

**В Е С Т Н И К
ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

ОБЩЕНАУЧНЫЙ ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 285

Январь

2005

Серия «Физика»

Свидетельства о регистрации: бумажный вариант № 018694, электронный вариант № 018693
выданы Госкомпечати РФ 14 апреля 1999 г.

ISSN: печатный вариант – 1561-7793; электронный вариант – 1561-803X
от 20 апреля 1999 г. Международного Центра ISSN (Париж)

**СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК,
посвященный 50-летию организации в ТГУ научного и образовательного направлений
по физике полупроводников**

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 2

**ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ
НАУЧНОГО И ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЙ**

Вяткин А.П., Кривов М.А., Лаврентьева Л.Г. История организации и становления научного направления по физике полупроводников в Томском университете и Сибирском физико-техническом институте	3
Романова И.Д. Научно-исследовательскому институту полупроводниковых приборов 40 лет.....	13
Лаврентьева Л.Г., Ивонин И.В. Основные этапы развития научного направления по эпитаксии полупроводников в СФТИ.....	17
Воеводин В.Г. Лаборатория полупроводникового материаловедения СФТИ.....	24
Хлудков С.С. Становление и развитие лаборатории физики полупроводников.....	28
Вяткин А.П., Вилисов А.А. Развитие физико-технологических основ создания полупроводниковых приборов	33
Войцеховский А.В., Коханенко А.П. Высокочувствительные приемники оптического излучения	39
Мокроусов Г.М. Физико-химические аспекты электронного материаловедения.....	43
Войцеховский А.В., Гаман В.И., Гермогенов В.П., Ивонин И.В., Лаврентьева Л.Г., Мокроусов Г.М. Подготовка специалистов в области физики и техники полупроводников в Томском госуниверситете.....	47

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ (ОБЗОРЫ)

Караваев Г.Ф., Гриняев С.Н., Чернышов В.Н. Исследование электронных процессов в наноструктурах.....	53
Воеводин В.Г., Чалдышев В.А. Исследование тройных полупроводников $A^2B^4C_2^5$	63
Лаврентьева Л.Г., Вилисова М.Д., Ивонин И.В. Газофазовая эпитаксия арсенида галлия	74
Хлудков С.С. Диффузия примесей в арсениде галлия, диффузионные структуры и приборы	84
Брудный В.Н. Радиационные эффекты в полупроводниках.....	95
Гермогенов В.П. От сплавных контактов к эпитаксиальным гетероструктурам.....	103
Гаман В.И. Электронные процессы в полупроводниковых диодах и структурах металл – диэлектрик – полупроводник.....	112
Вяткин А.П., Максимова Н.К., Филонов Н.Г. Электрофизические свойства структур с барьером Шоттки на GaAs	121
Божков В.Г., Лукаш В.С. Полупроводниковые СВЧ-приборы	129
Криворотов Н.П., Изаак Т.И., Ромась Л.М., Свинолулов Ю.Г., Щеголь С.С. Микроэлектронные сенсоры давления	139
Вилисов А.А. Светоизлучающие диоды	148
Толбанов О.П. Детекторы ионизирующих излучений на основе компенсированного арсенида галлия.....	155
Войцеховский А.В., Несмелов С.Н. Фотоэлектрические инфракрасные детекторы с управляемой спектральной характеристикой	164

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ 172

РЕФЕРАТЫ СТАТЕЙ НА РУССКОМ И АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКАХ..... 174

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СВЧ-ПРИБОРЫ

Представлен краткий итог исследований и разработок, проведённых в НИИПП по направлениям: смесительно-детекторные диоды с барьером Шоттки (ДБШ) и генераторные диоды Ганна (ДГ). Проведённые исследования позволили создать адекватные физико-математические модели ДБШ и ДГ, разработать технологию создания приборных структур и освоить в производстве около ста приборов различного типа, соответствующих современным требованиям по надёжности и уровню основных параметров. Созданные ДБШ в микрокорпусном исполнении, в виде диодов с балочными выводами и чипов с сотовой структурой позволяют создавать эффективные приемные устройства в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Созданы одно- и многофункциональные модули в КВЧ-диапазоне на основе диодных МИС, что открывает перспективы более интенсивного освоения этого диапазона волн.

Полупроводниковая электроника СВЧ как самостоятельное направление радиоэлектроники сформировалось в 70-х гг. прошлого века [1]. Среди различных факторов, определивших её становление, особо важную роль сыграли успехи в технологии эпитаксиальных арсенидогаллиевых структур $n - n^+$ и $n^+ - n - n^+$ -типа с достаточно тонкими и совершенными n -слоями, достижения фотолитографии, а также достижения в обработке поверхности полупроводника и его металлизации, позволившие создать совершенные выпрямляющие и невыпрямляющие (омические) контакты металл – полупроводник (КМП), ставшие основой ДБШ, генераторных ДГ, а несколько позже и полевых транзисторов. Создание НИИПП в 1964 г. практически было ответом на поднимающуюся в мире волну работ по созданию на основе арсенида галлия и фосфида индия активных генераторных и преобразовательных элементов, способных эффективно работать на высоких, в том числе ранее недоступных частотах миллиметрового (мм) диапазона длин волн (ММДВ). Естественно, что создание таких элементов, и прежде всего ДБШ и ДГ, определяющих эффективность работы приёмных (смесительных ДБШ) и передающих устройств, стало основным направлением работ НИИПП в области СВЧ-электроники. Эти работы охватывали и создание высокодобротных настроечных диодов (варикапов), необходимых для перестройки частоты генераторов на основе ДГ (ГДГ), умножительных диодов с высокими предельными частотами – для достижения максимально высоких рабочих частот, детекторных диодов – для создания специальных и измерительных устройств ММДВ. К перечисленным можно добавить и переключаемые диоды для управления СВЧ-сигналами. Выделение здесь только смесительных ДБШ и генераторных ДГ не только подчёркивает их особую важность, но позволяет в целом отразить и те проблемы, которые возникают и при разработке других диодов ММДВ, поскольку их основой также является, как правило, арсенид галлия, БШ и омический контакт (ОК).

1. ДИОДЫ С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ

Первые экспериментальные работы, в которых были получены вольт-амперные характеристики (ВАХ) КМП с БШ, близкие к идеальным, относятся к началу 60-х гг. [2, 3]. Чуть позже это было сделано в СССР, в Томском университете [4]. К этому же времени относится и появление первых теоретических работ по анализу ВАХ и вольт-фарадных характеристик (ВФХ) [5 – 9]. В основе этих работ лежали представления о структуре КМП, впервые выдвинутые Бардиным [10] при объяснении независимости высоты барьера в контакте от работы выхода металла, обнаруженной экспериментально: наличие на контакте тонкого прозрачного изолирующего слоя, высокой плотности электронных состояний на поверхности полупроводника и наличие уровня нейтральности, разделяющего донорные и акцепторные состояния,

вблизи которого закреплён уровень Ферми. Основные итоги исследования контактов с БШ за период, предшествовавший началу широких работ в НИИПП, отражены в монографиях [11 – 13]. Важно отметить, что к этому времени:

1) БШ с малыми диаметрами контактов ($\varnothing \leq 5$ мкм), соответствующими ММДВ, практически не исследовались;

2) контакты с относительно большой площадью и совершенными ВАХ обнаружили аномальное поведение при низких температурах (обычно ниже 200 К) при большом разбросе результатов: ухудшение крутизны характеристики (рост n – показателя идеальности ВАХ [3, 14]); это могло означать, что близость прямой ВАХ БШ к теоретической при комнатной температуре не является достаточным критерием совершенства диода, а значит, и эффективной работы на СВЧ;

3) какие-либо систематизированные результаты исследования надёжности диодов на основе КМП с БШ, созданных к этому времени (устойчивость к термическим, электрическим, специальным и другим воздействиям), отсутствовали.

