

Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

# НАНОТЕХНОЛОГИЯ И МИКРОМЕХАНИКА

Часть 5

**Надежность наноприборов  
и радиоэлектронных устройств на их основе**

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов  
по университетскому образованию  
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по специальности  
«Метрология и метрологическое обеспечение» направления подготовки  
«Метрология, стандартизация и сертификация»*

Москва  
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
2012

УДК 621.382(075.8)  
ББК 32.844.1  
Н25

Авторы: *В.Д. Шашурин, Н.А. Ветрова, Ю.А. Иванов,  
С.А. Мешков, О.С. Нарайкин, Н.В. Федоркова,  
В.О. Москаленко*

Рецензенты: *В.В. Слепцов, П.А. Тодуа*

Н25 **Нанотехнология и микромеханика** : учеб. пособие. —  
Ч. 5 : Надежность наноприборов и радиоэлектронных уст-  
ройств на их основе / В.Д. Шашурин, Н.А. Ветрова,  
Ю.А. Иванов и др. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
2012. — 84, [4] с. : ил.

Проанализированы вопросы обеспечения надежности радиоэлек-  
тронных средств нового поколения – на базе приборов, функциони-  
рующих на квантоворазмерных эффектах в наноразмерных слоях  
составляющих их полупроводниковых гетероструктур. В качестве  
примера рассмотрено обеспечение надежности смесителя радиосиг-  
налов СВЧ-диапазона на базе резонансно-туннельных диодов.

Для студентов старших курсов.

УДК 621.382(075.8)  
ББК 32.844.1

## ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

- ВАХ — вольт-амперная характеристика  
ГФЭ — газофазная эпитаксия с использованием металлоорганических соединений  
ДБШ — диод на барьерах Шоттки  
МЛЭ — молекулярно-лучевая эпитаксия  
РТД — резонансно-туннельный диод  
РТС — резонансно-туннельная структура  
РЭС — радиоэлектронные средства  
СВЧ — сверхвысокочастотный  
См РТД СВЧ — смеситель радиосигналов на основе резонансно-туннельных диодов СВЧ-диапазона

## ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $D$  — динамический диапазон приемного тракта системы связи  
 $E_{f1}(t)$  и  $E_{f2}(t)$  — уровни Ферми в приконтактных высоколегированных областях элемента, функционирующего на резонансном туннелировании  
 $f_{\text{вых}}$  — спектр выходного сигнала смесителя радиосигналов, в котором присутствуют гармоники с частотами  $\pm m f_c \pm n f_f$ , где  $m$  и  $n$  — целые числа  
 $f_f$  — частота сигнала гетеродина  
 $f_{\text{пч}}$  — промежуточная частота сигнала на выходе смесителя радиосигналов  
 $f_c$  — частота сигнала, поступающего на вход смесителя радиосигналов  
 $K_{1\text{дБ}}$  — коэффициент 1 дБ-компрессии  
 $L$  — потери преобразования  
 $-L$  — коэффициент преобразования сигнала  
 $N_{b1}(t)$  и  $N_{b2}(t)$  — толщины слоев РТС, образующих потенциальные барьеры (для РТД на РТС GaAs —  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  это толщины нанослоев  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ )  
 $N_w(t)$  — толщина нанослоя РТС, образующей потенциальную яму между барьерами (для РТД на РТС GaAs —  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  это толщина нанослоя GaAs между нанослоями  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ )

$T_\gamma$  — гамма-процентная наработка до отказа  
 $V_{b1}(t)$  и  $V_{b2}(t)$  — высоты потенциальных барьеров, образованных нанослоями РТС (для РТД на РТС GaAs —  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  высоты  $V_{b1}(t)$  и  $V_{b2}(t)$  пропорциональны концентрации алюминия  $x_{\text{Al}}$  в соответствующих барьерах  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ )  
 $P_{\text{вх}}$  — номинальная мощность входного сигнала на несущей частоте  
 $P_{\text{вых}}$  — номинальная мощность выходного сигнала в нагрузке на промежуточной частоте  
 $P_{\text{н}}^{Y_i}(t)$  — вероятность попадания выходного параметра  $Y_i$  радиоэлектронного устройства на основе наноприбора в момент времени  $t$  в допустимые пределы  $\Delta Y_{ik}$   
 $P_c$  — максимально допустимый уровень сигнала на входе приемника  
 $P_\Phi(\bar{Y}) = P_{\Phi, \text{зад}}(\bar{Y})$  — заданная экспертами вероятность выполнения функций радиоэлектронным устройством на основе наноприбора  
 $\hat{P}_{\Phi, \text{п}} = \text{VPeKv}(0, t)$  — интегральная вероятность выполнения функций партией (или «функция качества» партии) радиоэлектронных устройств на основе наноприбора на протяжении наработки  $t$   
 $P_{\Phi, \text{п}}(t)$  — интегральная вероятность выполнения функций партией радиоэлектронных устройств на основе наноприбора в момент времени  $t$   
 $P_{\Phi, \text{п}}^{Y_i}(t)$  — интегральная вероятность выполнения функций партией радиоэлектронных устройств на основе наноприбора в момент времени  $t$  по выходному параметру  $Y_i$   
 $P_{\text{экв. п}}^{Y_i}(t)$  — вероятность  $P_{\text{н}}^{Y_i}(t)$ , скорректированная с учетом величины  $P_\Phi(Y_i)$   
 $\Gamma(t)$  — пространство параметров гетероструктуры элемента, функционирующего на квантоворазмерных эффектах, в соответствующий момент времени  $t = 0, \dots, T$   
 $\Phi$  — пространство возможных параметров гетероструктур

## ВВЕДЕНИЕ

Тенденции развития современных радиоэлектронных средств (РЭС) связи (телекоммуникации, спутниковой связи, систем мобильной связи) определяют необходимость реализации таких требований к ним, как миниатюризация, повышение технических характеристик (уменьшение потерь преобразования, расширение динамического диапазона, уменьшение искажений сигналов и т. д.), увеличение функциональных возможностей при работе на частоте до десятков терагерц. При этом неизменными остаются требования к повышению показателей надежности РЭС.

Добиться получения совершенно новых, недостижимых ранее свойств РЭС позволяют устройства наногетероструктурной электроники, принцип работы которых основан на квантоворазмерных эффектах в наноразмерных слоях составляющих их полупроводниковых гетероструктур. Свойства наноструктур определяются явлениями на их поверхности и на границах раздела фаз. Однако, когда толщина слоя внутри гетероструктуры составляет несколько атомных слоев, даже незначительное ее отклонение, вызванное технологическими погрешностями, или ее изменение в процессе функционирования может стать причиной значительного изменения параметров полупроводникового прибора и РЭС на его основе, что в конечном итоге приведет к отказу. В связи с этим актуальным и важным является вопрос обеспечения надежности таких приборов.

Задача достижения требуемых значений надежности может быть решена при системном подходе к этой проблеме, основанном на выявлении взаимосвязанных и взаимообусловленных факторов, определяющих формирование отказов РЭС на базе наноприборов и позволяющих учесть конструкторско-технологические особенности их производства.

## **1. ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОИЗВОДСТВА НАНОПРИБОРОВ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ НА ИХ ОСНОВЕ**

Глава посвящена анализу тенденций развития РЭС связи и вызванных им (развитием) изменений в требованиях к функциональным модулям изделий, анализу конструкторско-технологических особенностей производства РЭС на базе наноприборов (на примере смесителей радиосигналов на основе резонансно-туннельных диодов (РТД) СВЧ-диапазона — См РТД СВЧ), а также проблеме достижения заданного уровня их надежности.

### **1.1. Тенденции развития радиоэлектронных систем связи**

В настоящее время развитие РЭС связи направлено на их миниатюризацию, улучшение их технических характеристик, а именно на увеличение объема и скорости передачи данных, что требует повышения пропускной способности систем связи. Это заставляет не только разрабатывать РЭС, функционирующие на более высоких рабочих частотах, но и искать пути расширения полосы пропускания узлов приемных и передающих устройств. Обеспечить указанные требования позволяет использование устройств гетероструктурной электроники, принцип работы которых основан на квантоворазмерных эффектах в наноразмерных слоях составляющих их полупроводниковых гетероструктур.

Ниже перечислены области, в которых используются продукты массового производства гетероструктурной электроники:

- наиболее массовой областью применения остается сотовая связь, в настоящее время это цифровая связь третьего поколения. Она занимает около 57 % «гетероструктурного» рынка. Гетеротранзисторы содержатся почти в каждом сотовом телефоне;
- около 25 % рынка гетероструктурной электроники занимает быстро прогрессирующая высокоскоростная волоконно-оптическая

связь, при этом используются гетероструктурные монокристаллические интегральные схемы миллиметрового диапазона, работающие на частотах до 60 ГГц и выше, ведутся активные разработки приборов, работающих на частотах до 100 ГГц и выше;

- около 12 % рынка гетероструктурной электроники принадлежат так называемой потребительской электронике, связанной с цифровым телевидением (частоты от 12 до 30...40 ГГц);

- наблюдается быстрый рост рынка гетероструктурных монокристаллических интегральных схем на частоте 77 ГГц, для автомобильных антистолкновительных радаров;

- быстро развивается рынок монокристаллических интегральных СВЧ-схем для спутниковой связи на частотах до 60 ГГц;

- перспективной областью применения гетероструктурной СВЧ-электроники является беспроводная связь широкополосного доступа на частотах до 60 ГГц и выше с предоставлением услуг мультимедиа (передача сложных изображений, видеоконференций, дистанционное обучение, высокоскоростной интернет и т. д.);

- 3...4 % рынка принадлежат военной электронике. Имеются в виду в основном бортовые и мобильные наземные радиолокаторы на активных фазированных антенных решетках X-диапазона (частота около 10 ГГц) для ведения разведки, обнаружения целей, наведения и сопровождения ракет, а также для радиоэлектронной борьбы.

В общем случае структура системы связи выглядит так, как показано на рис.1.1.

