на параметры транзистора;
- разрабатывался способ вжигания омических контактов, позволяющий существенно уменьшить паразитные сопротивления истока и стока транзистора и улучшить их повторяемость.
- исследовались процессы травления и разрабатывался метод очистки поверхности перед нанесением барьерного электрода.
- разрабатывался метод наклонного напыления самосовмещенных затворных электродов, позволяющий существенно стабилизировать процесс смещения затвора к истоку транзистора;
- разрабатывался метод наклонного напыления затворных электродов, позволяющий существенно уменьшить длину затвора

транзистора без использования электронной литографии с соответствующим разрешением и без увеличения сопротивления металлизации затвора;

Объектом исследования служат – мощные полевые СВЧ транзисторы с большой шириной затвора.

Предметом исследования служат – структуры полевых транзисторов, методики изготовления омических и барьерных контактов.

Научная новизна. В диссертации впервые получены следующие результаты:

1. Предложен способ дельта легирования буферного слоя транзистора примесью р- типа позволяющий минимизировать как утечки по буферному слою, так и влияние глубоких уровней на параметры транзистора.

2. Разработаны методики обработки поверхности и вжигания электродов, позволяющие существенно улучшить характеристики омических и барьерных контактов.

3. Предложен и разработан метод наклонного напыления самосовмещенных затворных электродов, позволяющий существенно стабилизировать процесс смещения затвора к истоку транзистора.

4. Предложен и разработан способ наклонного напыления затворных электродов, позволяющий существенно уменьшить длину затвора транзистора без использования электронной литографии с соответствующим разрешением и без увеличения сопротивления металлизации затвора.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Дельта легирование буферного слоя полупроводниковых структур примесью р- типа позволяет на несколько порядков снизить токи утечки и уменьшить влияние глубоких уровней в буферном слое на характеристики полупроводниковых приборов.

2. Загрязнению поверхности GaAs углеродом за счет разрушения фоторезиста при проведении химических обработок перед осаждением барьера Шоттки устраняется плазмохимической очисткой в сочетании с удалением окислов в растворе соляной кислоты и аммиака.

3. Напыление диффузионного барьера LaB_6 при формировании омических контактов блокирует миграцию Ga, и обратную миграцию Ai, что позволяет уменьшить переходное сопротивление в несколько раз.

4. Наклонное напыление затворных электродов, позволяет стабилизировать процесс смещения затвора к истоку транзистора и уменьшить длину затвора транзистора до размеров менее 0.15 мкм без использования литографии с соответствующим разрешением и без увеличения сопротивления металлизации затвора.

Практическая ценность работы.

Предложен способ дельта легирования буферного слоя транзистора примесью р – типа позволяющий минимизировать как утечки по буферному слою, так и влияние глубоких уровней на параметры полевых транзисторов. Разработаны методики обработки поверхности и вжигания электродов, позволяющие существенно улучшить характеристики омических и барьерных контактов (использованы при производстве серийных транзисторов). Разработаны методы наклонного напыления затворных электродов, позволяющие стабилизировать процесс смещения затвора к истоку транзистора и уменьшить длину затвора транзистора до размеров менее 0,15 мкм без использования электронной литографии с соответствующим разрешением и без увеличения сопротивления затвора.

Разработанные методы использованы при разработке параметрического ряда транзисторов (ЗП612 А,Б,В ЗП976 А,Б,В,Г,Д, «Плафон»), выпускаемых серийно. Применение этих методов позволило:

– продвинуться в диапазон 12...18 ГГц при выходной мощности 850...700 мВт/мм при коэффициенте усиления не менее 8 дБ.

– в условиях серийного производства повысить выход годных транзисторов с 5÷10% до 20÷40% .

Апробация результатов работы.

Результаты работы опубликованы в материалах следующих международных конференций: "GaAs 2000" Conference proceedings, 2nd-3rd October 2000, Paris, "СВЧ-техника и телекоммуникационные

технологии", «КрыМикО» 11-15 сентября 2000г., 10-14 сентября 2001г., 14-18 сентября 2009г., Севастополь,

Освоено серийное производство полевых транзисторов.

Публикации. По материалам работы автором опубликовано 16 печатных работ, получено 3 патента РФ.

Объём работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы. Работа выполнена на 129 страницах текста, содержит 64 рисунка, 13 таблиц и список литературы из 119 наименований.

Содержание и результаты работы.

Во введении дано обоснование актуальности темы работы, определены цели и задачи исследований, перечислены основные результаты, выводы и рекомендации, научные положения, выносимые на защиту. Обоснована практическая значимость работы.

В первой главе приведены результаты исследований автором глубоких уровней в полупроводниковых структурах и предложен оригинальный способ уменьшения их влияния на характеристики полупроводниковых приборов.