Поставленная в этих условиях задача разработки эффективных преобразовательных диодов ММДВ и субмиллиметрового диапазона волн (субММДВ) не могла быть решена без широкого исследования физических и физико-химических свойств КМП с БШ. Поскольку речь шла о достаточно новом объекте исследования (на основе нового материала), то «прикладные» исследования такого рода приобретали важную роль для физики полупроводниковых приборов в целом.

В период, непосредственно предшествующий началу работ, в качестве смесительных и детекторных наиболее широко использовались точечные кремниевые и в незначительной степени обращённые диоды [15 – 18]. Область промышленно освоенных частот ограничивалась 8-миллиметровым диапазоном [16 – 18], хотя исследования арсенидогаллиевых точечных диодов были проведены вплоть до субММДВ [17]. Внедрение смесительных диодов с БШ взамен конструкций с точечным прижимным контактом позволяло не только улучшить параметры (прежде всего, за счёт улучшения шумовых характеристик, непосредственно связанных с совершенством контакта), но и повысить стабильность, механическую прочность, надёжность, значительно расширить возможность конструирования применительно к созданию гибридно-интегральных, а в дальнейшем и монолитных СВЧ-схем, т.е. сделать принципиальный шаг в направлении микро-

миниатюризации СВЧ-аппаратуры и повышения её надёжности.

Достижение поставленных целей предполагало решение целого комплекса задач, не решённых к началу работы. Их можно сгруппировать по трём основным направлениям:

1. Исследование электрофизических характеристик КМП с БШ и ДБШ в широком диапазоне воздействия различных факторов, включая температуру, параметры режима, конструктивное оформление и технологическое исполнение. В исследовательском плане это означало создание физико-математической модели реального КМП с БШ. В практическом плане – разработку физических основ промышленной технологии преобразовательных и других ДБШ.

2. Исследование термической устойчивости ДБШ и межфазного взаимодействия на контакте металл – полупроводник (м-п) с целью выявления наиболее важных причин их деградации и на этой основе – принципов подбора металлизации и защиты БШ. Обеспечение технологичности и надёжности приборов.

3. Выбор, обоснование и реализация конкретных конструктивно-технологических решений с учётом специфики разрабатываемых ДБШ (назначения, требований к конструкции и параметрам, условий и режимов работы), проведение их исследований и испытаний.

Ниже кратко оцениваются наиболее важные результаты, полученные на каждом из направлений.

1.1. Физико-математические модели реальных КМП с БШ

Как уже было замечено, модель идеального КМП с барьером Шоттки – Мотта, предполагающая равенство высоты барьера разности работы выхода металла и электронного средства полупроводника, не выполняется для реальных КМП. Для них высота барьера практически не зависит от типа металла [11]. Общеизвестное объяснение этому явлению, одним из главных элементов которого было наличие высокой плотности поверхностных электронных состояний (ПЭС), получило название модели Бардина (см. выше). Происхождение ПЭС на реальной и атомарно-чистой поверхности полупроводника и возможная роль при этом металла стали предметом многочисленных экспериментальных и теоретических исследований, которые продолжают до сих пор. Однако, несмотря на их важность, эти исследования практически ничего не давали для объяснения существенных особенностей характеристик (вольт-амперных, вольт-фарадных, шумовых и других) реальных КМП с БШ. Так, предметом постоянных дискуссий были и остаются соотношения высот барьера, полученных из измерений $I(V)$ и $C(V)$, и роль высоты барьера при плоских зонах (ВБПЗ) [19]. Широко известной аномалией ВАХ КМП с БШ является рост показателя идеальности ВАХ n с понижением температуры при параллельном уменьшении измеряемой по току насыщенности высоты барьера Φ_{bm} [3, 14] и слабой зависимости от температуры их произведения $n\Phi_{bm}$. К важным особенностям характеристик ДБШ следует отнести и впервые обнаружен-

ные нами искажение ВАХ в форме излома («колена») в области низких температур [20 – 22], необычное поведение НЧ ($1/f$) шума [23, 24] (резкий рост с понижением температуры с последующим выходом на пологий участок), значительные избыточные ВЧ-шумы и искажения ВАХ в области относительно больших токов, связанные с разогревом электронного газа в ДБШ [25, 26]. Построение адекватной модели КМП с БШ, необходимое для разработки эффективных ДБШ, требовало решения этих проблем..

В наших работах [27, 28] было показано, что для реальных КМП с БШ, в которых отступление от «идеальности» связано с локальной термополевой эмиссией или с влиянием промежуточного слоя и ПЭС, находящихся в равновесии с полупроводником, объяснение «аномалий» ВАХ в области низких температур возможно. Формально подобное поведение ВАХ является следствием зависимости показателя идеальности от смещения, характерной для обоих случаев, в условиях, когда n и Φ_{bm} измеряются при одном и том же токе (а значит, при разных смещениях) в широком диапазоне температур. В последующие годы были предложены по крайней мере три модели КМП, объясняющие его низкотемпературные аномалии процессами рекомбинации в области барьера [29, 30]; неоднородным (гауссовским) распределением высоты барьера по площади контакта в предположении, что высота барьера линейно растёт, а дисперсия высоты барьера линейно падает с ростом смещения [31] и наличием так называемых «седловых точек» на контакте с пониженной высотой барьера и закруглённой его формой [32, 33]. Однако все они опираются на необоснованные предположения [34] и потому не могут быть приняты в качестве рабочих моделей.

Подход к анализу аномалий в реальных КМП частного типа, использованный в работах [27, 28], позднее был обстоятельно проанализирован и обобщён в [35]. В результате этой и последующих работ [36 – 38] нам удалось получить ряд принципиальных результатов, позволивших дать ответы на целый ряд поставленных ранее проблем. Было показано, что:

1. Известная из экспериментов «вездесущность» низкотемпературной аномалии ВАХ объясняется тем, что для всех, не только реальных, но и идеальных (при учёте эффекта сил изображения) КМП с БШ характерна нелинейная зависимость истинной (или эффективной) высоты барьера от смещения.

2. В широком диапазоне температур ВАХ практически любых КМП с БШ (идеальных и реальных) с хорошим приближением описывается характеристикой

$$I = AR^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{nkT}\right) \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right), \quad (1)$$

отличной от общепринятой ВАХ вида [11, 19]

$$I = AR^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{b0}}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right), \quad (2)$$

которая не учитывает нелинейной зависимости высоты барьера от смещения и потому приводит к нереальным значениям высоты барьера в области низких температур. Здесь A – площадь контакта; R^* – эффек-

тивная константа Ричардсона; k – постоянная Больцмана; q – заряд электрона; T – температура; $\phi_b \cong n\phi_{bm}$ – истинная высота барьера; ϕ_{b0} – высота барьера при нулевом смещении. Отметим, что выражение типа (1) неоднократно использовалось экспериментаторами (см., например, [3, 14, 20]), но теоретическое обоснование получило впервые.

3. Истинная высота барьера ϕ_b , соответствующая некоторому току I , связана с измеряемой высотой барьера ϕ_{bm} и показателем идеальности n соотношением

$$\phi_b = n\phi_{bm} - (n-1)\frac{kT}{q} \ln \frac{AR^*T^2}{I}. \quad (3)$$

При этом значение $\phi_b \cong n\phi_{bm}$ является достаточно хорошим и удобным приближением для истинной высоты барьера не только в диапазоне температур, но и в широком диапазоне смещений.