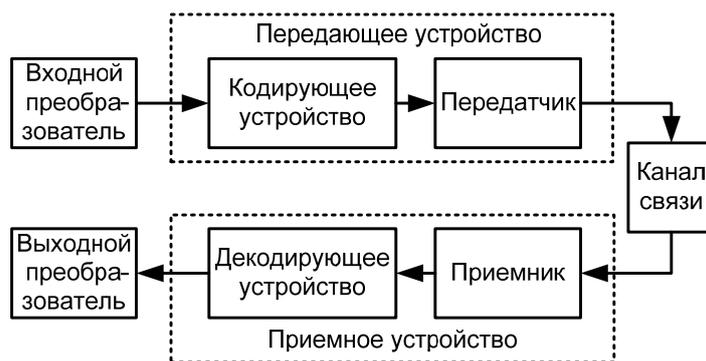
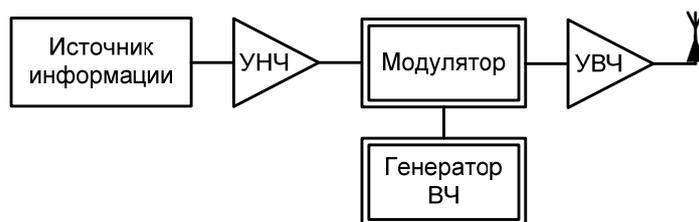
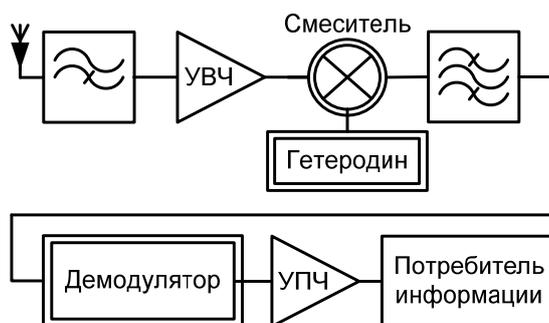


Рис. 1.1. Структурная схема обобщенной системы связи

На рис. 1.2 и 1.3 показаны структурные схемы приемного и передающего трактов обобщенной системы связи.



**Рис. 1.2.** Структурная схема передающего устройства (УНЧ — усилитель мощности низкой частоты, УВЧ — усилитель мощности высокой частоты, генератор ВЧ — генератор высокой частоты)



**Рис. 1.3.** Структурная схема приемного устройства (УПЧ — усилитель промежуточной частоты)

## 1.2. Конструкторско-технологические аспекты изготовления радиоэлектронных устройств на базе наноприборов

В настоящее время основные узлы РЭС на базе наноприборов конструктивно реализуются в виде гибридной (реже — монолитной) интегральной схемы. Конструкция этих узлов включает в себя подложку, на которой размещается интегральная схема, расположенные на ней традиционные элементы и собственно гетероструктурные приборы. В технологическом цикле изготовления этих узлов можно выделить два базовых процесса. Первый — изготовление традиционных элементов (микрополосков, сосредоточенных элементов и т. д.), формирование контактов, реализация

межсоединений, корпусирование и т. д. Эти технологические операции давно известны и технологически отработаны.

Второй базовый технологический процесс — изготовление основного нанозлемента, имеющего оптимальные для данного узла РЭС связи характеристики (например, изготовление РТД с заданной формой вольт-амперной характеристики (ВАХ), разработанного для конкретного типа преобразователя радиосигналов). К основным этапам технологического процесса изготовления нанозлемента относятся изготовление подложки, гетероструктур, омических контактов и нанесение электроизоляционной пленки. Базовой операцией технологического процесса является операция формирования гетероструктуры, так как именно характеристики гетероструктуры определяют параметры нанозлемента, а погрешности операции определяют поле рассеивания параметров нанозлемента.

Наиболее отработанными являются конструкции гетероструктурных приборов на основе GaAs, который уже несколько десятилетий служит базой для производства полевых и биполярных транзисторов, диодов на барьерах Шоттки (ДБШ), РТД. Использование InP позволило улучшить частотные характеристики транзисторов. Широкое распространение получили транзисторные гетероструктуры InAlAs/InGaAs/InP, InP/InGaAs/InP. Перспективным материалом для гетероструктурных приборов является GaN. Полевые транзисторы на гетероструктурах AlGaN/GaN, интерес к которым неуклонно возрастает на протяжении последнего десятилетия, по совокупности параметров уникальны в ряду СВЧ-приборов. Основной особенностью нитридных гетероструктур является образование в результате пьезолегирования на гетерогранице AlGaN/GaN двумерного электронного газа с концентрацией электронов порядка  $10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Подвижность электронов в нем существенно зависит от степени совершенства гетероструктуры и при температуре 300 К может достигать  $1\,000 \dots 2\,000 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ . Вследствие высокой проводимости двумерного электронного газа в полевых транзисторах на основе таких гетероструктур получают значения плотности тока более 1,0 А/мм, что в сочетании с высокими пробивными полями позволяет достичь плотности мощности на порядок большей, чем в приборах на основе GaAs. Это обстоятельство послужило стимулом для активных разработок электронной компонентной базы гражданского и военного назначения. В мире уже созданы нитридные транзисторы, демонстрирующие на частотах

2...4 ГГц плотность мощности до 32 Вт/мм при использовании дискретных приборов и суммарные мощности свыше 150 Вт в составе усилителей. Существенное место в наногетероструктурной электронике занимают гетероструктуры SiGe/Si, твердые растворы SiGe, сверхрешетки SiGe/Si, на основе которых строятся полевые и биполярные транзисторы.

При разработке гетероструктуры важно учитывать несколько требований. Одно из них — отсутствие оксидной пленки и посторонних адсорбированных атомов на поверхности контакта кристаллов, что достигается послойным эпитаксиальным наращиванием. Необходимо также, чтобы на границе раздела не было центров накопления поверхностного заряда и механических напряжений, т. е. не было скопления дефектов или дислокаций. Это особенно важно, если учитывать малую толщину слоев (единицы нанометров). Такие требования могут быть выполнены, если два полупроводника имеют одинаковую кристаллическую структуру и равные постоянные кристаллической решетки. В твердом растворе замещения AlGaAs в кристаллической решетке GaAs место некоторых атомов Ga занимают атомы Al. При этом постоянная кристаллической решетки GaAs равна 5,653 Å, а AlAs — 5,659 Å. Рассогласование решеток для этой пары полупроводников составляет всего 0,006 Å (или 0,1 %), что практически не влечет за собой возникновения дефектов и дислокаций. Для сравнения, рассогласование кристаллических решеток пары GaAs/InAs составляет 7 %, однако эти материалы также достаточно широко применяются при изготовлении современных слоистых наноструктур. Технологическая операция формирования гетероструктуры, как правило, реализуется на основе метода молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) либо газофазной эпитаксии с использованием металлоорганических соединений (ГФЭ).

### **1.3. Формирование показателей надежности радиоэлектронных устройств на базе наноприборов**

В настоящее время проведены исследования РЭС на базе наноприборов в следующих направлениях:

- физические механизмы функционирования полупроводниковых приборов на базе гетероструктур;
- технологические аспекты изготовления гетероструктур на базе МЛЭ и ГФЭ;

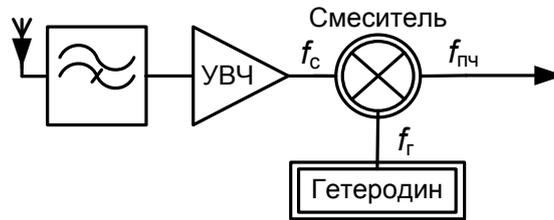
- оптимизация конструкции наноприборов с целью улучшения их эксплуатационных параметров;
- компьютерное моделирование работы приборов на базе гетероструктур, создание моделей токопереноса. К программным средствам, позволяющим решить эту задачу, относятся программы WinGreen (Германия), Minimos-NT (Венский институт микроэлектроники). Моделирование узлов РЭС осуществляют с помощью программ для разработчиков электрических СВЧ-схем (Advanced Design System, Microwave Office и др.);
- решение вопросов надежности: оптимизация конструкции наноприбора с целью улучшения его эксплуатационных параметров; исследование уровня надежности РЭС на базе наноприборов, конструктивно оптимизированных по критерию экстремальности эксплуатационных параметров.

В настоящем учебном пособии рассмотрено последнее направление, а именно исследованы закономерности формирования отказов РЭС на базе наноприборов (на примере См РТД СВЧ) с использованием приведенной в пособии методики их конструкторско-технологической оптимизации, обеспечивающей достижение заданных показателей надежности изделий.

#### **1.4. Проблемы обеспечения качества производства радиоэлектронных устройств на базе наноприборов (на примере смесителей радиосигналов СВЧ-диапазона) на основе резонансно-туннельных диодов**

Одним из важных узлов, во многом определяющих характеристики РЭС связи в целом, является нелинейный преобразователь сигнала — модулятор в передающем тракте или смеситель в приемном тракте. Существенное улучшение потребительских характеристик РЭС связи достигается за счет принципа преобразования частоты принимаемого сигнала — переносом в частотную область, где он может быть обработан с наибольшей эффективностью. С помощью смесителя принятый сигнал сначала переносится в область более низких частот, а затем демодулируется и передается дальше, при этом необходимо, чтобы сигнал был преобразован с минимальными искажениями.

На вход смесителя с входного малошумящего усилителя приемного тракта РЭС связи поступает радиочастотный сигнал  $f_c$ , который, смешиваясь с сигналом гетеродина  $f_r$ , дает на выходе сигнал промежуточной частоты  $f_{пч}$  (рис. 1.4).



**Рис. 1.4.** Структурная схема входного тракта приемного устройства системы связи

Важнейшими эксплуатационными параметрами смесителей радиосигналов являются полоса пропускания, динамический диапазон, потери преобразования, коэффициент шума, изоляция между входами.

Для приемного тракта системы связи динамический диапазон  $D$  выражается логарифмом отношения максимально допустимого уровня сигнала на входе приемника ( $P_c$ ) к чувствительности приемника ( $P_{ш}$ ), ограниченной шумами, т. е.  $D = 10 \lg (P_c/P_{ш})$ . Различают динамический диапазон по компрессии и динамический диапазон по интермодуляции. Нижний предел динамического диапазона смесителя определяется его коэффициентом шума, в то время как верхний — уровнями компрессии коэффициента передачи интермодуляционных составляющих ( $K_{1дБ}$ ). Этот параметр смесителя характеризует качество обработки принимаемого сигнала.

Потери преобразования характеризуются коэффициентом преобразования  $L = P_{вых} / P_{вх}$ , где  $P_{вых}$  — номинальная мощность выходного сигнала в нагрузке на промежуточной частоте;  $P_{вх}$  — номинальная мощность входного сигнала на несущей частоте. Активные смесители обеспечивают значение коэффициента преобразования в диапазоне  $-1 \dots +17$  дБ, в то время как пассивные — типовое значение в диапазоне  $-5,5 \dots -8,5$  дБ.

В настоящее время в смесителях радиосигналов широко используются ДБШ, имеющие ВАХ экспоненциального вида. В итоге в спектре выходного сигнала присутствуют гармоники с частотами  $f_{вых} = \pm m f_c \pm n f_r$ , где  $m$  и  $n$  — целые числа. Таким образом, частотный спектр выходного сигнала смесителя радиосигналов имеет большой набор интеркомбинационных составляющих, в результате чего увеличиваются потери преобразования, уменьшается динамический диапазон и сужается полоса рабочих частот, что

ведет к ухудшению качества и уменьшению объемов передачи данных.