В разделе 1.1. представлены результаты измерений характеристик полевых транзисторов ФГУП НПП «Исток» с глубокими уровнями. Продемонстрировано, что в ряде случаев у всех приборов, изготовленных на некоторых из структур или у группы транзисторов, образующих на поверхности структуры локальную область достаточно больших размеров, ВАХ могут иметь аномальный вид. Корреляция между видом ВАХ и электрофизическими параметрами гетероструктур при этом не отмечалась. Подобные ВАХ наблюдались в том числе и у транзисторов, сформированных на ГСЛ с достаточно выраженными осцилляциями Шубникова-де-Гааза, высокими значениями подвижности и поверхностной плотности электронов. Наблюдаемые эффекты нельзя было связать с утечкой тока по подложке, т.к. ток между отдельными мезаструктурами практически отсутствовал. Приведены типичные спектры глубоких уровней, состоящие из двух пиков, соответствующих уровням с энергиями ионизации 0,38 и 0,42 эВ, что хорошо согласуется с энергиями ионизации DX-центра в $Al_xGa_{1-x}As$, легированном кремнием и концентрациями в образцах различных транзисторов от $2 \cdot 10^{16}$ до 10^{18} см⁻³. В структурах некоторых полевых транзисторов методом

фотолюминесценции обнаружен также уровень с энергией ионизации 0,25 эВ и концентрацией $(0,5 \div 1) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Однако его присутствие не коррелировало с особенностями ВАХ транзисторов.

В разделе 1.2. экспериментально изучены процессы захвата, возникающие в арсенидгаллиевых полевых транзисторах с барьером Шотки. Показано, что в сильных электрических полях, при которых под затвором формируется статический домен вследствие проникновения электронов в область со свободными центрами захвата (буферный слой либо подложку), происходит локальная модуляция толщины канала транзистора. Этот эффект приводит к появлению зависимости крутизны и тока насыщения вольт-амперных характеристик от частоты и длительности переменного сигнала, что является причиной временного дрейфа параметров приборов. Установлено, что механизм дрейфа параметров транзистора как при работе на импульсах, так и в СВЧ диапазоне обусловлен аналогичными причинами.

В разделе 1.3. представлены экспериментальные результаты по исследованию фоточувствительности арсенидгаллиевых полевых транзисторов в сильных электрических полях. Приведены данные, свидетельствующие об определяющей роли n-i-перехода пленка – подложка. Установлено наличие трех областей с разным знаком фотопроводимости. Показано, что характер фотоотклика приборов определяется не столько природой глубоких центров вблизи n-i-перехода, возбуждаемых данной подсветкой, сколько процессами формирования области сильного поля и перераспределения напряжения между ней и остальной частью прибора.

В разделе 1.4. предложен простой способ [Патент РФ на полезную модель №8069] позволяющий резко уменьшить влияние глубоких уровней в буферном слое на характеристики полупроводниковых приборов. Суть его состоит в том, что для того чтобы предотвратить проникновение электронов в буферный слой и дефектов в область активного слоя на границе активный – буферный слой предлагается создать дополнительный потенциальный барьер высотой несколько (1,2В) меньше ширины запрещенной зоны соответствующего полупроводника сформированный на $(\delta p - i)$ слоях.

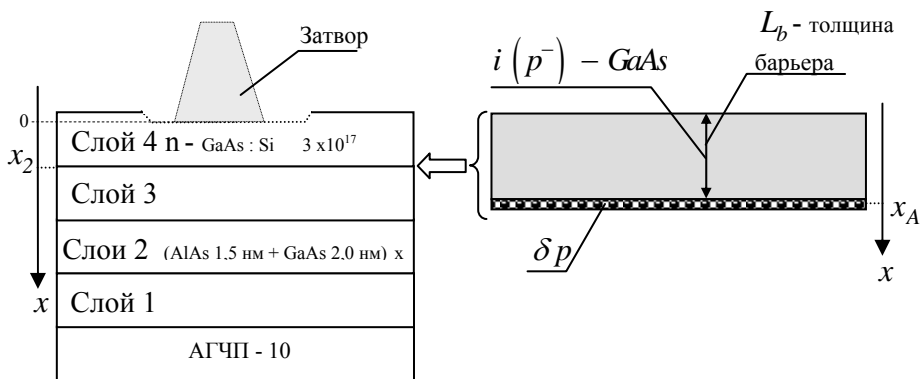


Рис.1.

Представлены результаты расчетов положения δp - слоя в зависимости от степени легирования и толщины активного слоя, и экспериментальные данные по измерению токов утечки через модельные диодные структуры. Показано, что независимо от качества подложки введение дополнительного потенциального барьера уменьшает токи утечки полупроводниковых структур на несколько порядков.

Во второй главе рассматриваются способы улучшения качества омических и барьерных контактов путем использования новых материалов и специальной химической очистки поверхности и уменьшение чувствительности транзисторных структур к концентрации дефектов за счет использования эпитаксиальных структур с пониженной подвижностью электронов и повышенными пороговыми полями, в частности фосфида индия.

В разделе 2.1. представлены результаты исследования влияние химических обработок на характеристики барьеров Шотки в полевых транзисторах.

Продемонстрировано, что при наличии большого количества углерода на границе раздела металл-полупроводник в ПТШ могут наблюдаться как временные неустойчивости ВАХ, так и утечки в низкотоковой области ВАХ барьеров. Показано, что при проведении химических обработок перед осаждением барьера наблюдается загрязнение поверхности GaAs углеродом в основном за счет разрушения фоторезиста. Результаты проведенных исследований позволили сделать вывод о необходимости дополнительных

обработок поверхности арсенида галлия для обеспечения необходимых технологических и электрических параметров. В настоящее время пластины без резиста перед электронной литографией обрабатываются в плазме O_2 в течении 2 минут, а затем в аммиачном растворе ($NH_4OH:H_2O$ (1:10)) в течении 15 секунд.