4. Выражение

$$\phi_{bf} = n\phi_{b0} - (n-1)\phi_s, \quad (4)$$

(где $\phi_s = (kT/q) \ln(N_c/N_d)$ – характеризует положение уровня Ферми по отношению к дну зоны проводимости, N_c – эффективная плотность состояний в зоне проводимости, N_d – концентрация донорной примеси в полупроводнике), полученное ранее для высоты барьера при плоских зонах в предположении линейной зависимости высоты барьера от смещения [39], некорректно; реально вместо (4) при проведении измерений рассчитывается некоторая величина

$$\phi_{bfl} = n\phi_{bm} - (n-1)\phi_s = \phi_{bm} - (n-1)\phi_s, \quad (5)$$

в которой используется измеряемая высота барьера ϕ_{bm} , а не ϕ_{b0} , см. (2). Что касается истинной величины ВБПЗ, то её использование имеет смысл для КМП, в которых ПЭС находятся в равновесии с металлом, т.е. практически для «идеальных» контактов ($n \approx 1$). В общем случае она не имеет смысла фундаментальной характеристики КМП с БШ, который ей приписывается.

5. Реально определяемая из $C(V)$ измерений высота барьера ϕ_{bcm} отнюдь не является высотой барьера при плоских зонах «по определению», как это принято считать [19]. Она определяется характером измерений и при проведении касательной к кривой $C^{-2}(V)$ в точке $V = 0$ (что, как правило, предполагается) представляется в виде [37]

$$\phi_{bcm} = n\phi_{b0} - (n-1)(\phi_s + kT/q). \quad (6)$$

Это выражение объясняет близость ϕ_{bcm} к ВБПЗ, определённой согласно (4), что многими исследователями ошибочно воспринимается так, как будто (4) соответствует ВБПЗ. На самом деле, оба эти выражения характеризуют истинную высоту барьера, определённую различными методами, и при корректном измерении должны давать близкие результаты.

6. Контакт с неоднородным распределением высоты барьера по площади (причём таким, что участки с наименьшей высотой барьера имеют наименьшую площадь, что вполне естественно) при учёте влияния последовательного сопротивления R_s (различного для участков контакта с различной высотой барьера)

можно описать как контакт с высотой барьера, нелинейно зависящей от смещения и постоянным значением R_s (т.е. использовать разработанный выше аналитический аппарат). Такой контакт демонстрирует описанную выше аномалию низкотемпературных ВАХ, и, более того, он позволяет «естественно» объяснить характерное поведение НЧ ($1/f$) шума: резкий рост с понижением температуры с последующим переходом на пологий участок. Естественно, что высота барьера такого контакта имеет смысл эффективной.

Что касается реальности предположения о неоднородности КМП с БШ и её причинах, то широкие исследования, проведённые в НИИПП, дают этому многочисленные подтверждения [34, 40]. Как оказалось, низкотемпературное поведение ВАХ зависит от конструкции КМП (толщины и типа металла, размера контакта, толщины и типа диэлектрика, в окне которого создаётся КМП, кристаллографической ориентации полупроводника и т.д.) и технологии его изготовления (метода нанесения металла и диэлектрика, условий их отжига и т.д.). Эти данные последовательно объясняются на основе предположения о преимущественно периферийном понижении высоты барьера вследствие возникающих здесь упругих механических напряжений (УМН) растяжения [34]. Последние, в свою очередь, являются следствием напряжений сжатия в металлизации контакта и окружающем его диэлектрике. Предполагается, что непосредственной причиной уменьшения высоты барьера может быть вызванное УМН растяжения уменьшение ширины запрещённой зоны и (или) появление (вследствие пьезоэффекта) встроенного вблизи периферии поля, а возможно, и другие причины. Естественно, что источником УМН растяжения может быть не только периферия контакта, но и самые различные структурные нарушения, неизбежно присутствующие на границе м-п. Именно такие, преимущественно локальные понижения высоты барьера объясняют указанные выше низкотемпературные искажения ВАХ в виде «колена», особенности температурной зависимости $1/f$ шума, особенности характеристик ВЧ-шума и ВАХ в области больших токов. Одновременно развитые представления являются ключом к совершенствованию характеристик реальных контактов и поиску их новых конструкций.

1.2. Межфазное взаимодействие в контакте металл – полупроводник

Важнейшая составляющая разработки новых приборов – обеспечение его высокой надёжности. Как известно, деградация полупроводниковых приборов связана с воздействием двух основных факторов: высокой температуры и сильных электрических полей. (Мы не затрагиваем здесь специфических радиационных и некоторых других воздействий, являющихся обычно предметом специальных исследований.)

Принципиальное отличие приборов с БШ от приборов на основе $p-n$ -переходов, обуславливающее их более низкую надёжность, – наличие металлизации, являющейся составной частью активного элемента и способной взаимодействовать с полупроводником при относительно низких температурах. Именно этому

явлению было уделено нами наибольшее внимание, учитывая не только его важность, но и научную и технологическую новизну проблемы [40 – 42].

Круг основных рассматриваемых при этом вопросов включал:

- исследование общих закономерностей взаимодействия различных металлов с GaAs и с InP для целенаправленного формирования металлизации ДБШ;

- установление наиболее важных требований к конструкции и технологии, обеспечивающих максимальную термическую устойчивость контактов и высокое качество ДБШ;

- исследование деградации характеристик ДБШ и её связи с особенностями взаимодействия в системе полупроводник – многослойная металлизация;

- анализ достоинств и перспектив использования различных сплавов в металлизации ДБШ;

- исследование термической деградации поверхности полупроводника и её влияния на ВАХ ДБШ, поиск путей защиты поверхности.

Нужно заметить, что хотя к началу наших исследований в литературе уже были публикации по данным вопросам, они всё же носили отрывочный характер. Системный характер нашим исследованиям придало тесное взаимодействие с одним из коллективов НИИЯФ (г. Томск), возглавляемым И.П. Черновым и А.А. Ятисом, что позволило привлечь к исследованиям новые, не использованные в СССР методы обратного резерфордского рассеяния ионов (РРИ) гелия и резонансного обратного рассеяния ионов (РОРИ) лёгких элементов (кислорода, азота) в сочетании с модифицированным методом рентгено-структурного анализа (РСА) и электронной микроскопией (ЭМИ) (эти исследования проводились в СФТИ под руководством М.П. Якубени и И.В. Ивонина).

Практически для всех исследованных металлов термическая устойчивость БШ с GaAs и InP коррелирует с устойчивостью к межфазному взаимодействию. Для металлов 1 группы (Au, Ag, Cu) определяющим фактором взаимодействия является диффузия катиона (Ga, In) в металл. Судя по высокой скорости диффузии, она осуществляется по границам зёрен в металле. Образование новых соединений с выходом их на поверхность, обнаруживаемых наряду с непрореагировавшим металлом, указывает, что реакция идет неоднородно и, прежде всего, по границам зёрен и на контакте м-п. На интенсивность взаимодействия (по данным для контакта Au – GaAs) значительное влияние оказывает атмосфера отжига (H₂, N₂, воздух). Прямые измерения содержания кислорода в системе указывают на его корреляцию со скоростью взаимодействия в контакте. Об этом свидетельствует и корреляция анизотропии скорости взаимодействия:

$$v(110) \geq v(100) > v(111)A > v(111)B,$$

с анизотропией скорости адсорбции кислорода:

$$v(111)B > v(111)A > v(110),$$

которая, как можно предположить, отражает степень окисленности GaAs.

Несмотря на значительную роль во взаимодействии кинетических факторов (совершенство материала, режимы и условия обработки и отжига), некото-

рые черты взаимодействия – образование эвтектик Au – GaAs и Au – InP, преимущественное образование соединений металлов с катионами, испарение аниона (по литературным данным) – можно объяснить на основе равновесных диаграмм состояния двойных систем.