Переход на более высокие рабочие частоты (с целью увеличения объема передачи данных) заставляет разработчиков искать новые материалы для полупроводниковых приборов, совершенствовать конструкцию и технологию производства этих приборов. На работу узлов РЭС сильное влияние оказывают паразитные емкости и индуктивности, и при переходе на более высокие рабочие частоты требуется уменьшать активную область прибора, размеры выводов и корпусов, чтобы минимизировать паразитные емкости и индуктивности. Однако при переходе на более высокие частоты (до терагерц) использование ДБШ уже не эффективно, поскольку они функционируют на основе баллистического пролета электронов, что не позволяет увеличить быстродействие прибора. Уменьшение его активной области приводит к существенному снижению максимально допустимых значений мощности и напряжения. В такой ситуации выход находят в использовании полупроводниковых приборов, функционирующих на основе квантоворазмерных эффектов, а именно резонансного туннелирования. Ток в таких приборах определяется площадью резонансно-туннельной структуры (РТС), а граничная частота — размерами РТС в направлении протекания тока. Перспективным техническим решением является РТД с поперечным токопереносом на базе многослойных гетероструктур типа  $A_3B_5$ .

Квантоворазмерный эффект резонансного туннелирования сохраняется при комнатной и повышенной температурах. Изменяя характеристики РТС (толщину слоев, химический состав), можно управлять формой ВАХ РТД и создавать РТД с оптимальной ее формой для конкретного вида нелинейного преобразования. Это позволяет уменьшить количество интермодуляционных составляющих в спектре выходного сигнала без применения фильтров, повысить качество и увеличить объем передаваемой информации, что особенно важно для систем космической, спутниковой и мобильной связи.

К основным этапам технологического процесса изготовления РТД относятся изготовление подложки, РТС, омических контактов и нанесение полиимидной пленки. Основу этого технологического процесса составляет операция формирования РТС ( $GaAs$  —  $AlGaAs$ ), так как именно ее характеристики определяют форму ВАХ РТД, а погрешности операции определяют ее поле рассеивания.

Метод МЛЭ позволяет создавать многослойные структуры, например GaAs и  $Al_xGa_{1-x}As$ , пригодные для изготовления интегральных схем с гетеропереходами и обладающие высокой однородностью и воспроизводимостью уровня легирования примесями. Процесс МЛЭ осуществляется при температуре роста 400...700 °С (рис. 1.5).

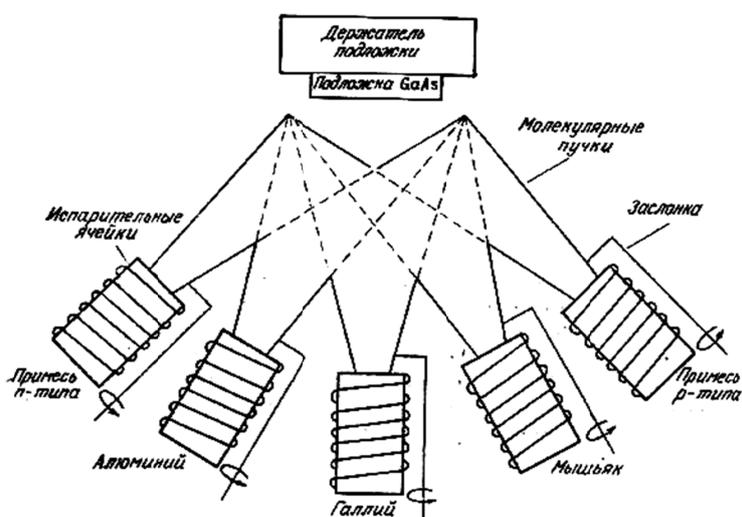


Рис. 1.5. Схематическое изображение процесса эпитаксиального выращивания пленок GaAs и AlGaAs методом МЛЭ

Процедура выращивания РТС методом ГФЭ включает в себя подготовку подложки (очистка и травление), продувку системы водородом, разогрев подложки с помощью СВЧ-индуктора, непосредственно процесс осаждения и последующий отжиг (рис. 1.6). Скорость роста обычно равна 0,1 мкм/мин. При относительной простоте метода ГФЭ проблемой является загрязнение растущей пленки.

Для реализации омического контакта, как правило, последовательно напыляются слои AuGe/Ni/Au, а затем выполняется оплавление омического контакта. Выбор температуры оплавления (около 360 °С) и времени выдержки (около 15 с) оказывает существенное влияние на качество и долговременную стабильность контактов. В зависимости от конкретных требований используют также следующие сочетания материалов: AuGe/Ni/Ti/Au, PdGe и Ti/W/Au.

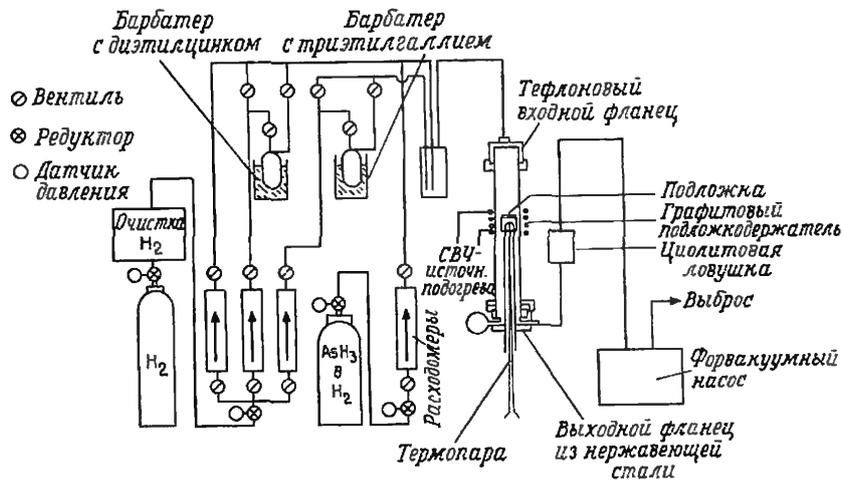


Рис. 1.6. Схема установки для эпитаксиального выращивания пленок GaAs и AlGaAs методом ГФЭ

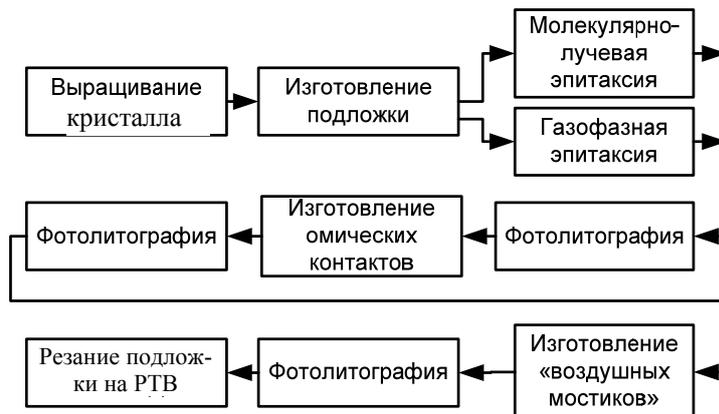


Рис. 1.7. Структурная схема технологического процесса изготовления РТД

Изоляции между контактными площадками выводов РТД обычно достигают влажным или сухим травлением, это необходимо для удаления слоев РТС. Чтобы достичь того же результата, может использоваться ионная имплантация. Межсоединения реализуются с помощью «воздушных мостиков». Технологический процесс изготовления РТД (рис. 1.7) включает в себя типовые операции изготовления элементов микроэлектроники.

Проблема достижения заданной надежности См РТД СВЧ в основном связана с обеспечением заданного уровня надежности См РТД СВЧ в космическом, авиационном и специальном приборостроении. Без специальных мер по обеспечению надежности См РТД СВЧ значения показателей их надежности оказываются недостаточно высокими (гамма-процентная наработка до отказа  $T_{\gamma=0,99} \approx 5$  лет) и нестабильны.

На надежность См РТД СВЧ влияют погрешности технологического процесса его изготовления (дефекты подложки, эпитаксиальных слоев; погрешности легирования, металлизации, пассивации; погрешности геометрических параметров), а также внешние воздействия (температура, влажность, электрические нагрузки, ионизирующее излучение, механические воздействия и др.). Параметрическая надежность См РТД СВЧ определяется выходом одного из параметров (динамического диапазона, потерь преобразования, полосы пропускания, коэффициента шума) за границы допуска, заданного разработчиком исходя из требований к параметрам приемного тракта РЭС связи. Отказы смесителей по их внешним проявлениям можно разделить на внезапные (характеризуются скачкообразным изменением параметров) и постепенные (характеризуются постепенным изменением параметров).

В общем случае можно считать, что типовой См РТД СВЧ состоит из РТД и пассивной части. Вероятность безотказной работы См РТД СВЧ определяется как произведение вероятности безотказной работы РТД и вероятности безотказной работы пассивной части См РТД СВЧ (плата, элементы соединений, резисторы, конденсаторы и т. д.). Показатели надежности элементов пассивной части См РТД СВЧ можно определить на основе справочных данных.

Исследования, проведенные в МГТУ им. Н.Э. Баумана, показали, что «слабым местом» См РТД СВЧ с точки зрения надежности является РТД. Установлено, что доля отказов пассивных элементов мала, а доминируют постепенные отказы РТД, обусловленные деградационными процессами в РТС. Интенсивность этих процессов зависит от характеристик РТС и от технологии ее изготовления, информация о которых является неполной.

Таким образом, от качества преобразования сигнала смесителем во многом зависят выходные параметры РЭС связи. В спектре выходного сигнала смесителя кроме полезной частоты возникает множество интермодуляционных составляющих, уровень которых

зависит от конструкции смесителя, соотношения частот и амплитуд входного сигнала и сигнала гетеродина, а также от формы ВАХ нелинейного элемента, на основе которого выполнен смеситель. Существующие смесители радиосигналов традиционно строятся на основе ДБШ, который имеет экспоненциальную ВАХ. Устранение паразитных продуктов частотного преобразования осуществляется включением в цепь смесителя частотных фильтров, что усложняет его схему, увеличивает габариты, повышает цену и снижает надежность.

Кардинальным способом улучшения технических характеристик смесителей радиосигналов является применение нелинейного элемента, имеющего ВАХ, отличную от экспоненты, что позволяет уменьшить число интермодуляционных составляющих в спектре выходного сигнала и в результате расширить полосу рабочих частот без применения фильтров. Однако такие См РТД СВЧ характеризуются недостаточно высоким уровнем надежности, что требует применения специальных мер по ее обеспечению.

## 2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОСТЕПЕННЫХ ОТКАЗОВ НАНОПРИБОРОВ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ НА ИХ ОСНОВЕ

Прежде чем перейти к расчетно-методическому обеспечению выбора рациональных конструкторско-технологических решений при производстве наноприборов и радиоэлектронных устройств на их основе для достижения заданных показателей надежности, необходимо исследовать процессы их формирования.