Пластины с резистом перед следующей операцией (кроме затворной литографии) обрабатываются в плазме O_2 в течении 1 минуты, а затем в солянокислом растворе ($HCl:H_2O$ (1:1)) в течении 10 секунд. Пластины с затворной литографией обрабатывают в плазме O_2 в течении 30 секунд, а затем в солянокислом растворе ($HCl:H_2O$ (1:1)) в течении 10 секунд. Травят GaAs перед напылением затворной металлизации в сернокислотно-перекисном травителе, амиачно-перекисных травителях (разных составов) и цитратноперекисном травителе. Перед нанесением фоторезистов при фотолитографиях «мосты» и «гальваника» на пластины наносят слой промоутера адгезии – гексаметилтрисилазан. Перед напылением нижних обкладок конденсаторов и подслоя пластины обрабатывают в течении 10 – 15 секунд в амиачно-перекисном травителе ($H_2O_2:NH_4OH:H_2O$ (1:1:125)). Все перечисленные дополнительные операции включены в технологические маршруты изготовления транзисторов и различных монолитных интегральных схем.

Основными требованиями к омическим контактам являются низкое сопротивление, воспроизводимость параметров при изготовлении и надежность при эксплуатации.

В разделе 2.2. представлены результаты исследования одного из перспективных претендентов на использование в качестве диффузионного барьера для омических контактов – гексаборида лантана. Гексаборид лантана LaB_6 обладает сравнимым с TiB_2 сопротивлением, но меньшей температурой плавления. Его характеристики практически сохраняются при некотором нарушении стехиометрического состава, неизбежном при распылении.

Напыление диффузионного барьера LaB_6 при формировании омических контактов методом обратной («взрывной») литографии и исследование их параметров проводились на стандартных транзисторах и тестовых структурах. Для изготовления ПТШ использовались арсенидгаллиевые структуры типа $i-n_0-n-n^+$ с концентрацией носителей заряда в n^+ -слое, равной $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Перед напылением слоев омического контакта Ni/AuGe с целью удаления остатков резиста поверхность структуры GaAs обрабатывалась в

плазме кислорода на установке типа 08ПХ0-100-001 в течение 1 мин при мощности 600 Вт, окислы удалялись химическим травлением в $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}=1:1$.

С целью уменьшения сопротивления Ni, способствующий большему внедрению Ge в GaAs, наносился тонким слоем на поверхность GaAs

Напыление системы Ni/AuGe/LaB₆/Au на пластины GaAs осуществлялось в едином технологическом процессе. Ni (5 ... 6 нм), эвтектический сплав AuGe (40 ... 50 нм) и Au (300 ... 400 нм) распылялись методом резистивного нагрева, LaB₆ (100... 150 нм) – электронным лучом. Толщина напыляемых материалов и ее воспроизводимость от процесса к процессу контролировались с помощью резистивных датчиков. Вплавление омических контактов проводилось в потоке H₂ при температуре 410° С в течение 30 с (нагрев и выдержка) и быстром охлаждении (перемещении пластин в холодную зону печи после вплавления в течение 1–2 с).

По результатам исследований оказалось, что традиционная металлизация омических контактов имеет большее сопротивление, а на поверхности присутствует Ga. Это объясняется миграцией его из GaAs через верхний слой золота, в то время как LaB₆ препятствует этому явлению.

Изготовленные образцы омических контактов исследовались на стабильность при повышенных температурах. Прогрев образцов при температуре 200° С в течение 6 ч в обоих случаях не изменил сопротивления, однако состояние поверхности в контактах без диффузионного барьера существенно ухудшилось за счет увеличения Ga до 60% (Au осталось только 36%). При прогреве омических контактов при 350° С, оказалось, что в течение первых 6 ч происходит заметное ухудшение сопротивления, затем следует длительный период медленного его возрастания. Контактное сопротивление после 45 ч прогрева при 350° С не превышает $5,5 \cdot 10^{-7}$ Ом • см², что свидетельствует о достаточной эффективности слоя LaB₆, блокирующего миграцию Ga, и обратную миграцию Au.

В разделе 2.3. приведены результаты исследования полевых транзисторов на фосфиде индия. Дело в том, что резкое улучшение характеристик ПТ может быть достигнуто за счет использования новых полупроводниковых материалов и гетероструктур, среди которых важное место занимают двойные и тройные соединения индия. Для увеличения быстродействия транзистора желательно

увеличивать всплеск дрейфовой скорости под субмикронным затвором. Достигается это обычно за счет увеличения подвижности электронов. Однако при высокой подвижности электронов структура становится крайне чувствительной к наличию в ней дефектов. Поэтому использование структур с повышенной подвижностью накладывает очень высокие требования на чистоту исходных материалов и изготовление. Кроме того для повышения подвижности обычно используют узкозонные материалы, что резко снижает пробивные напряжения. Соответственно мощность транзистора растет существенно меньше чем его ток.