Что касается термической устойчивости ВАХ таких контактов, то она не превышает 250 – 300 °С при кратковременном отжиге. Непосредственной причиной деградации является, судя по всему, «размывание» границы раздела м-п из-за взаимной диффузии и неоднородного взаимодействия и нарушение по этим же причинам структуры приграничной области полупроводника.

Существенно иначе происходит взаимодействие GaAs и InP с металлами 8 группы (Ni, Co, Pd, Rh, Pt). Хотя по данным структурных и электрофизических измерений взаимодействие начинается примерно при тех же температурах, что и с элементами 1 группы и при этом довольно ярко проявляется неоднородность взаимодействия по площади контакта (за исключением Rh, Pt), определяющим фактором взаимодействия является склонность этих металлов к фазообразованию, а не взаимная диффузия. В результате граница раздела сохраняет барьерные характеристики до 600 – 650 °С для БШ с GaAs и до 400 – 450 °С для БШ с InP.

Впервые проведённые исследования анизотропии скорости взаимодействия в контакте Ni – GaAs показали, что она следует ряду [40]

$$v(100) > v(110) > v(111)B > v(111)A,$$

что соответствует соотношению поверхностных энергий различных кристаллографических плоскостей и свидетельствует о контроле процесса взаимодействия скоростью реакции между GaAs и Ni. Наличие дефектов структуры в GaAs, вызванных имплантацией ионов и механической полировкой, значительно увеличивает скорость взаимодействия (то же для контакта Pd – GaAs) и изменяет его кинетику, которая приобретает черты, характерные для изотропного взаимодействия.

Максимальная термическая устойчивость БШ м-GaAs (600 – 650 °С) и м-InP (400 – 450 °С) достигается в оптимальных условиях изготовления контактов. По известным данным указанные температуры соответствуют началу интенсивного термического разложения свободного GaAs и InP соответственно. Это означает, что образующийся в результате взаимодействия слой интерметаллидов не является надёжным барьером для деструкции полупроводника, вызывающей деградацию БШ. Причинами «ранней» (ниже указанных температур) деградации БШ могут быть избыточные механические напряжения в контакте (приводящие при отжиге к сильным структурным нарушениям и ускоренному взаимодействию в местах нарушений) из-за избыточной толщины металлических слоёв, неоптимального режима их нанесения, наличия нежелательных примесей и т.д. Другая категория причин связана с влиянием атмосферы отжига и отсутствием необходимой защиты БШ по периферии. Наконец, в случае тонких (<0,3 мкм) эпитаксиальных слоёв «ранняя» деградация наступает из-

за потребления полупроводника в процессе межфазного взаимодействия.

В наших исследованиях впервые в практике создания ДБШ нашли использование электрохимические сплавы элементов 8 группы (Ni, Pd, Co) с тугоплавкими металлами (Mo, W, Re). Основная заслуга в этом принадлежит В.А. Батенкову и Л.Н. Возмиловой. Применение таких сплавов повышает температуру взаимодействия в системе м-п, снижает механические напряжения в контакте, что в конечном счёте повышает их термическую и электрическую устойчивость. Однако как металлы 8 группы, так и сплавы на их основе не являются барьером для диффузии золота, которое используется в качестве верхнего слоя металлизации для создания надёжного вывода. Более того, такие металлы как Co, Ni и в какой-то степени Pd, напротив, ускоряют взаимодействие GaAs с золотом, приводящее к деградации ДБШ. Проводником этого взаимодействия является Ga, интенсивно диффундирующий через металл 8 группы. Наиболее ярко оно проявляется в системе Au – Ni – GaAs в виде образования эвтектики при $T_{отж} = 350$ °С. (Судя по всему, именно это объясняет благоприятное влияние Ni в омических контактах типа Au/Ge – Ni – GaAs.) В последние годы высокие достоинства в качестве барьерной обнаружила двухслойная металлизация Rh+Pt с верхним слоем золота как для GaAs, так и для InP [43].

На характер взаимодействия и деградацию контактов GaAs и InP с тугоплавкими металлами (Ti, Cr, V, Mo, W, Re), Al, сплавами и металлизациями на их основе значительное влияние оказывают особенности взаимодействия металлов с кислородом. Интенсивность взаимодействия в системе металл – кислород (контролируемая по содержанию кислорода в системе) находится в качественном соответствии с равновесными диаграммами состояния. Именно с диффузией кислорода из атмосферы отжига к границе м-п связывается деградация обратных ВАХ («мягкий» пробой, понижение $U_{пр}$) и прямых ВАХ (увеличение последовательного сопротивления R_s).

Многослойные металлизации для БШ на арсениде галлия (Ti – Au, Ti(Cr, V) – Ni – Au) обнаруживают заметное межфазное взаимодействие уже при 400 – 450 °С. Для таких металлов, как Mo и W эти температуры существенно выше.

Высокой термической устойчивостью отличаются металлизации на основе тугоплавкого металла с алюминиевым покрытием (Ti – Al, V – Al, Cr – Al, Mo – Al). Деградация характеристик защищённого ДБШ наступает в этом случае для наиболее инертных металлов (V, Mo, Al) практически при температуре плавления Al (~ 650 °С). Основным фактором, затрудняющим широкое использование Al, является его высокая чувствительность к режимам и условиям нанесения и особенно трудности использования (часто неизбежного) контактов золота и алюминия, чреватого образованием (при определённых условиях) легко деградирующих соединений.

В процессе исследований опробованы металлизации на основе таких тугоплавких металлов, как W, Mo, Ta и сплавов TiW, ReW, наносимых магнетронным распылением, а также впервые используемых

электрохимических осадков Re и сплавов ReW и ReMo. Хотя и те и другие отличаются высокой инертностью по отношению к GaAs, барьерными свойствами для диффузии нанесённого сверху золота обладают только слои, нанесённые магнетронным распылением. В оптимальных условиях термическая устойчивость таких контактов достигает 650 °С с верхним слоем золота и 700 °С – без него. Причиной деградации ДБШ в последнем случае является, по-видимому, разложение GaAs из-за недостаточности защитных свойств металлизации.

1.3. Диоды с барьером Шоттки и МИС на их основе

Опыт разработки первых смесительно-детекторных диодов (СДД) 8-миллиметрового диапазона 3A114 на основе кристалла с сотовой структурой [44] и с прижимным проволочным выводом к одной из «сот» показал, что несмотря на высокие характеристики такие диоды отличаются высокой трудоёмкостью сборки при низкой стабильности и надёжности. Последнее следовало ожидать, учитывая целый комплекс отрицательных факторов, связанных с локальными напряжениями в контакте.

С учетом этого обстоятельства нами было впервые принято решение создавать СДД в малогабаритных металлокерамических корпусах с кристаллом, рассчитанным на термокомпрессионное присоединение вывода к БШ. Для этого контактная площадка частично выносилась на диэлектрик (расширенный контакт), в окне которого формировался БШ. Сначала расчётные оценки, а затем и практические результаты полностью подтвердили перспективность этого направления для ММДВ. Наиболее трудные задачи, которые пришлось решить на этом пути, связаны с разработкой целого ряда новых технологий:

- малых (5,0 – 2,0 мкм) барьерных контактов для диодов 8 – 2 мм диапазона с достаточно совершенными характеристиками (показатель идеальности $ВАХ < 1,2$);

- эпитаксиальных n^+ – n -структур с тонкими эпитаксиальными слоями: 0,3 – 0,1 мкм;

- малогабаритных металлокерамических корпусов с диаметром втулки от 2,3 до 0,69 м и высотой корпуса от 3,5 до 0,67 мм на основе корундовой и форстеритовой керамики и стеатитового ситалла для диапазона частот от 18 до 180 ГГц;

- сборки диодов в корпуса (термокомпрессия 10-микронной золотой проволокой и лазерная герметизация).