### 2.1. Структурная схема формирования и изменения эксплуатационных параметров наноприборов и радиоэлектронных устройств на их основе

Исследование процесса старения наноприборов и радиоэлектронных устройств на их основе, а именно изменения выходных электрических параметров узла РЭС с течением времени в зависимости от параметров гетероструктуры, основано на выявлении факторов, определяющих постепенные отказы изделия (рис. 2.1). Особенность схемы, приведенной на рисунке, состоит в том, что пространство ее «исходов» расширено до материала (химического состава) и архитектуры гетероструктуры наноприбора, причем пространство «исходов» для разрабатываемой методики образует множество различных параметров гетероструктуры, которые обеспечивают заданные выходные электрические характеристики радиоэлектронного устройства.

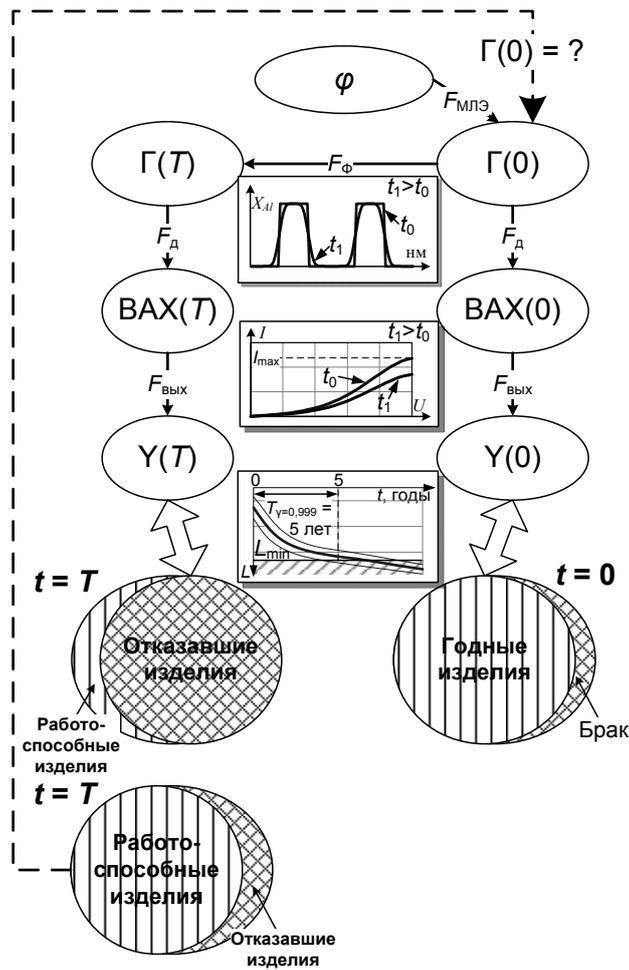
В общем виде структурная схема формирования эксплуатационных характеристик радиоэлектронного устройства на основе наноприбора с учетом деградационных процессов описывается суперпозицией четырех отображений (см. рис. 2.1):

$$\begin{array}{c}
 \varphi - F_{\text{МЛЭ}} \rightarrow \Gamma(0) - F_{\text{д}} \rightarrow \text{ВАХ}(0) - F_{\text{ВЫХ}} \rightarrow Y(0); \\
 \quad \quad \quad \uparrow \\
 \quad \quad \quad F_{\Phi} \\
 \quad \quad \quad \downarrow \\
 \Gamma(T)F_{\text{д}} \rightarrow \text{ВАХ}(T) - F_{\text{ВЫХ}} \rightarrow Y(T),
 \end{array}
 \tag{2.1}$$

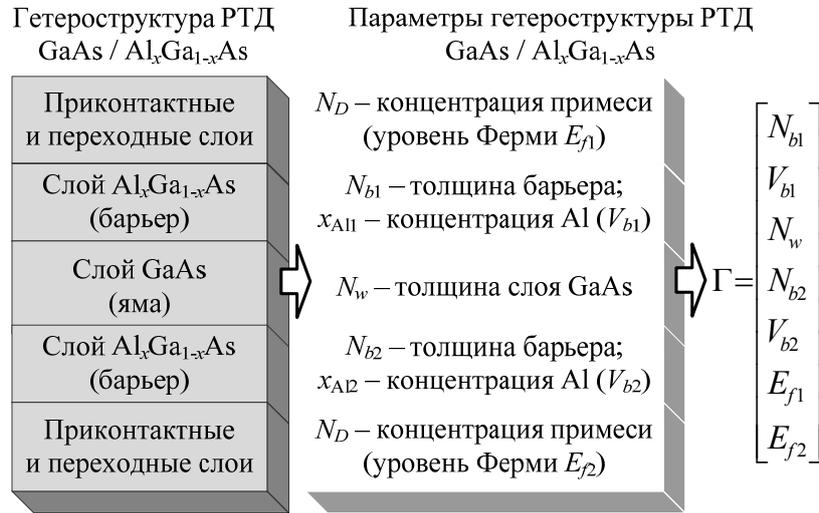
где

$$\varphi : F_{\text{МЛЭ}} = \Gamma(0); \quad \Gamma(T) : F_{\text{д}} = \text{ВАХ}(T), \quad t = 0, \dots, T;$$

$$\text{ВАХ}(T) : F_{\text{вых}} = Y(T), \quad t = 0, \dots, T; \quad \Gamma(0) : F_{\varphi} = \Gamma(T).$$



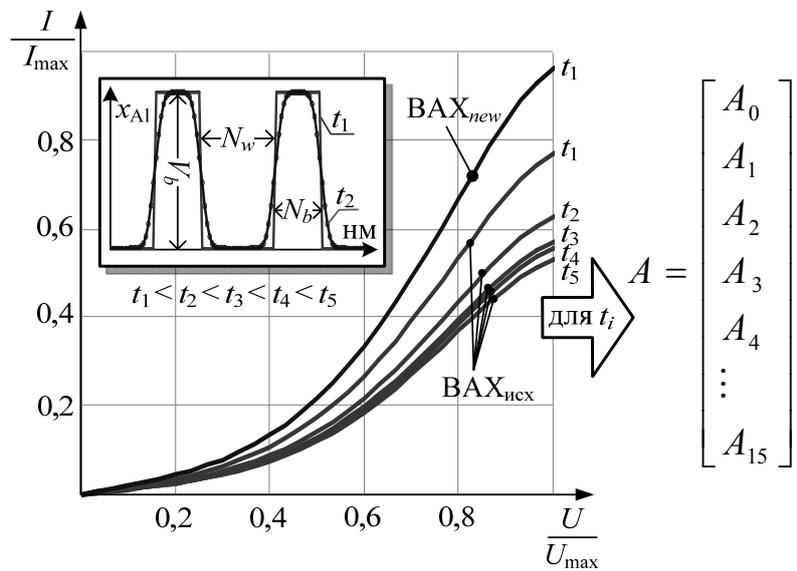
**Рис. 2.1.** Структурная схема формирования эксплуатационных характеристик радиоэлектронного устройства на основе наноприборов с учетом деградационных процессов, обусловленных диффузионными процессами в гетероструктуре



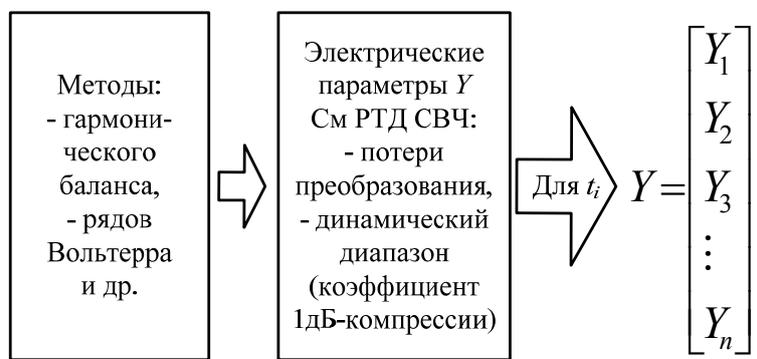
**Рис. 2.2.** Формирование параметров гетероструктурного наноприбора на примере формирования параметров РТС ( $F_{\text{МЛЭ}}$ )

В (2.1) и на рис. 2.1 обозначено:  $\phi$  — пространство возможных параметров гетероструктуры; функция  $F_{\text{МЛЭ}}$  — отображение  $\phi$  в пространство  $\Gamma = \Gamma(0)$  начальных (в момент времени  $t = 0$ ) параметров гетероструктуры наноприбора, определяемое технологическим процессом (рис. 2.2);  $F_\phi$  — отображение пространства начальных параметров гетероструктуры наноприбора в пространство  $\Gamma(t)$  параметров гетероструктуры наноприбора в соответствующий момент времени  $t = 0, \dots, T$  (предполагается, что процесс старения происходит в интервале времени  $[0, T]$  — рис. 2.3);  $F_d$  — отображение параметров гетероструктуры наноприбора в пространство  $\text{ВАХ} = \text{ВАХ}(t)$  параметров наноприбора в соответствующий момент времени  $t = 0, \dots, T$  (например, ВАХ РТД в момент времени  $t$  — см. рис. 2.3);  $F_{\text{вых}}$  — отображение пространства параметров радиоэлектронного устройства на основе наноприборов (в том числе параметров наноприбора в момент времени  $t = 0, \dots, T$ ) во множество  $Y = Y(t)$  эксплуатационных характеристик устройства в этот же момент времени (рис. 2.4).

Такая структурная схема выбрана в связи с тем, что каждое из отображений ( $F_{\text{МЛЭ}}$ ,  $F_\phi$ ,  $F_d$  и  $F_{\text{вых}}$ ) существенно отличается от остальных отображений при своем задании (описании).



