

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_{b0} [3, 14] и слабой зависимости от температуры их произведения $n\Phi_{b0}$. 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_{b0} 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 (H_2 , N_2 , 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 точечно-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 типоминералов ДГ с темпами роста объемов 170%. Освоено производство двух типов и 4 типоминералов 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.

Девяностые 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 B.K., Watkins T.B. // Proc. Phys. Soc. Lrnd. 1961. V. 78. P. 293.
60. Hilsom 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., Жудаков 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., Бакш Н.Н. // Спец. электроника. Сер. Полупроводниковые приборы. 1977. № 8. С. 30.