Для решения этих проблем есть один крайне перспективный путь – использование относительно широкозонных материалов, в частности фосфида индия, которые из-за большого энергетического зазора между Г- и L- долинами и большого порогового поля могут иметь скорость насыщения электронов большую чем в GaAs. Теоретический анализ показывает, что даже при вдвое меньшей подвижности электронов ПТ из InP имеют преимущество перед ПТ из GaAs по предельной частоте усиления, по току и коэффициенту усиления, за счет большего «всплеска» скорости электронов. Представляет интерес исследовать улучшение характеристик таких приборов не только теоретически, но и экспериментально особенно при субмикронных затворах, когда эффекты всплеска дрейфовой скорости электронов играют особенно важную роль.

Для создания полевых транзисторов использовались эпитаксиальные структуры, с подвижностью электронов $\mu=2800$ см²/В·с при 300 К. Надо отметить, что в InP экспериментальное значение подвижности электронов при концентрации доноров $N=10^{17}$ см⁻³ близко к величине, получаемой из расчетов методом Монте-Карло ($\mu = 2900$ см²/В·с), что говорит как о высоком качестве полученных эпитаксиальных структур (а также их гораздо меньшей чувствительности к дефектности), так и высоком качестве технологии изготовления транзистора. Приведены экспериментальные характеристики полученных приборов, произведено их сравнение с теоретическими расчетами и продемонстрировано, что транзисторы на основе InP имеют коэффициент усиления на 2 дБ больший чем соответствующие транзисторы на основе GaAs. Все эти результаты говорят о перспективности использования материалов с большим энергетическим зазором между Г- и L- долинами, высоким пороговым

полем и сравнительно большой шириной запрещенной зоны для разработки мощных высокочастотных транзисторов.

В третьей главе представлены результаты разработок полевых транзисторов с самосовмещенным затвором смещенным к истоку.

Коэффициент усиления и коэффициент шума транзистора в основном зависят от длины затвора и его сопротивления – чем короче затвор и меньше его сопротивление, тем, при прочих равных условиях, выше коэффициент усиления и меньше коэффициент шума. Выходная мощность СВЧ полевых транзисторов с барьером Шотки, зависит в основном от ширины электрода затвора и пробивного напряжения.

Однако при достаточно большой ширине единичного электрода затвора, из-за роста его сопротивления и фазовых набегов, эффективность работы ПТШ – удельная выходная мощность в расчете на единицу ширины электрода затвора снижается, а также увеличивается коэффициент шума. Поэтому мощные СВЧ транзисторы с барьером Шотки, с целью устранения указанных выше недостатков, а именно снижения эффективности их работы с увеличением общей ширины электрода затвора, изготавливаются в виде чередующейся структуры, так называемой гребенки электродов истока, затвора, стока, когда единичные электроды затвора расположены в канавках каналов, выполненных между электродами исток и сток. Благодаря этому удастся снизить сопротивление общего электрода затвора, и тем самым увеличить коэффициент усиления по мощности и снизить коэффициент шума. Кроме того, этот способ обеспечивает компактность ПТШ.

Для увеличения пробивного напряжения сток-затвор и уменьшения сопротивления исток-затвор транзистора в заглубленной канавке смещают к истоку. Один из способов смещения затвора в канале заключается в соответствующем совмещении при выполнении последовательных операций литографии. Это требует высокой точности совмещения двух последовательных операций литографии. Если единичные пальцы затворов в гребенчатой структуре полевого транзистора расположены в каналах неодинаково, т.е. в разной степени смещены в сторону истока, то это приводит к неидентичности единичных структур в гребенчатой структуре транзистора и, следовательно, к снижению динамических параметров.

Проблема точности совмещения и позиционирования затвора в углублении в канавке может быть решена путем использования

способа самосовмещения, в котором формирование углубления в канале и сам электрод затвора формируются с использованием одной и той же маски (рис.2).

Основным его достоинством является высокая точность совмещения затвора и углубления в канале.

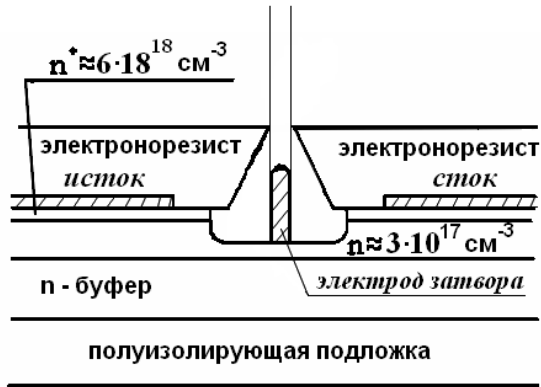


Рис.2.

При формировании структуры мощного транзистора для улучшения динамических характеристик желательно располагать затвор в углублении так, чтобы он был смещен к истоку на некоторое строго определенное расстояние. При недостаточном смещении не будет существенно снижено сопротивление исток-затвор, при слишком большом смещении в сторону истока будет уменьшаться пробивное напряжение между затвором и истоком и при некотором расстоянии напряжение пробоя может достичь неприемлемо низкой величины.