Результатом этой работы стало создание параметрического ряда СДД в малогабаритных металлокерамических корпусах, с параметрами на уровне лучших зарубежных аналогов: 3A121А, 3A123А,Б, 3A129А,Б, 3A133А,Б, 3A136А,Б. При этом в последних диодах впервые кристалл создавался вместе с объёмным выводом, что позволило исключить сложную операцию термокомпрессии и повысить электрическую прочность диодов [45].

Заметим, что наряду с GaAs-ДБШ были созданы во всём ММДВ экспериментальные образцы ДБШ на основе InP, в которых были реализованы ожидавшие

ся благодаря более низкой высоте барьера (0,4 – 0,5 эВ) достоинства: более низкая требуемая мощность гетеродина (1 – 2 мВт в 3 – 2-миллиметровом диапазоне) и возможность работы без смещения в детекторном режиме. Отметим, что существенным шагом в достижении этого результата стала разработка в НИИПП технологии создания структур $n^+-GaAs-n-InP$ с достаточно высоким совершенством фосфинидиновых эпитаксиальных слоёв [46].

Кристалл с сотовой структурой, хотя и уступил свои позиции в ММДВ, оставался единственно приемлемым (из-за минимальных паразитных параметров) для получения высоких результатов в субММДВ (в терагерцевом диапазоне), где он нашёл применение, в основном, в системах для радиоастрономических и радиоспектроскопических исследований [47], а также в системах точного определения времени [48]. Учитывая, что характеристики малоразмерных контактов ещё в большей степени зависят от периферийных эффектов, мы предложили создание охранного кольца вокруг выпрямляющего контакта путём удаления диэлектрика (SiO_2) на расстоянии 0,3 – 0,5 мкм с последующим химическим окислением поверхности GaAs на незначительную глубину [45]. Этим достигается улучшение прямой и обратной ВАХ и уменьшение паразитной ёмкости. Такая конструкция многократно испытана в работах с ИЛФ РАН (г. Новосибирск) по оптическому смещению (см., например, [48]). Созданы промышленные диоды-чипы с сотовой структурой 3A142A-5 и 4A142A-5 (первые отечественные фосфинидиновые СВЧ-диоды) с предельной частотой до 5 ТГц. Особенно интересный и до сих пор необъяснимый результат заключается в том, что по нашим данным фосфинидиновые ДБШ показывают более высокую эффективность в ИК и видимом диапазоне частот, чем арсенидогаллиевые при работе в режиме оптического смещения [47].

С начала 80-х гг. и в ММДВ начинается активный переход к гибридно-интегральным и монокристалльным конструкциям, продиктованный естественным требованием уменьшения веса и габаритов изделий, повышения уровня интеграции. Этому этапу соответствовала разработка в НИИПП смесительно-детекторного диода с балочными выводами (3A138A-3, 3A138B-3 и 3A138B-3) для работы в ГИС и МИС ММДВ. Созданная конструкция [45, 47], сочетавшая в себе использование GaAs-структуры $i-n^+-n$ -типа, воздушной изоляции анодного вывода и расширенного контакта к БШ стала первой конструкцией, обеспечившей эффективную работу ДБВ в коротковолновой части ММДВ и в длинноволновой части субММДВ при относительной технологической простоте, надёжности и воспроизводимости характеристик. Отметим, что подобная конструкция за рубежом появилась на пять лет позже. Наряду с одиночными диодами, были разработаны последовательные и антипараллельные пары диодов для балансных и субгармонических смесителей. Диоды 3A138 используют не только в промышленных разработках, но и в научных исследованиях в целом ряде предприятий и организаций России.

Разработка ДБВ ММДВ способствовала вытеснению ненадёжных точно-диодных конструкций с со-

товой структурой и расширению исследований в коротковолновой части ММДВ. Но особенно важным следствием этой разработки стала возможность непосредственного перехода к созданию МИС ММДВ. Этот процесс начинался в НИИПП практически одновременно с подобными работами за рубежом [49, 50]. Отметим, что именно смесители, основа приёмников ММДВ, стали первой «мишенью» для реализации МИС ММДВ.

Монокристалльные балансные смесители (МБС), ставшие прообразом сегодняшних, были созданы несколько позднее [49]. МИС смесителей монтировались в продольном сечении волновода (в E -плоскости) с помощью специальных балочных выводов [47, 49]. Такая конструкция балансного смесителя была известна из практики создания корпусных и гибридных схем. В нашем варианте МИС заменила гибридную схему, монтируемую на диэлектрической подложке. Конструкция оказалась весьма удачной, и без каких-либо сложностей в течение 10 лет мы «освоили» диапазон от 8 до 0,8 мм [47]. Промышленно были освоены смесители 3- и 2-миллиметрового диапазона. Учитывая характерные особенности предложенных МИС (использование тонкой металлизации в качестве несущей конструкции и крепление в волноводе с помощью зажима краёв схемы между волноводными частями корпуса), было предложено назвать их МИС мембранного типа (МИСМ) [47].

Продвижение в терагерцевый диапазон (до частот 1 ТГц и более) с точки зрения создания необходимых полупроводниковых элементов не встречает принципиальных препятствий. Уже сейчас имеются конструктивные и технологические решения, позволяющие это сделать [51, 52]. Основным препятствием здесь становится конструирование корпусов и метрика. Нужно заметить, что в последние годы в связи с формированием ряда международных радиоастрономических программ [53] терагерцевая технология получила мощный импульс для развития. Для их реализации создаются, по возможности, полностью твердотельные приёмные устройства. Проведенный нами анализ показывает [47], что используемые при этом технологические решения практически полностью лежат в русле предложенных нами МИСМ.

Создание МБС, хотя и было, безусловно, важным этапом, конечно, не решало всей проблемы микроинтеграции в ММДВ. Поэтому естественными были наши попытки реализовать в монокристалльном исполнении наиболее важные элементы радиотехнических систем. В результате были созданы экспериментальные образцы умножителей частоты, детекторов, модуляторов, ограничителей, смесителей сдвига. Были сделаны важные шаги на пути создания МИСМ генераторов на основе ДГ: созданы МИСМ объёмных резонаторов с интегрированным варикапом для перестройки частоты, а затем и бескорпусные ДГ с балочными выводами. Наряду с этим созданы образцы приёмных и приёмно-передающих модулей рекордно малых размеров, включающие указанные МИСМ, размещённые в едином корпусе вместе с низкочастотными цепями управления и питания. Итоги этой работы приведены в обзоре [54] и в обзорных докладах [55, 56].

2. ДИОДЫ ГАННА

Открытие Ганном когерентных СВЧ-колебаний в полупроводниковых соединениях A_3B_5 [57] привело к созданию одного из наиболее востребованных классов генераторных и усилительных диодов, физической основой работы которых является эффект междолинного перехода электронов в сильных электрических полях. На этой основе реализованы многофункциональные устройства, обеспечивающими генерацию, усиление и детектирование сигналов.

Постановка промышленной технологии производства ДГ для специальных применений стала возможной в результате решения комплекса задач и, прежде всего, с пониманием механизма генерации высокочастотных колебаний. Поскольку частота колебаний приблизительно равнялась величине, обратной времени пролета электронов через образец, Кремер [58] отметил, что экспериментально наблюдаемые характеристики процесса согласуются с предсказаниями теории отрицательного дифференциального удельного сопротивления (ОДС), предложенной Ридли и Уоткинсом [59] и Хилсумом [60]. Согласно этой теории, причиной возникновения ОДС является вызванный сильным электрическим полем переход электронов зоны проводимости из низкоэнергетической зоны с относительно высокой подвижностью в высокоэнергетическую, где их подвижность значительно ниже.