**Рис. 2.3.** Формирование характеристик наноприбора на примере формирования ВАХ РТД ( $F_d$ )



**Рис. 2.4.** Формирование выходных параметров радиоэлектронных устройств на основе наноприборов ( $F_{\text{вых}}$ )

Для См РТД СВЧ математическая модель формирования функций  $F_d$  — отображения параметров РТС в пространство ВАХ = = ВАХ( $t$ ) параметров диода в соответствующий момент времени  $t = 0, \dots, T$  (формирование ВАХ диода в момент времени  $t$ ) — см. рис. 2.3 — основана на формуле Цу — Есаки

$$J(U) = \frac{em^*}{2\pi^2\hbar^3} \int_0^\infty E_F F(E, U) \cdot Z(E, U) dE, \quad (2.2)$$

где  $J$  — плотность тока поперек слоев, А/см<sup>2</sup>;  $U$  — напряжение, приложенное к исследуемой структуре, В;  $e$  — заряд электрона,  $e = 10^{-19}$  Кл;  $m^*$  — эффективная масса электрона, определяемая согласно стандартной аппроксимации через массу свободного электрона:

$$\frac{m^*}{m_0} = 0,067 + 0,083x, \quad 0 \leq x \leq 1; \quad (2.3)$$

$\hbar = 10^{-34}$  Дж·с — постоянная Планка;  $E_f$  — энергия Ферми. Известно, что положение уровня Ферми в случае сильного вырождения полупроводников (что справедливо для приэлектродных областей РТД) можно определить по формуле

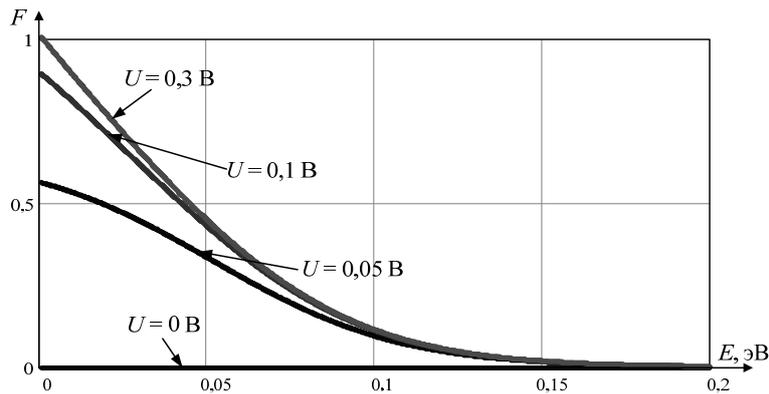
$$E_f = \frac{(3\pi^2)^{2/3} \hbar^2 (N_D)^{2/3}}{2m^*} \quad (2.4)$$

(здесь  $N_D$  — концентрация легирующей примеси);  $E$  — кинетическая энергия движения электрона в зоне проводимости поперек слоев наноструктуры, эВ;  $F(E, U)$  — известная функция, представляющая собой вероятность для электрона находиться в классических областях (приэлектродных слоях), результат интегрирования распределения Ферми электронов проводимости по энергиям их движения вдоль слоев,

$$F(E, U) = \frac{k_B t^\circ}{E_f} \ln \frac{1 + e^{\frac{E_f - E}{k_B t^\circ}}}{1 + e^{\frac{E_f - E - U}{k_B t^\circ}}} \quad (2.5)$$

(здесь  $k_B$  — постоянная Больцмана;  $t^\circ$  — температура окружающей среды).

Характерный график функции  $F(E, U)$  при значении  $E_f = 0,1$  эВ показан на рис. 2.5. Функция  $F(E, U)$  не зависит от параметров РТС (ни от размеров слоев GaAs/AlGaAs, ни от концентрации Al), так как этой функцией описывается распределение электронов во внешних областях (т. е. прозрачность наноструктуры принимается равной единице). Функция  $F(E, U)$  сильно зависит от приложенного к структуре напряжения, при нулевом напряжении  $F(E, 0) = 0$ . Функция  $Z(E, U)$  — прозрачность исследуемой слоистой наноструктуры, вероятность прохождения электрона поперек структуры, т. е. между классическими областями (приэлектродными слоями), через квантоворазмерную область;  $Z(E, U)$  имеет вид резонансных пиков, соответствующих энергиям  $E_0, E_1$  и т. д. Характерный график прозрачности первого резонансного уровня  $Z(E, U)$  и основные параметры прозрачности представлены на рис. 2.6.



**Рис. 2.5.** Зависимость функции  $F(E, U)$  от  $E$  при различных значениях  $U$

Графически интеграл Цу — Есаки представляет собой площадь (рис. 2.7) под пересечением двух кривых:  $Z(E, U)$  и  $F(E, U)$ . Для каждого значения напряжения эта площадь своя. Перебирая исследуемый диапазон напряжений, находим плотность тока  $J(U)$  в каждой точке  $U$ .

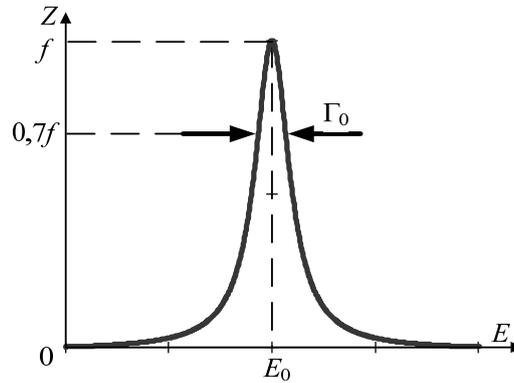
Стандартную аппроксимацию дна зоны проводимости двухбарьерной РТС GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As определяют как функцию концентрации Al<sub>x</sub>:

$$V_b = \begin{cases} 0,75x \text{ эВ}, & 0 \leq x \leq 0,45; \\ 0,75x + 0,69(x - 0,45)^2 \text{ эВ}, & 0,45 \leq x \leq 1, \end{cases} \quad (2.6)$$

где  $V_b$  — высота барьеров симметричной РТС (разность в уровнях зоны проводимости GaAs и  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ). Чтобы вычислить  $Z(E, U)$ , необходимо решить одномерное стационарное уравнение Шредингера для одного электрона

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{\partial^2 \psi(l)}{\partial l^2} + V(l) \cdot \psi(l) = E_{\text{полн}} \psi(l), \quad (2.7)$$

где  $\psi(l)$  — волновая функция;  $l$  — толщина (координата) РТС;  $E_{\text{полн}}$ ,  $V(l)$  — полная и потенциальная энергии квантовой системы.



**Рис. 2.6.** Параметры первого пика прозрачности  $Z(E)$  при фиксированном значении напряжения  $U$  ( $f = 1$  для симметричной РТС):

$E_0$  — положение вершины первого пика прозрачности по шкале энергий;  $f$  — высота пика прозрачности;  $\Gamma_0$  — ширина первого пика прозрачности на уровне  $0,7f$

Уравнение Шредингера имеет решение в виде суперпозиции плоских волн, когда функция  $V(l)$  на рассматриваемом интервале постоянна, поэтому весь потенциальный барьер разбивают на  $n$  участков  $l_n$ . Тогда решение уравнения (2.7) необходимо искать в виде

$$\psi_n(l) = A_n e^{ik_n l_n} + B_n e^{-ik_n l_n}, \quad (2.8)$$

где  $k_n = \frac{\sqrt{2m^*(E - V(l_n))}}{\hbar}$ ;  $A_n$  и  $B_n$  — коэффициенты.

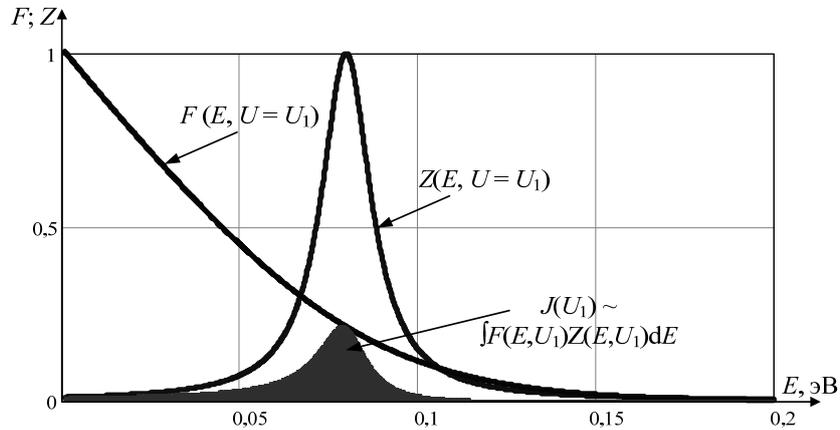


Рис. 2.7. Графическая интерпретация формулы Цу — Есаки

С учетом условий непрерывности и гладкости функции  $\psi$  уравнение (2.7) можно решить, используя матрицу перехода:

$$\begin{pmatrix} A_n \\ B_n \end{pmatrix} = \hat{M}_n \begin{pmatrix} A_{n+1} \\ B_{n+1} \end{pmatrix}, \quad (2.9)$$

где  $\hat{M}_n$  — матрица перехода.

Коэффициент прозрачности определяется отношением

$$Z = \frac{|A_{n+1}|^2}{|A_n|^2}. \quad (2.10)$$

Из соотношений (2.6)—(2.8) и (2.10) следует, что прозрачность  $Z(E, U)$  гетероструктуры зависит от толщины ее слоев и их химического состава.

Таким образом, рассмотренная модель формирования  $F_d$  — отображения параметров РТС в пространство  $VAX = VAX(t)$  параметров РТД в соответствующий момент времени  $t = 0, \dots, T$  (формирование  $VAX$  РТД в момент времени  $t$ ) — позволяет сделать вывод о том, что  $VAX$  РТД зависит от химического состава и толщины слоев конкретной гетероструктуры (см. уравнения (2.2), (2.4) и (2.6)), т. е. от параметров  $\Gamma(t)$  РТС в соответствующий момент времени  $t = 0, \dots, T$ , а также от температуры эксплуатации РТД (см. уравнения (2.2) и (2.5)).

Математическая модель деградационных процессов ( $F_{\phi}$  — см. рис. 2.3) основана на том факте, что диффузия внутри РТС является процессом, который модифицирует физико-химические свойства РТС, а следовательно, изменяет условия токопереноса в РТД (изменяет форму ВАХ РТД) и, таким образом, влияет на изменение выходных электрических параметров См РТД СВЧ. Надежность РТД на основе GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As определяется скоростью диффузии Al в прилегающие слои, а математическая модель деградационных процессов, протекающих в РТС, может быть построена на основе уравнения диффузии Фика (модель одномерной диффузии Al поперек слоев РТС реализована в программном пакете DiRL).

Для формирования функции  $F_{\text{вых}}$  отображения пространства параметров См РТД СВЧ во множество  $Y = Y(t)$  его эксплуатационных характеристик в фиксированный момент времени (см. рис. 2.4) может быть использован программный пакет Microwave Office AWR Design Environment.

Программа Microwave Office AWR Design Environment позволяет выполнять анализ линейных и нелинейных, пассивных и активных схем, проектировать топологии планарных СВЧ-устройств, синтезировать фильтры на сосредоточенных элементах и микрополосковых линиях и т. д. Оригинальная особенность программы заключается в возможности настройки и оптимизации параметров в режиме реального времени. Это позволяет наблюдать поведение устройства в зависимости от параметров топологии платы и параметров активного элемента (диода или транзистора).

Для задания ВАХ РТД в программной среде Microwave Office AWR Design Environment можно использовать элемент Nonlinear Resistor (нелинейный резистор), для которого возможно задать ВАХ РТД в аналитическом виде:

$$I(U) = A_0 + A_1U + A_2U^2 + \dots + A_iU^i + \dots + A_NU^N, \quad (2.11)$$

где  $A_0, A_1, A_2, \dots, A_N$  — постоянные.

Чтобы осуществить эту операцию, следует выполнить аппроксимацию сформированных функцией  $F_d$  ВАХ методом наименьших квадратов. Согласованность кривых ВАХ РТД и кривых, полученных в результате аппроксимации с точностью до  $\pm 10$  мкА (точность измерительного прибора для экспериментального опре-

деления ВАХ РТД), обеспечивается полиномом степени  $N = 15$ , поэтому для аппроксимации всех теоретических и экспериментальных ВАХ была использована именно эта степень полинома.