Осуществить необходимое и четко воспроизводимое смещение затвора на определенную величину можно если при нанесении затворного металла, проводить процесс напыления так, чтобы поток напыляемого металла был направлен по отношению к плоскости полупроводниковой подложки под определенным углом, при этом затвор формируемый в углублении будет смещен в нужную сторону на расстояние определяемое углом, между плоскостью полупроводниковой пластины и потоком напыляемого затворного металла (рис.3).

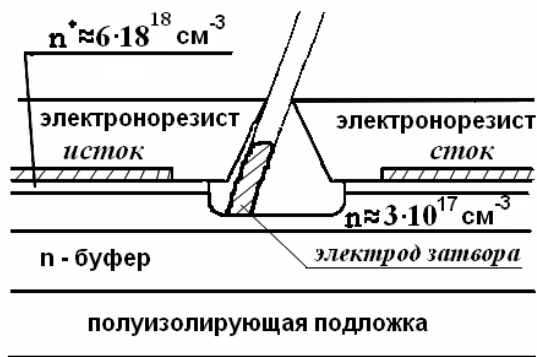


Рис.3.

Однако такой способ напыления затворного металла «под углом» неприменим для изготовления традиционной гребенчатой структуры полевых СВЧ транзисторов, в которой чередуются электроды истока и стока, а между ними расположены полоски (пальцы) затворов, так как при смещении одного затвора в сторону истока другой соседний затвор смещается в сторону стока.

В разделе 3.1. представлена оригинальная конструкция мощного полевого транзистора [Патент РФ №2307424] которая позволяет использовать угловое (наклонное) напыление металлов для сдвига затворов в канале к истоку. Суть данной структуры можно понять из рисунка (4б), где она приведена в сравнении с традиционной конструкцией (4а).

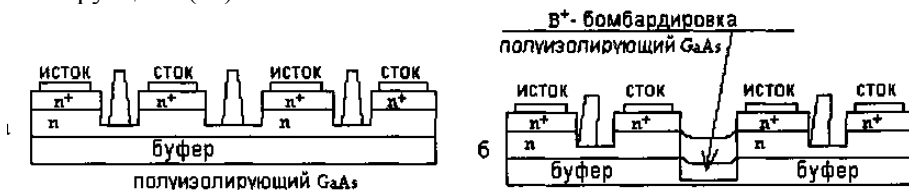


Рис.4.

Кроме того в разделе приведены результаты оптимизации данной конструкции как по ширине полупроводящего слоя, так и по величине смещения затвора к истоку транзистора.

В разделе 3.2. представлены результаты оптимизации способа изготовления данной конструкции от параметров изготовления. Оказалось [Заявка № 2008100928.], что в предложенном способе

изготовления СВЧ полевого транзистора с барьером Шотки, изготовление электрода затвора посредством процессов литографии и напыления металла или системы металлов, образующих омические контакты в области истока и стока, и барьер Шотки в области затвора, металл или систему металлов, образующих барьер Шотки в области затвора необходимо напылять под углом, равным $102-112^\circ$, к лицевой поверхности полуизолирующей подложки в сторону истока. Напыление металла или группы металлов, образующих барьер Шотки в области затвора под углом к лицевой поверхности полуизолирующей подложки менее 102° мало эффективно, а более 112° не допустимо так как приводит к сильному сдвигу затвора в канавке и как следствие к снижению пробивного напряжения затвор – исток и как следствие к потере работоспособности ПТШ.

При этом расстояние между лицевой поверхностью полуизолирующей подложки и источником напыляемого металла или группы металлов менее 400 мм не допустимо, из-за увеличивающегося разброса угла напыления по ней, приводящего к ухудшению проводимых технологических процессов, а более 700 мм ограничено возможностями технологического оборудования.

Приведены характеристики серийных транзисторов, изготовленных по данной технологии, показано что данный способ изготовления позволяет повысить:

- во-первых, выходную мощность примерно на 25 процентов,
- во-вторых, коэффициент усиления по мощности на 2–2,5 дБ,
- в-третьих, коэффициент полезного действия на 7–10 процентов,

Следует особенно отметить, что предложенный способ можно успешно применять его для изготовления как маломощных, так и мощных СВЧ полевых транзисторов с барьером Шотки.

В разделе 3.3. представлена оригинальная методика формирования мощного полевого транзистора которая позволяет не только использовать угловое (наклонное) напыление металлов для сдвига затворов в канале к истоку но и существенно уменьшить длину затвора транзистора, без увеличения его омического сопротивления, создавать так называемый Г-образный затвор.

В предложенном методе вначале на поверхность структуры, в которой уже сформированы омические контакты истока и стока, формируется слой диэлектрика, так, что ступенька диэлектрика располагается в канале между электродами истока и стока, на заданном расстоянии (d) от истока рис.5.

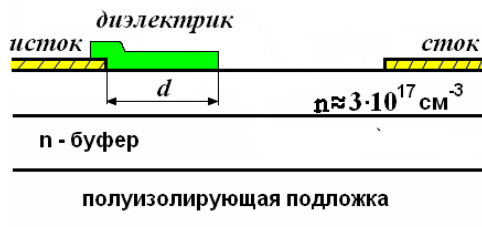


Рис.5.