Первые феноменологические модели эффекта Ганна позволяли получать аналитические результаты лишь в специальных случаях (главным образом, в приближении слабого сигнала [61]) и не представляли практического интереса. В связи с этим конструктивные и технологические маршруты создания ДГ определялись экспериментально. Ощутимое продвижение произошло в начале 70-х гг. благодаря развитию вычислительной техники и накоплению большого количества экспериментальных результатов. Стало понятным влияние конструктивных параметров кристалла и корпуса прибора, качества омических контактов, механических напряжений, возникающих в процессе изготовления диодов, уровня легирования активных слоев и профиля распределения основных носителей. К этому же времени относится и возникшее понимание механизма переноса электронов как причины ограничения частотного предела ДГ за счет инерционности «разогрева» электронов в сильном электрическом поле.

При организации промышленной технологии производства генераторных ДГ традиционные экстенсивные подходы: автоматизация процесса, ужесточение требований к параметрам процесса – оказались неэффективными, что потребовало проведения фундаментальных и прикладных исследований. Оказалось, что наибольшую роль при изготовлении ДГ играют:

- физические ограничения, накладываемые механизмом, определяющим работу прибора в заданном диапазоне частот;

- метод и технология эпитаксиального выращивания полупроводниковой структуры, обеспечивающие минимальное количество структурных дефектов, заданный уровень концентрации примеси и ее распределение в рабочем слое;

- методика формирования омического контакта с малым удельным сопротивлением;

- корректный расчет и формирование заданной геометрии активной области кристалла с минимальным внесением механических напряжений;

- расчет и изготовление малогабаритного корпуса с минимизацией паразитных параметров;

- монтаж кристалла в корпусе с обеспечением минимального теплового сопротивления и минимально возможной индуктивностью электрических выводов.

На базе НИИПП с привлечением специалистов и исследовательской базы вузов было организовано сотрудничество ученых и экспериментаторов, объединенных одной целью: создать теоретическую, экспериментальную и конструкторско-технологическую базу для промышленного освоения нового перспективного класса полупроводниковых приборов.

Конструкторско-технологическое направление возглавил к. ф.-м. н. (позднее д.т.н.) Л.Л. Люзе. Под его руководством было создано подразделение, обеспечившее возможность проведения исследовательских и технологических работ в едином цикле от расчета конструкции диода до его изготовления. Теоретическое исследование неустойчивости системы электронов в сильных электрических полях проводилось группой выпускников ТГУ под руководством профессора Г.Ф. Караваева. Фундаментальные исследования школы полупроводникового материаловедения, созданной профессором Л.Г. Лаврентьевой (отдел полупроводников СФТИ при ТГУ), нашли практическое воплощение в постановке на предприятии технологии хлоридной эпитаксии, что было реализовано к.т.н. Л.П. Пороховниченко и к.т.н. Н.Н. Бакиным.

Основные работы, связанные с исследованием характеристик материалов, влияния технологических факторов на свойства материала проводились группой исследователей под руководством к.ф.-м.н. В.Г. Мелева. Наконец, отдел по разработке малогабаритных металлокерамических корпусов возглавил А.В. Лавренков.

К началу работы предприятия над созданием и освоением ДГ основные теоретические и физические исследования были проведены для активных элементов планарных ДГ на объемном арсениде галлия, имеющих отношение $D/L < 1$ (D – максимальный размер контакта, L – длина активной области). В промышленном выпуске ДГ используются конструкции, имеющие $D/L = 5 - 50$. Параметр D/L был важен при анализе тепловых характеристик ДГ и конструктивно-технологических ограничений, связанных с уменьшением теплового сопротивления диодов. Но однозначно роль его была не ясна к началу проведения разработок. Выяснилось, в частности, что в коротких образцах ($L < 5$ мкм), которые используются в миллиметровом диапазоне длин волн, весьма актуален анализ динамики доменов и баллистического пролета электронов в арсениде галлия с различными D/L [62, 63]. Не до конца также были исследованы режимы работы ДГ и частотные ограничения, обусловленные инерционностью механизмов междолинного перехода электронов. Теоретические расчеты показывали, что фундаментальные ограничения режимов работы ДГ не позволяют им работать на частотах выше 60 ГГц.

Экспериментальные же результаты, полученные в работе [64], показывали, что при работе в системе так называемого радиального резонатора падение выходной мощности на частотах выше 60 ГГц замедляется. Отсюда были сделаны неверные выводы о возможности увеличения фундаментальной частоты генерации до 80 – 100 ГГц. Таким образом, для реальных диодов с концентрацией электронов в активной области $n > 10^{15} \text{ см}^{-3}$ необходимо было провести дополнительные исследования импульсных вольт-амперных характеристик, как наиболее полно (интегрально) описывающих параметры ДГ, определить фундаментальные ограничения на частоту генерации и разработать принципы увеличения частоты генерации.

История разработки и промышленного освоения ДГ наиболее насыщена в период с 1970 по 1990 г. В эти годы под руководством Л.Л. Люзе была создана программа развития ДГ на 20 лет с необходимостью достижения 100 мВт на 100 ГГц. Первые промышленные ДГ 3А703 и 3А705 разработаны главными конструкторами Л.Г. Шаповалом и А.А. Красильниковым. В 1973 г. выпуск приборов 3А703 и 3А705 был доведен до 5 тысяч штук, в год, и они поставлялись 25 предприятиям страны. В это время разрабатывается первый ДГ миллиметрового диапазона длин волн, работающий в диапазоне частот от 26 до 37,5 ГГц (главный конструктор Ф.Ф. Шмидт).

В 70-е гг. ведутся многоплановые и интенсивные исследования под научным руководством Л.Л. Люзе в содружестве со специалистами ИФП (г. Новосибирск), СФТИ (г. Томск), ИРЭ (г. Фрязино) и другими научными коллективами.

Был решен целый комплекс теоретических, конструкторских и технологических задач:

1. Под руководством Г.Ф. Каравая был разработан комплекс программ для теоретических исследований неустойчивостей горячих электронов в полупроводниках (см., например, [65]).

2. Определены высокочастотные режимы генерации диодов и разработаны резонансные системы на основе радиальных вставок для работы диодов на гармониках фундаментальной частоты [66] и объяснены тем самым результаты, полученные в работе [64].

3. Разработан технологический процесс наращивания эпитаксиальных структур арсенида галлия в хлоридной системе с «дозированным» легированием на основе ретроdiffузионной ячейки [68]. Подобное повторили специалисты фирмы «Varian» в 1985 г. с применением молекулярно-лучевой эпитаксии.

4. Определены зависимости эффективности работы ДГ от профиля легирования активного слоя (см., например, [68]).

5. Всесторонне исследовано влияние всего комплекса технологических операций (около 35 операций) на свойства активного кристалла: ВАХ, тепловые и шумовые характеристики кристаллов и диодов из арсенида галлия и фосфида индия. Определены наиболее информативные функциональные параметры, чувствительные к отклонениям технологических операций от норм.

6. Выявлены доминирующие структурно-геометрические факторы.

7. Исследовано влияние структурно-геометрических параметров (в широком диапазоне отношения D/L) кристаллов и определены основные направления, обеспечивающие повышение частотного предела и выходной мощности.