На основании изложенного выше можно сделать вывод, что формализация структурной схемы (см. рис. 2.1) в виде математической модели позволяет исследовать характер изменения показателей надежности См РТД СВЧ в зависимости от интенсивности протекания диффузионных процессов в РТС. Системно модель объединяет три расчетных модуля. Модуль 1 предназначен для расчета изменения характеристик РТС в зависимости от времени и температуры эксплуатации изделия в результате протекания диффузионных процессов; модуль 2 — для моделирования ВАХ РТД, имеющих в своем составе полупроводниковые гетероструктуры с различным составом слоев (GaAs, AlGaAs и др.); модуль 3 — для оценивания изменения электрических параметров См РТД СВЧ в зависимости от дрейфа ВАХ РТД.

Математическая модель деградационных процессов, протекающих в РТС ( $F_\phi$  — см. рис. 2.3), реализована в программном пакете DiRL, для расчета ВАХ РТД ( $F_{\text{МЛЭ}}$  — см. рис. 2.2;  $F_d$  — см. рис. 2.3) можно использовать программный продукт VARMA, для расчета выходных электрических параметров См РТД СВЧ с учетом технологических погрешностей ( $F_{\text{вых}}$  — см. рис. 2.4) — Microwave Office AWR Design Environment.

Таким образом, с одной стороны, пространство возможных параметров наноразмерных гетероструктур определяется технологическим процессом (функцией  $F_{\text{МЛЭ}}$  учета наследственных признаков, построенной на базе предыстории формирования наноразмерных гетероструктур) и требованиями к выходным параметрам радиоэлектронных устройств на основе наноприборов, в частности См РТД СВЧ (так как они, в свою очередь, определяются ВАХ наноприбора (РТД), т. е. функцией  $F_{\text{вых}}$ , а она — параметрами гетероструктуры (функцией  $F_\phi$ )). С другой стороны, надежность радиоэлектронных устройств на основе наноприборов определяется деградационными процессами в наноприборе, т. е. дрейфом его ВАХ и изменениями во времени параметров  $\Gamma(t)$  (скорость изменения  $Y$  определена функцией  $F_\phi$ ). Вследствие этого представляется возможным ожидать, что существуют такие параметры наноразмерных гетероструктур  $\Gamma \in \Phi$ , которые обеспечат максимальную (или заданную) надежность устройства.

Тогда для технологической оптимизации радиоэлектронного устройства на основе наноприборов (в том числе См РТД СВЧ) с целью обеспечения его надежности необходимо осуществлять поиск таких параметров наноразмерных гетероструктур  $\Gamma_{ka} \in \Gamma, ka = 1, 2, \dots, ka_{\max}$ , которые определяют «наилучшую» с точки зрения надежности динамику изменения выходных параметров  $Y(t)$  устройства в процессе его эксплуатации.

**2.2. Влияние изменения в процессе деградации параметров резонансно-туннельной структуры на электрические характеристики смесителей радиосигналов СВЧ-диапазона на основе резонансно-туннельных диодов**

Для конкретизации полученных в разд. 2.1 выводов в соответствии с представленной математической моделью проведем численное моделирование, чтобы выявить параметры РТС, наиболее сильно влияющие на выходные характеристики См РТД СВЧ с учетом старения РТС (т. е. дрейфа ВАХ РТД и, как следствие, выходных характеристик См РТД СВЧ). Для этого исследуем чувствительность основных выходных характеристик (потерь преобразования  $L$  и коэффициента 1 дБ-компрессии  $K_{1дБ}$ ) балансного См РТД СВЧ к изменению параметров гетероструктуры (толщины и высоты барьеров, ширины ямы). Электрическая принципиальная схема рассматриваемого См РТД СВЧ реализована в программном пакете Microwave Office AVR Design Environment и имеет следующие параметры:  $f_c = 11,05$  ГГц;  $P_c = -20$  дБм;  $f_r = 11,4$  ГГц;  $f_{пч} = 350$  МГц.

Смеситель реализован на РТД с симметричной двухбарьерной РТС GaAs — AlAs, условно названной структурой «А», параметры которой вместе с параметрами РТД (далее — РТД «А») приведены в табл. 2. 1. Основные параметры первого пика прозрачности РТС «А» для нулевого напряжения приведены на рис. 2.8.

ВАХ рассматриваемого балансного См РТД СВЧ в начальный момент времени ( $t = 0$ ) представлена на рис. 2.9. Значения коэффициентов аппроксимирующей кривой  $I(U)$  (полинома пятой степени, рассматриваемого для удобства анализа ВАХ) РТД «А» для диапазона значений напряжения  $U = 0 \dots 0,78$  В приведены ниже:

$$\begin{array}{lll} A_0 \dots\dots\dots 0 & A_2 \dots\dots\dots 0 & A_4 \dots\dots\dots 0 \\ A_1 \dots\dots\dots 1,852 \cdot 10^{-3} & A_3 \dots\dots\dots 0,021 & A_5 \dots\dots\dots -6,958 \cdot 10^{-3} \end{array}$$

Таблица 2.1

Основные исходные параметры РТД «А» ( $t = 0$ )

Структура	Состав	Тип проводимости	Легирование	Концентрация, см <sup>-3</sup>	Толщина, Å
Подложка	GaAs	<i>SI</i>	—	—	450 мкм
Буферный слой	GaAs	<i>i</i>	<i>ud</i>	—	0,2 мкм
Буферный слой	GaAs	$n^+$	<i>Si</i>	$(4...5) \cdot 10^{18}$	1,5 мкм
—	GaAs	<i>n</i>	<i>Si</i>	$2 \cdot 10^{17}$	500
Переходный слой	GaAs	<i>n</i>	<i>Si</i>	$7 \cdot 10^{16}$	500
Спейсер	GaAs	<i>i</i>	<i>ud</i>	—	63
РТС	AlAs	<i>i</i>	<i>ud</i>	—	29 (5 <sup>*</sup> )
	GaAs	<i>i</i>	<i>ud</i>	—	49 (9 <sup>**</sup> )
	AlAs	<i>i</i>	<i>ud</i>	—	29
Спейсер	GaAs	<i>i</i>	<i>ud</i>	—	63
Переходный слой	GaAs	<i>n</i>	<i>Si</i>	$7 \cdot 10^{16}$	500
—	GaAs	<i>n</i>	<i>Si</i>	$2 \cdot 10^{17}$	500
Контактный слой	GaAs	$n^+$	<i>Si</i>	$4 \cdot 10^{18}$	500
Контактный слой	Grad <i>n</i> GaAs 0,05 → 0,5	$n^+$	<i>Si</i>	$(4...5) \cdot 10^{18}$	500
Контактный слой	In <sub>0,5</sub> Ga <sub>0,5</sub> As	$n^+$	<i>Si</i>	$5 \cdot 10^{18}$	200
* Количество монослоев AlAs.					
** Количество монослоев GaAs.					

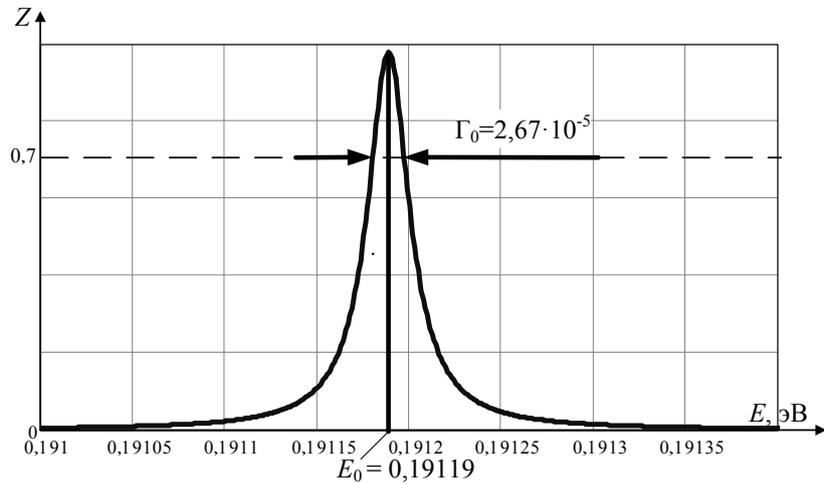


Рис. 2.8. Основные параметры первого пика прозрачности РТС «А» ( $U = 0$ )

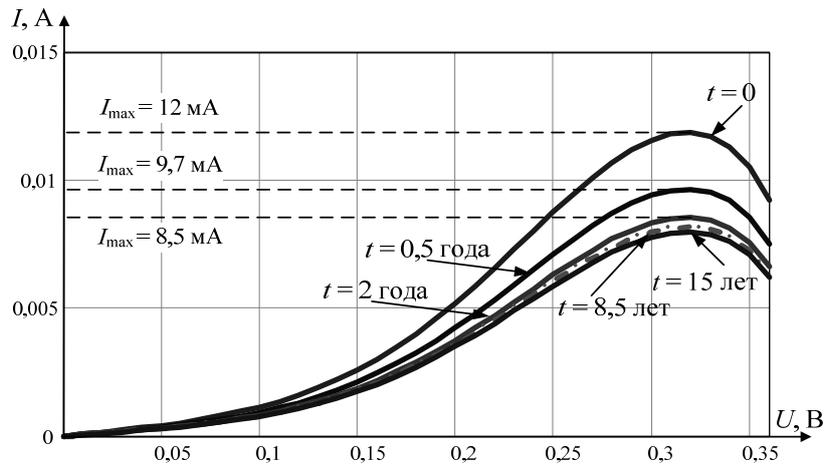
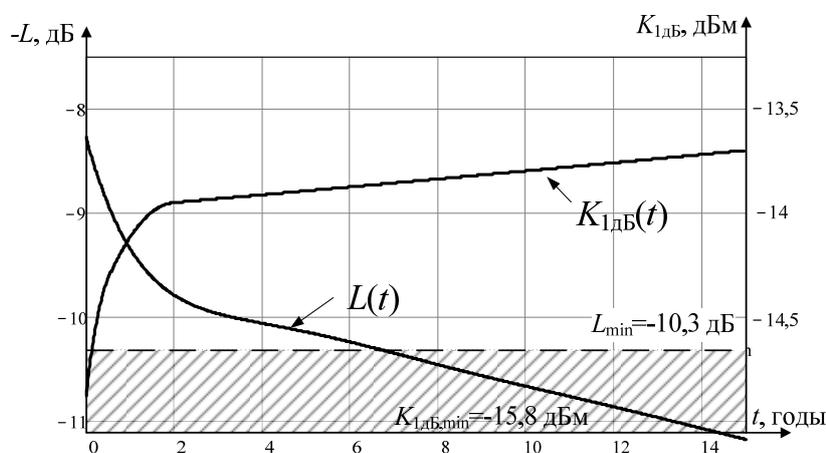


Рис. 2.9. Изменение во времени ВАХ РТС на основе РТС «А», обусловленное диффузией Al в прилегающие слои

Коэффициенты аппроксимирующей кривой ВАХ РТД «А» (полинома 15-й степени) задаются параметрами элемента Nonlinear Resistor в электрической схеме См РТД СВЧ. Потери преобразования  $L$  и коэффициент 1 дБ-компрессии  $K_{1\text{дБ}}$  рассматриваемого См РТД СВЧ в начальный момент времени составили соответственно 8,3 дБ и  $-14,8$  дБм.