Далее проводится процесс последующей литографии и формируется маска из резиста, в котором создается «окно» в канале между электродами истока и стока рис.6.

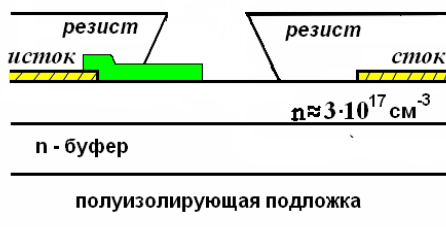
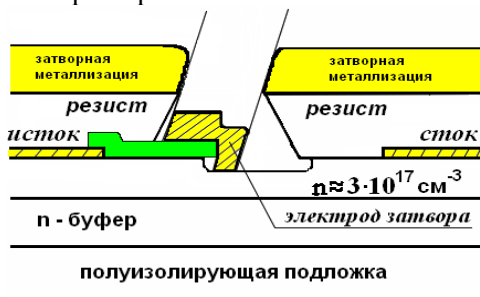


Рис.6.

После этого проводится процесс травления арсенида галлия с целью формирования канавки, в которой затем путем напыления и последующего «взрыва» формируется затвор транзистора, который частично лежит на поверхности полупроводника, а частично на поверхности диэлектрика рис.7.



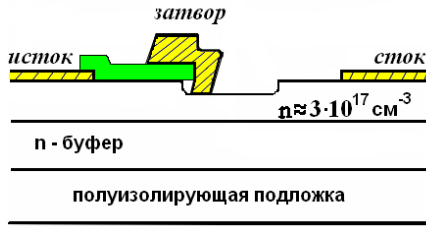


Рис.7.

Если проводить процесс напыления затворной металлизации таким образом, чтобы поток напыляемого металла падал на пластину под некоторым заданным углом в сторону истока, то в этом случае длина затвора будет меньше, чем расстояние между краем диэлектрического слоя и противоположным краем маски резиста.

Кроме того такой затвор расположен в канавке ассиметрично, то есть смещен в сторону истока. Расстояние от края затвора до стокового края в этом случае увеличивается, что позволяет повысить напряжение пробоя затвор-сток.

По предложенной методике был изготовлен ряд полевых транзисторов. На рисунке приведена фотография, сделанная на электронном микроскопе бокового скола такого транзистора.

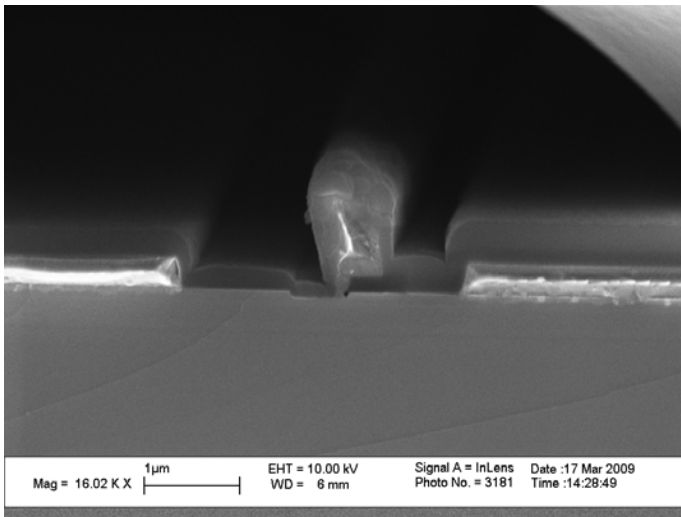


Рис.8.

Из сравнения размеров ножки затвора с размером масштабной линейки можно сделать вывод, что эффективная длина затвора транзистора (та часть которая лежит непосредственно на полупроводниковой структуре) составляет примерно $0,09 \approx 0,11$ мкм что намного, меньше характерного разрешения используемой литографии (около 0,3 мкм). При этом характерное сечение шляпки составляет примерно $0,5 \times 0,5$ мкм, что позволяет получать достаточно низкое омическое сопротивление затвора около 6 Ом на 100 мкм.

В разделе 3.4. приведены результаты исследования разработанных транзисторов на надежность. Кратко описаны методики испытаний и приведены нормативные документы в соответствии с которыми эти испытания проводились. Показано, что так как отказы в процессе испытаний рассматриваемой группы транзисторов не были зафиксированы, то по данным испытаний для показателей надежности определялась только верхняя (для интенсивности отказов λ) и нижняя (гамма-процентной наработки до отказа при $\gamma=95\%$) доверительные границы при заданном уровне q (≥ 0.5) доверительной вероятности. Оказалось, что по результатам испытаний:

интенсивность отказов $\lambda \leq 0,6 \cdot 10^{-6}$ 1/ч (гамма-процентная наработка до отказа $T_{\gamma=95\%} \geq 320$ тыс.ч) при доверительной вероятности $q=0,5$

интенсивность отказов $\lambda \leq 0,53 \cdot 10^{-6}$ 1/ч (гамма-процентная наработка до отказа $T_{\gamma=95\%} \geq 96$ тыс.ч) при доверительной вероятности $q=0,9$.