8. Теоретически и экспериментально исследованы особенности ВАХ и, прежде всего, пороговые характеристики и пробивные напряжения для «коротких» ДГ. Разработаны модели, позволяющие интерпретировать основные результаты, полученные на реальных кристаллах и диодах в широком диапазоне отношения D/L .

9. Создан и внедрен комплекс методик и оборудования для диагностики и межоперационного контроля, пригодный для использования в условиях серийного производства ДГ.

Все работы выполнялись в рамках отраслевой программы «Гамбит», при этом НИИПП был головным предприятием по диодам Ганна в СССР и СЭВ.

С 1976 по 1980 г. ведутся многочисленные разработки и освоение ДГ (9 типов) в диапазоне от 4 до 54 ГГц с уровнями выходной СВЧ-мощности от 10 до 500 мВт. В эти годы интенсивно развивается разработка и производство эпитаксиальных многослойных структур арсенида галлия и высококачественных СВЧ-корпусов. В 1980 г. создан цех СВЧ-изделий и объем выпуска сразу увеличился на 70%.

Наибольшие достижения в разработке и освоении ДГ были в 1981 – 1985 гг. Были получены рекордные значения выходной мощности: 1 Вт в 3-сантиметровом диапазоне и 250 мВт – в 8-миллиметровом диапазоне. Впервые были выполнены работы по освоению типового ряда ДГ. К 1983 г. в производстве освоено 54 типоминимала диодов Ганна с общим объемом выпуска 55 тысяч штук для 60 предприятий-заказчиков. Начаты работы по созданию эпитаксиальных структур фосфида индия, созданию ДГ на алмазном теплоотводе и повышению КПД до уровня более 4%. Освоены первые образцы генераторов на диодах Ганна (ГДГ) в гибридно-интегральном исполнении и начаты разработки полностью твердотельных ГДГ.

В то же время интенсивно ведутся научные исследования, позволившие, в частности, уточнить причину низкой эффективности (КПД < 3 %) работы ДГ, имеющих отношение $D/L = 2 - 100$ и впервые предложены конструкции диодов, позволяющие увеличить КПД диодов за счет структурного расчленения активной области на ряд областей и реализации многодоменных режимов работы. На основе анализа экспериментальных и рассчитанных методом Монте-Карло, зависимостей $E_{\text{пор}}(f)$ и $V_{\text{пор}}(f)$ установлены причины отклонения пороговых параметров реальных ВАХ от теоретических при уменьшении длины активной области.

Впервые проведен комплекс физико-химических исследований арсенида галлия и фосфида индия, что позволило определить влияние ряда технологических операций на ВАХ ДГ и уровень токовых шумов. Установлены основные закономерности изменения напряжения пробоя в зависимости от распределения легирующей примеси по толщине активной области ДГ и особенностей процесса эпитаксиального наращивания, позволившие уточнить критерий устойчивой ра-

боты ДГ, в том числе и для «коротких» (менее 2,5 мкм) диодов во взаимосвязи с отношением D/L . Выявлены физические факторы и технологические процессы, снижающие напряжение пробоя, и показана его динамика в технологическом маршруте изготовления диодов.

Накоплен большой объем информации, касающийся особенностей деградации параметров генераторных ДГ в процессе как кратковременной (токовая тренировка), так и долговременной наработки при различных электрических и тепловых нагрузках. Исследования показали, что основными факторами, влияющими на надежность ДГ, являются продольные и поперечные неоднородности проводимости. Определены конструктивно-технологические факторы, ответственные за их возникновение от стадии создания материала до стадии эксплуатации ДГ.

1985 – 1990-е гг. характеризуются высоким темпом разработок (190 НИОКР) и освоения ДГ и ГДГ в производстве. Освоено 32 типа и 176 типоминималов ДГ с темпами роста объемов 170%. Освоено производство двух типов и 4 типоминималов ГДГ в диапазоне частот от 4 до 100 ГГц с уровнем мощности от 10 до 500 мВт. Ведутся работы по разработке ДГ миллиметрового диапазона (руководитель – В.С. Лукаш). Цель – достижение частоты 150 ГГц. В целом, конец 80-х гг. характеризуется завершением разработок дискретных ДГ и началом создания твердотельных ГДГ на их основе. Создан задел для СИС на объемных эффектах. Выполнена полностью программа по освоению производства ДГ. Не достигнут лишь один результат: выходная мощность 100 мВт на частоте 100 ГГц.

Десятилетие годы характеризуются внедрением в промышленное производство ДГ на основе фосфида индия. В настоящее время такие ДГ успешно применяются в диапазоне частот выше 50 ГГц, где диоды на основе GaAs неэффективны. В условиях НИИПП при разработках ДГ на основе InP использовались типичные полупроводниковые гетероэпитаксиальные структуры типа $n^+_k - n_a - n^+_b - n^+_s$, выращенные методом хлоридной эпитаксии на подложках арсенида

галлия (n^+_k, n_a, n^+_b – эпитаксиальные слои фосфида индия: контактный высоколегированный, активный слаболегированный, буферный высоколегированный соответственно, n^+_s – высоколегированная подложка арсенида галлия). Длина активного слоя была в пределах от 2,4 до 2,8 мкм. Полученные результаты находились на уровне мировых достижений: выходная мощность в 3-миллиметровом диапазоне длин волн была на уровне от 100 до 50 мВт на частотах от 80 до 100 ГГц с КПД до 3,5%.

Современное состояние разработки и производства диодов характеризуется отсутствием централизованного финансирования разработок и неритмичным заказом освоенных типов изделий. В этих условиях предприятие сохранило всю номенклатуру освоенных типов ДГ в диапазоне от 3 до 100 ГГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние два десятилетия мы стали свидетелями подлинной революции в полупроводниковой электронике, связанной с прорывом в области полупроводникового материаловедения (прежде всего, в молекулярно-лучевой эпитаксии) и полупроводниковой технологии в целом. Создание совершенных гетеропереходов (ГП) на основе твердых растворов соединений A_3B_5 (и прежде всего, GaAs, InP, AlAs) позволило резко повысить эффективность биполярных транзисторов, что было предсказано ещё Шокли, и существенно поднять их частотный потолок. Практически одновременно с этим появился новый класс полевых транзисторов на основе ГП (называемых транзисторами с высокой подвижностью – НЕМТ), использующий свойства двумерного электронного газа в ГП. Созданные на основе гетеробиполярных и гетерополевых транзисторов новые типы усилителей мощности и маломощных усилителей позволили существенно продвинуть транзисторную электронику в миллиметровый диапазон волн. Это, конечно, не отменяет диодную электронику, но ограничивает область её использования всё более высокими частотами КВЧ и терагерцового диапазона.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Тагер А.С.* // Литовский физический сборник. 1981. Т. XXI. № 4. С. 23.
2. *Kahng D.* // Solid-State Electron. 1963. V. 6. No 3. P. 281.
3. *Padovani F.A. and Sumner G.G.* // J. Appl. Phys. 1965. V. 36. No. 12. P. 3744.
4. *Вяткин А. П., Максимова Н.К., Катаев Г.А., Батенков В.А.* // Изв. вузов. Физика. 1967. № 8. С. 86.
5. *Goodman A.M.* // J. Appl. Phys. 1963. V. 34. No. 2. P. 329.
6. *Стриха В.И.* // Радиотехника и электроника. 1964. Т. 9. № 4. С. 681.
7. *Cowley A.M. and Sze S.M.* // J. Appl. Phys. 1965. V. 36. No. 10. P. 3213.
8. *Crowell C.R., Shore H.B., La Bate E.E.* // J. Appl. Phys. 1965. V. 36. No. 12. P. 3843.
9. *Crowell C.R., Sze S.M.* // Solid-State Electron. 1966. V. 9. No. 9. P. 965.
10. *Bardeen J.* // Phys. Rev. 1947. V. 71. P. 717.
11. *Зи С.М.* Физика полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1973.
12. *Стриха В.И.* Теоретические основы работы контакта металл – полупроводник. Киев: Наукова думка, 1974.
13. *Стриха В.И., Бузанёва Е.В., Радзиевский И.А.* Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки. М.: Сов. радио, 1974.
14. *Saxena A.N.* // Surface science. 1969. V. 13. P. 151.
15. *Anand J., Moroney W.J.* // Proc. IEEE. 1971. V. 59. No. 8. P. 1190.
16. *Feldman E.J.* // Electronic World. 1966. July. P. 57.
17. *Bauer R.J., Cobin M., Cotton J.M., Packard R.F.* // Proc. IEEE. 1966. V. 54. No. 4. P. 595.
18. *Горбачёв А.И., Кукарин С.В.* Полупроводниковые СВЧ-диоды. М.: Сов. радио, 1968.
19. *Rhoderick E.H. and Williams R.H.* Metal-Semiconductor contacts. 2nd ed. Oxford: Clarendon, 1988.
20. *Божков В.Г., Ковтуненко Г.Ф., Суроткина Г.М., Селина Л.С.* // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1978. Вып. 4 (122). С.14.
21. *Вяткин А.П., Максимова Н.К.* // Изв. вузов. Физика. 1983. № 3. С. 22.
22. *Chekir F., Lu G.N., and Barret C.* // Solid-State Electron. 1986. V. 29. No. 5. P. 519.