Деградация РТС (диффузия Al из барьерных слоев структуры «А» в соседние слои) определяет дрейф ВАХ во времени (см. рис. 2.9).

Результаты моделирования изменения потерь преобразования  $L(t)$  и коэффициента 1 дБ-компрессии  $K_{1дБ}(t)$  в процессе деградации РТС (диффузия Al из барьерных слоев РТС «А» в соседние слои) приведены на рис. 2.10. Согласно этому рисунку надежность См РТД СВЧ определяется изменениями потерь преобразования в процессе деградации РТС.



**Рис. 2.10.** «Старение» См РТД СВЧ, реализованного на РТС «А», по потерям преобразования  $L(t)$  и коэффициенту 1 дБ-компрессии  $K_{1дБ}(t)$

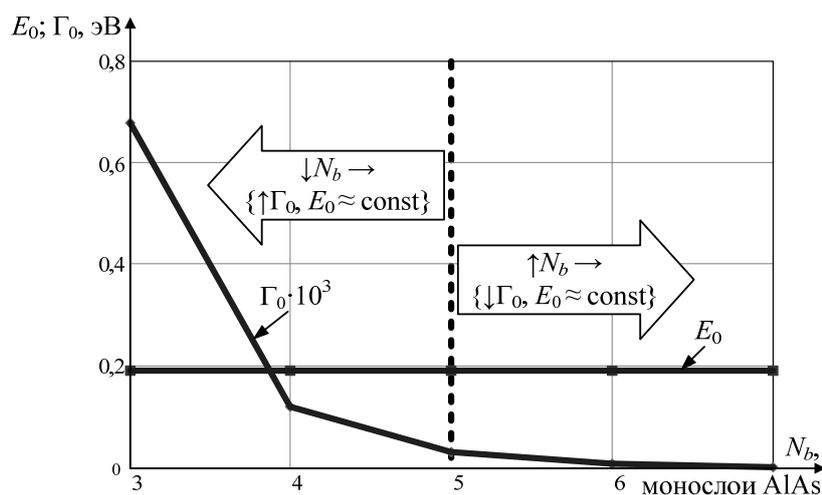
Проведем исследование чувствительности выходных электрических параметров (потерь преобразования и коэффициента 1 дБ-компрессии) См РТД СВЧ к параметрам РТС в процессе ее деградации. Поскольку в процессе деградации РТС происходит «приближение» ВАХ РТД к оси напряжений, то с точки зрения надежности нас будут интересовать все возможные варианты управления параметрами РТС, позволяющие увеличить крутизну ВАХ.

Структуры, отличающиеся от РТС «А» одним из параметров, обозначим «modA-[\*]», где в квадратных скобках будем указывать собственно тот параметр, который отличает модифицированную РТС от РТС «А», а именно:  $N_b$  — толщина симметричных слоев  $Al_xGa_{1-x}As$  (так называемых барьеров) РТС;  $V_b$  — высота барьеров симметричной РТС (разность в уровнях зоны проводимости GaAs и

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ );  $N_w$  — толщина наноразмерного нелегированного слоя GaAs, образующего потенциальную яму на профиле потенциальной энергии РТС вследствие разности в уровнях зоны проводимости GaAs и  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ .

### 2.2.1. Исследование чувствительности электрических параметров балансного См РТД СВЧ к ширине $N_b$ барьеров РТС

Зависимость положения первого пика прозрачности при энергии  $E_0$  и ширине  $\Gamma_0$  первого резонансного пика от ширины симметричных барьеров при их высоте  $V_b = 1$  эВ приведена на рис. 2.11.

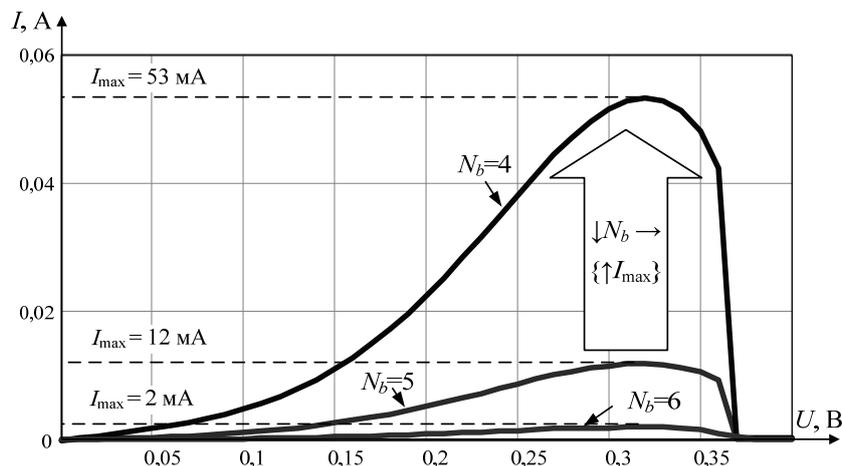


**Рис. 2.11.** Влияние ширины  $N_b$  симметричных барьеров РТД «modA- $[N_b]$ » на характеристики  $Z(E)$  при наименьшей энергии  $E_0$  резонанса

При уменьшении ширины  $N_b$  симметричных барьеров слоистой наноструктуры «modA- $[N_b]$ » от пяти до трех нанослоев AlAs энергия  $E_0$  резонанса остается примерно постоянной ( $E_0 \approx 0,19$  эВ), ширина  $\Gamma_0$  первого резонансного пика увеличивается на порядок (с  $3,0 \cdot 10^{-5}$  до  $6,8 \cdot 10^{-4}$  эВ). Ширина  $\Gamma_0$  пропорциональна вероятности ухода электронов из ямы, поэтому  $\Gamma_0$  увеличивается с уменьшением ширины барьеров; амплитуда  $f$  резонанса для симмет-

ричной структуры равна единице. Указанная динамика позволяет ожидать увеличение пиковых значений тока перед первым падающим участком ВАХ РТС «modA-[ $N_b$ ]». При увеличении ширины  $N_b$  симметричных барьеров от пяти до семи нанослоев AIs наблюдаются противоположные изменения характеристик первого резонансного пика и пиковых значений тока перед первым падающим участком ВАХ РТС «modA-[ $N_b$ ]».

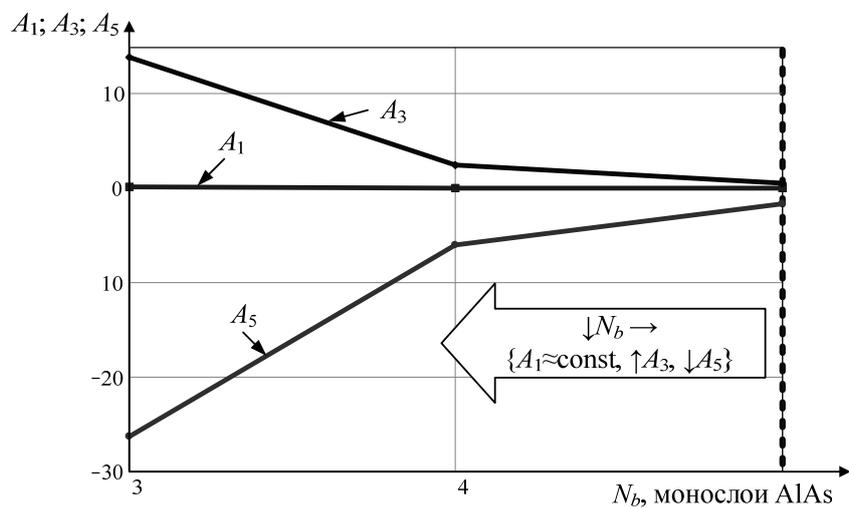
Для анализа влияния изменения ширины  $N_b$  симметричных барьеров на ВАХ рассматриваемой РТС «А» при прочих неизменных параметрах следует выполнить моделирование структуры с различной шириной симметричных барьеров (например, от трех до семи монослоев AIs (рис. 2.12)).



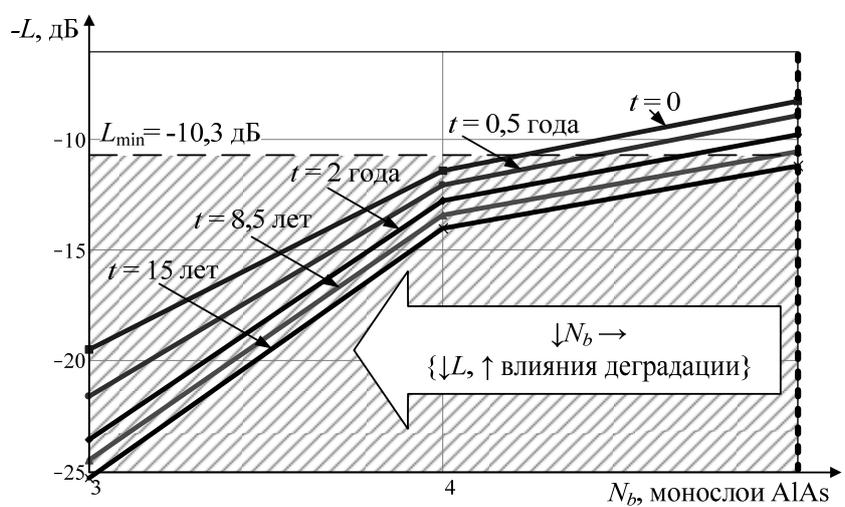
**Рис. 2.12.** Влияние изменения ширины  $N_b$  барьеров РТД «modA-[ $N_b$ ]» на ее ВАХ

Динамика изменения коэффициентов аппроксимирующих полиномов пятой степени и потерь преобразования с уменьшением ширины барьеров на один и два монослоя AIs приведена на рис. 2.13.

На рис. 2.14 видно, что при уменьшении ширины  $N_b$  барьеров слоистой РТС «modA-[ $N_b$ ]» потери преобразования  $L$  балансного См РТД СВЧ увеличиваются, несмотря на то что коэффициент при третьей степени аппроксимирующего полинома увеличивается.