Следует отметить, что данные характеристики соответствуют мировому уровню.

В заключении сформулированы основные полученные результаты:

Экспериментально изучены процессы захвата, возникающие в арсенидгаллиевых полевых транзисторах с барьером Шотки. Показано, что в сильных электрических полях, при которых под затвором формируется статический домен вследствие проникновения электронов в область со свободными центрами захвата (буферный слой либо подложку), происходит локальная модуляция толщины канала транзистора. Этот эффект приводит к появлению зависимости крутизны и тока насыщения вольт-амперных характеристик от

частоты и длительности переменного сигнала, что является причиной временного дрейфа параметров приборов.

Экспериментально исследована фоточувствительность арсенидгаллиевых полевых транзисторов в сильных электрических полях. Установлено наличие трех областей с разным знаком фотопроводимости. Показано, что характер фотоотклика приборов определяется не столько природой глубоких центров вблизи $n-i$ -перехода, возбуждаемых данной подсветкой, сколько процессами формирования области сильного поля и перераспределения напряжения между ней и остальной частью прибора.

Для предотвращения попадания горячих электронов из канала в буферный слой и дефектов из области буферного в активный слой предложено на границе между активным и буферным слоем создать дополнительный резкий потенциальный барьер на основе специально подобранного δp – слоя. Представлены результаты демонстрирующие, что введение подобного слоя может на несколько порядков уменьшать токи утечки полупроводниковых структур.

Продемонстрировано, что при наличии большого количества углерода на границе раздела металл–полупроводник в ПТШ могут наблюдаться как временные неустойчивости ВАХ, так и утечки в низковольтной области ВАХ барьеров. Показано, что при проведении химических обработок перед осаждением барьера наблюдается загрязнение поверхности GaAs углеродом в основном за счет разрушения фоторезиста, после чего ряд дополнительных операций по очистке поверхности был включен в технологические маршруты изготовления транзисторов и монолитных интегральных схем.

Рассмотрены свойства системы металлизации омических контактов истоков и стоков арсенидгаллиевых транзисторов с диффузионным барьером на основе гексаборида лантана LaB_6 , а также технология формирования таких контактов. Показано, что система металлизации $Ni/AuGe/LaB_6/Au$ обладает низким сопротивлением (удельное сопротивление $1 \cdot 10^{-7}$ Ом \cdot см²) и стабильностью при высоких температурах (300° С). Таким образом, разработан технологический процесс формирования омических контактов ПТШ с диффузионным барьером на основе гексаборида лантана $Ni/AuGe/LaB_6/Au$, обеспечивающий низкое контактное сопротивление и высокую термостабильность.

Разработана технология изготовления и созданы InP ПТ с длиной затвора 1 и 0,5 мкм, обладающие крутизной 140...150 мСм/мм и 180...190 мСм/мм соответственно. Продемонстрировано высокое качество эпитаксиальных структур на основе InP и высокое качество разработанной технологии изготовления транзистора (по сути дела продемонстрирована низкая чувствительность таких структур к наличию дефектов). Показано, что большой интерес представляет исследование материалов и гетероструктур в которых несмотря на не слишком высокую подвижность электронов из-за большим энергетическим зазором между Г- и L и высоких пороговых полей достигаются высокие скорости насыщения электронов.

Разработана оригинальная конструкция мощного полевого транзистора, позволяющая использовать наклонное напыление металлов для сдвига самосовмещенных затворов в канале к истоку транзистора.

Разработана оригинальная методика формирования мощного полевого транзистора которая позволяет не только использовать угловое (наклонное) напыление металлов для сдвига самосовмещенных затворов в канале к истоку, но и существенно уменьшить длину затвора транзистора (менее 0,15 мкм при характерном разрешении аппаратуры 0,3 мкм), без увеличения его омического сопротивления, создавать так называемый Г-образный затвор.

Представленные разработки использовались для создания ряда серийных транзисторов (ЗП612 А,Б,В ЗП976 А,Б,В,Г,Д) на базе которых был создан ряд, гибридных и монолитных схем с параметрами сравнимыми с мировым уровнем

Публикации по теме диссертации.

1. В.Г. Лапин, Т.В. Макарова, Е.Ф. Прохоров, А.Т. Уколов Эффекты сильного поля и дрейф параметров полевых транзисторов из *n*-GaAs с барьером Шотки. Электрон. Техн. Сер.1 Электроника СВЧ, 1986, В.4(388). С. 24-27.
2. Н.Б. Горев, В.Г. Лапин, Т.В. Макарова, Е.Ф. Прохоров, А.Т. Уколов Фоточувствительность арсенидгаллиевых полевых транзисторов в сильных электрических полях. Электрон. Техн. Сер.1 Электроника СВЧ, 1987, В.8(402). С. 24-27.