23. Божков В.Г., Усольцев А.А., Хан А.В. // Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31. № 1. С. 180.
24. Rau U., Guttler H.H., and Werner J.H. // Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations / Ed. by T. Musha, S. Sato and M. Yamamoto. Ohmsha Ltd., 1991. P. 213.
25. Божков В.Г., Малаховский О.Ю., Леуский В.Е., Струков И.А. // Радиотехника и электроника. 1983. Т. XXVIII. № 6. С. 1182.
26. Kollberg E.L., Zirath H., Jelenski A. // IEEE Trans. on MTT. 1986. V. 34. No. 9. P. 913.
27. Божков В.Г., Каушан А.А. // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1981. Вып. 7 (150). С. 12.
28. Божков В.Г. // Изв. вузов. Физика. 1987. № 2. С. 29.
29. Wittmer M. // Phys. Rev. B. 1990. V. 42. No. 8. P. 5249.
30. Wittmer M. // Phys. Rev. B. 1991. V. 43. No. 5. P. 4385.
31. Werner J.H. and Guttler H.H. // J. Appl. Phys. 1991. V. 69(3). P. 1522.
32. Tung R.T. // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58. No. 24. P. 2821.
33. Sullivan J.P., Tung R.T., Pinto M.R., Graham W.R. // J. Appl. Phys. 1991. V. 70(12). P. 7403.
34. Божков В.Г. // Седьмая Российская конф. «Арсенид галлия». «GaAs-99». Томск, 21 – 23 октября 1999 г. Материалы конф. Томск, 1999. С. 13.
35. Божков В.Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45. № 5. С. 416.
36. Божков В.Г., Зайцев С.Е. // Изв. вузов. Физика. 2004 (в печати).
37. Божков В.Г., Зайцев С.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004 (в печати).
38. Божков В.Г., Зайцев С.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004 (в печати).
39. Wagner L.F., Joung R.W., and Sugerman A. // IEEE Electron Dev. Lett. 1983. V. EDL-4. No. 9. P. 320.
40. Божков В.Г. Дис. ... докт. наук. Томск: НИИПП, 1987.
41. Божков В.Г., Солдатенко К.В., Ятис А.А. // Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки. Киев: Наукова думка, 1979. С. 48.
42. Божков В.Г., Солдатенко К.В., Ятис А.А. // Фосфид индия в полупроводниковой электронике. Кишинёв: Штиинца, 1988. С. 62.
43. Диод с барьером Шоттки. А.С. № 1556472. Приоритет от 25.04.88 г. / К.В. Солдатенко, Н.В. Карпович, О.Ю. Малаховский, В.Г. Божков.
44. Young D.T., Irvin I.C. // Proc. IEEE. 1965. V. 53. P. 2130.
45. Божков В.Г., Вилисова В.В., Куркан К.И. и др. // Электронная промышленность. 1993. № 9. С. 82.
46. Короблёва Т.В., Жарков Ю.П., Малаховский О.Ю. и др. // Электронная промышленность. 1993. № 9. С. 56.
47. Божков В.Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 8 – 9. С. 702.
48. Багаев С.Н., Божков В.Г., Захарьяш В.Ф. и др. // Квантовая электроника. 1998. Т. 25. № 6. С. 558.
49. Божков В.Г., Геннеберг В.А., Куркан К.И. и др. // Электронная промышленность. 1993. № 9. С. 88.
50. Clifton B. J., Alley G.D., Murphy R. A., Mrozcoski H. // IEEE Trans. 1981. V. ED-28. No. 2. P. 155.
51. Интегральная схема СВЧ. Патент № 2076393. Приоритет от 14.05.92 г. / В.Г. Божков, В.А. Геннеберг, В.И. Романовская.
52. СВЧ диод с балочными выводами. Патент № 2061980. Приоритет от 14.08.92 г. / В.Г. Божков, В.А. Геннеберг, В.И. Романовская.
53. Siegel P.H. Terahertz technology // IEEE Trans. on MTT. 2002. V. 50. No. 3. P. 9.
54. Божков В.Г., Геннеберг В.А., Куркан К.И., Перфильев В.И. // Электронная промышленность. 2001. № 5. С. 77.
55. Vozhkov V.G., Ghenneberg V.A., Kourkan K.I., Perfiliev V.I. // MSMW'2001 Symposium Proceedings. Kharkov. Ukraine. June 4 – 9. 2001. P. 126.
56. Божков В.Г., Геннеберг В.А., Куркан К.И., Перфильев В.И. // Восьмая Российская конф. «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V». GaAs-2002. Материалы конф. Томск, 1 – 4 октября 2002. С. 30.
57. Gunn J.B. // Solid State Commun. 1963. V. 1. P. 88.
58. Kroemer H. // Proc. IEEE. 1964. V. 52. P. 1736.
59. Ridley V.K., Watkins T.B. // Proc. Phys. Soc. Lrnd. 1961. V. 78. P. 293.
60. Hilsun C. // Proc. IRE. 1962. V. 50. P. 185.
61. Левинштейн М.Е., Пожела Ю.К., Шур М.С. Эффект Ганна. М., 1975.
62. Лукаш В.С., Юрченко В.И., Поспергелис О.М. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1985. Вып. 4.
63. Юрченко В.И., Лукаш В.С. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1985. Вып. 5. С. 27.
64. Rostoezy F. Gallium Arsenide and Related Compounds. 1974. London-Bristol, 1975. P. 3.
65. Караваев Г.Ф., Ждаков С.В. // VI Всес. симп. по плазме и неустойчивостям в полупроводниках. Вильнюс, 1986. С. 8.
66. Васильев Н.А., Лукаш В.С., Муравьев В.В., Шалатонин В.И. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1985. Т. 28. № 10.
67. Пороховниченко Л.П., Чернов Н.А. Способ получения эпитаксиальных структур арсенида галлия из газовой фазы / Заявка на изобретение № 3595309/079995 от 09.04.84.
68. Ахунов И.Ш., Лукаш В.С., Бакин Н.Н. // Спец. электроника. Сер. Полупроводниковые приборы. 1977. № 8. С. 30.