3. С.В. Кармазин, В.Г. Лапин Физическая модель определения сопротивлений истока и стока в полевых транзисторах с затвором Шотки. Электрон. Техн. Сер.1 Электроника СВЧ, 1988, В.8(412). С. 24-27.
4. А.А. Кальфа, В.Н. Кобзаренко, М.Б. Коханюк, В.Г. Лапин, М.В. Павловский, А.Б. Пашковский, К.Г. Ноздрина, Е.В. Руссу Исследование полевых транзисторов на фосфиде индия. Электрон. Техн. Сер.1 Электроника СВЧ, 1989, В.9(423). С. 21-24.
5. Б.В. Маркин, О.С. Трифонова, В.В. Чикун, В.Г. Лапин, М.Г. Пономарева Влияние химических обработок на характеристики барьеров Шотки в полевых транзисторах. Электрон. Техн. Сер.1 Электроника СВЧ, 1990, В.10(434). С. 42-44.
6. К. Г. Ноздрина, К. В. Дудинов, В. Ф. Лапин, А. В. Галанихин К. П. Петров Использование диффузионного барьера при формировании омических контактов полевых транзисторов на арсениде галлия. Электрон. Техн. Сер.1 Электроника СВЧ, 1991, В. 2(436). С. 45-47.
7. V.G. Lapin, A.M. Temnov, K.I. Petrov, V.A. Krasnik GaAs Microwave Offset Gate Self-Aligned MESFET's and their applications. "GaAs 2000 Conference proceedings, 2nd-3rd October 2000" p.314-317.
8. Дудинов К.В., Лапин В.Г., Темнов А.М., Аверин В.В. Применение эпитаксиальных алмазных подложек для создания полупроводниковых СВЧ – приборов Десятая Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Сборник материалов конференции 11-15 сентября 2000 г., Севастополь, Крым, Украина, стр. 10-13.
9. Лапин В.Г., Красник В.А., Петров К.И., Темнов А.М. Мощные GaAs полевые СВЧ транзисторы со смещенным затвором Одиннадцатая Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Сборник материалов конференции 10-14 сентября 2001 г., Севастополь, Крым, Украина, стр. 135-136.
10. Н.В. Абакумова, Ф.Е. Щербаков, О.С. Зуева, Ю.М. Богданов, В.Г. Лапин, А.М. Темнов Двухканальный переключатель на ПТШ. Электронная. Техника. Сер.1. СВЧ - Техника, 2006, В.1(487). С. 31-36.

11. Бабинцев Д.В., Королев А.Н., Климова А.В., Красник В.А., Лапин В.Г., Мальщик В.М., Манченко Л.В., Пчелин В.А., Трегубов В.Б. Язан В.Ю. Мощный твердотельный импульсный усилитель двухсантиметрового диапазона. Радиотехника №3, 2007г. Стр41-42.
12. Д.В. Бабинцев, А.Н. Королёв, В.А. Красник, А.В. Климова, В.Г. Лапин, В.М. Мальщик, Л.В. Манченко, В.А. Пчелин, В.Б. Трегубов, В. Ю. Язан Транзисторный импульсный усилитель с выходной мощностью 9...11 Вт в диапазоне частот 15,9...16,4 ГГц. Электронная. Техника. Сер.1. СВЧ - Техника, 2007, В.1(489). С. 25-32.
13. Ю.М. Богданов, В.Г. Лапин, А.М. Темнов, Ф.Е. Щербаков Монолитный двухпозиционный переключатель для диапазона частот 0,5...18ГГц, согласованный по всем каналам. Электронная. Техника. Сер.1. СВЧ - Техника, 2007, В.1(489). С. 33-37.
14. Ю.М. Богданов, В.А. Красник, В.Г. Лапин, В.А. Лукьянов, А.М. Темнов, К.И. Петров, И.В. Самсонова Ряды устройств для преобразования частоты на основе многофункциональной GaAs МИС Электронная. Техника. Сер.1. СВЧ - Техника, 2007, В.1(489). С. 50-77
15. Темнов А.М., Дудинов К.В., Богданов Ю.М., Крутов А.В., Красник В.А., Лапин В.Г., Щербаков С.В. Комплект унифицированных МИС СВЧ для многоканальных приемопередающих модулей АФАР X – диапазона. Электронная. Техника. Сер.1. СВЧ - Техника, 2009, В.2(501). С. 31-44.
16. Иовдальский В.А., Лапин В.Г., Пчелин В.А, Составной двухъярусный транзистор для усилителей мощности СВЧ диапазона Девятнадцатая Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Сборник материалов конференции 14-18 сентября 2009 г., Севастополь, Крым, Украина, стр. 114-115.
17. Патент РФ на полезную модель №8069 по заявке № 2008133793. Приоритет от 19.08.2008. Гетероэпитаксиальная структура для полевых транзисторов. Е.И. Голант, К.С. Журавлев, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, Ю.Н. Свешников.

18. Патент РФ №2307424 по заявке № 2005137680/28. Приоритет от 02.12.2005. Мощный СВЧ полевой транзистор с барьером Шотки. В.Г. Лапин, К.И. Петров, А.М. Темнов.
19. Заявка № 2008100928. Приоритет от 09.01.2008. Положительное решение от 20.01.2009. Способ изготовления СВЧ полевого транзистора с барьером Шотки. В.Г. Лапин, К.И. Петров, А.М. Темнов.

Подписано в печать 27.08.09

Формат 60x80/16. Объём 1 усл.-печ. листов.

Тираж 50 экз. ризограф ОАО «Исток Аудио Интернэйшнл»