**Рис. 2.13.** Влияние изменения ширины  $N_b$  барьеров РТС «modA- $[N_b]$ » на коэффициенты аппроксимированных ВАХ РТД



**Рис. 2.14.** Влияние изменения ширины  $N_b$  барьеров РТС «modA- $[N_b]$ » на потери преобразования балансного СМ РТД СВЧ

Числовые значения коэффициента чувствительности  $S_L$  (%) потерь преобразования к уменьшению ширины  $N_b$  барьеров РТС на один монослой приведены ниже:

Наработка.....	0	0,5 года	2 года	8,5 лет	15 лет
$S_L$ .....	-189,0	-174,6	-151,7	-137,8	-127,3

Коэффициент чувствительности  $S_L$  потерь преобразования балансного См РТД СВЧ к ширине барьеров симметричной слоистой РТС  $N_b$  рассчитаем по формуле

$$S_L = \frac{L_{new} - L_{исх}}{N_{b,new} - N_{b,исх}} \frac{N_{b,исх}}{L_{исх}}, \quad (2.12)$$

где  $L_{new}$  и  $L_{исх}$  — потери преобразования См РТД СВЧ на базе РТС «modA-[ $N_b - 1$ ]] и «А» соответственно.

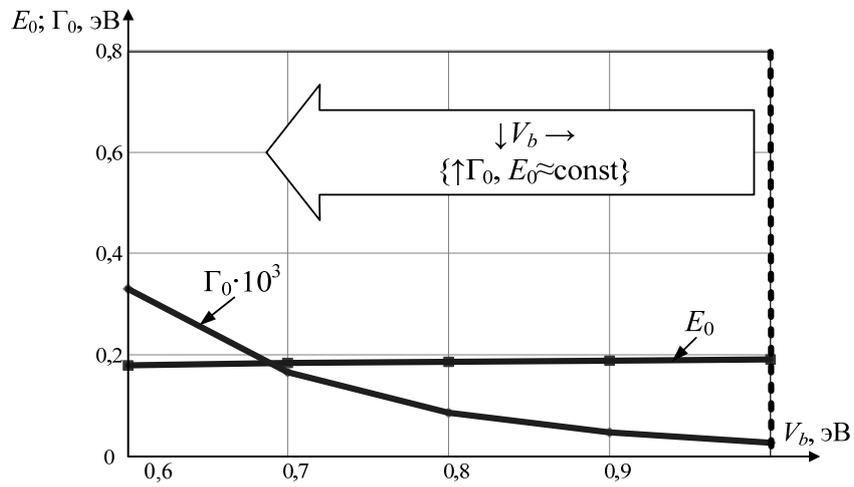
Таким образом, благоприятное с точки зрения деградации, как могло бы показаться на первый взгляд, изменение ВАХ РТД с уменьшением ширины барьеров симметричной структуры «А» (повышение значений максимальных токов перед падающим участком) сопровождается сильным ухудшением потерь преобразования.

### **2.2.2. Исследование чувствительности электрических параметров балансного См РТД СВЧ к высоте $V_b$ барьеров РТС**

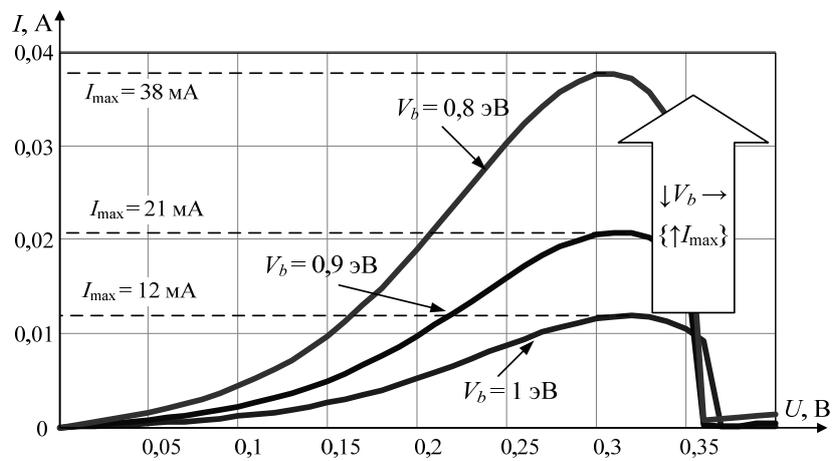
Влияние изменения высоты  $V_b$  симметричных барьеров слоистой наноструктуры «modA-[ $V_b$ ]]» на энергию  $E_0$  резонанса и на ширину первого пика  $\Gamma_0$  проиллюстрировано на рис. 2.15.

Для анализа влияния изменения высоты  $V_b$  симметричных барьеров на ВАХ рассматриваемой РТС «А» при прочих неизменных параметрах ( $E_f = 0,077$  эВ;  $N_w = 9$  монослоев GaAs;  $N_{b1} = N_{b2} = 5$  монослоев AlAs,  $S = 900$  мкм<sup>2</sup>) следует выполнить моделирование РТС с различной высотой симметричных барьеров, например  $V_b = 1 \dots 0,6$  эВ (рис. 2.16).

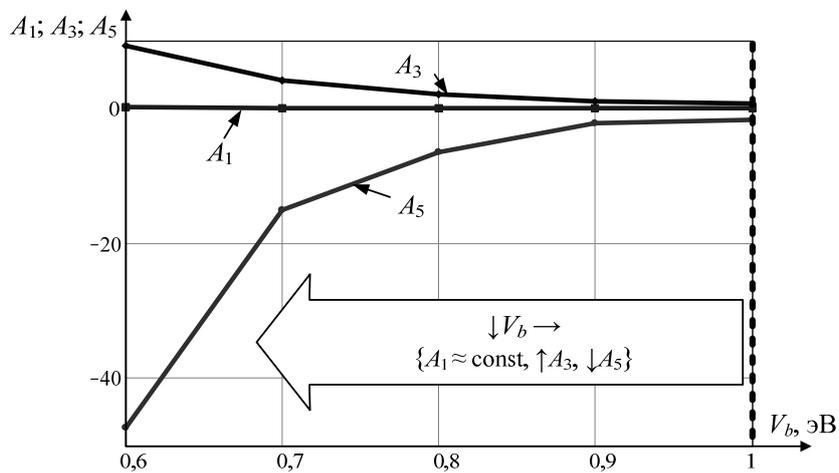
Аппроксимация ВАХ  $I(U)$  слоистых наноструктур полиномом пятой степени дает результаты, приведенные на рис. 2.17 и 2.18.



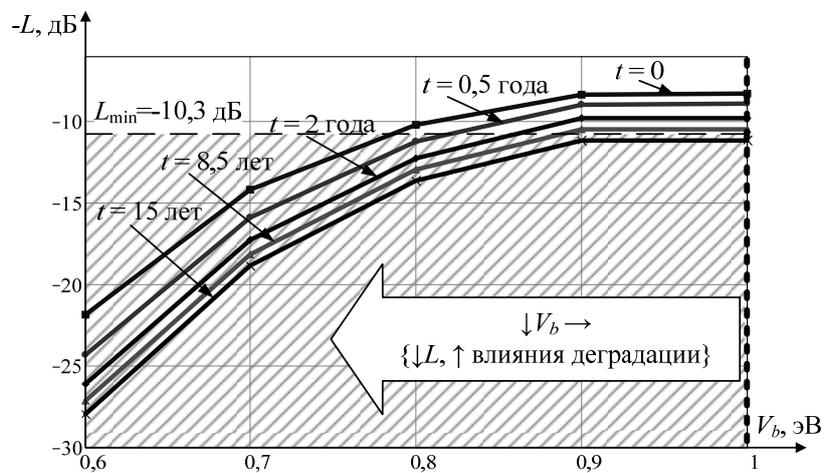
**Рис. 2.15.** Влияние изменения высоты  $V_b$  барьеров РТС «modA- $[V_b]$ » на первый пик прозрачности при наименьшей энергии  $E_0$  резонанса



**Рис. 2.16.** Влияние изменения высоты  $V_b$  симметричных барьеров структуры «modA- $[V_b]$ » на ВАХ



**Рис. 2.17.** Влияние изменения высоты  $V_b$  барьеров РТД «modA- $[V_b]$ » на коэффициенты аппроксимированных ВАХ



**Рис. 2.18.** Влияние изменения высоты  $V_b$  барьеров РТД «modA- $[V_b]$ » на потери преобразования балансного См РТД СВЧ

Коэффициент чувствительности  $S_L$  потерь преобразования балансного См РТД СВЧ к высоте барьеров  $V_b$  РТС рассчитаем по формуле

$$S_L = \frac{L_{new} - L_{исх}}{V_{b,new} - V_{b,исх}} \frac{V_{b,исх}}{L_{исх}}, \quad (2.13)$$

где  $L_{new}$  и  $L_{исх}$  ( $V_{b,new}$  и  $V_{b,исх}$ ) — потери преобразования См РТД СВЧ (высоты потенциальных барьеров РТС) на базе РТС «modA-[ $V_b - 1$ ]» и «А» соответственно.

Числовые значения коэффициента чувствительности  $S_L$  (%) потерь преобразования к уменьшению высоты барьеров  $V_b$  РТС на 0,1 эВ приведены ниже:

Наработка....	0	0,5 года	2 года	8,5 лет	15 лет
$S_L$ .....	-13,5	-10,7	0,8	-0,7	-0,4

Таким образом, как и в случае уменьшения ширины барьеров, уменьшение их высоты (соответствующее повышению значений максимальных токов перед падающим участком ВАХ) сопровождается сильным ухудшением потерь преобразования.

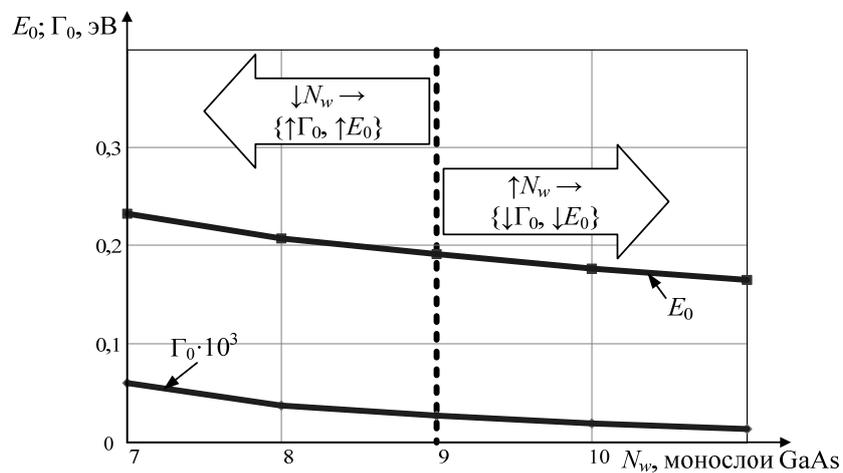
### **2.2.3. Исследование чувствительности электрических параметров балансного См РТД СВЧ к ширине ямы $N_w$ РТС**

Энергия  $E_0$  резонанса пропорциональна квадрату импульса электрона в яме, а он, в свою очередь, пропорционален волновому числу электрона  $k = 2\pi/N_w$ , т. е. пространственной частоте колебаний электрона в яме шириной  $N_w$ . Поэтому с увеличением ширины ямы уменьшается волновое число, а вместе с ним уменьшается и энергия (квадратично по ширине ямы).

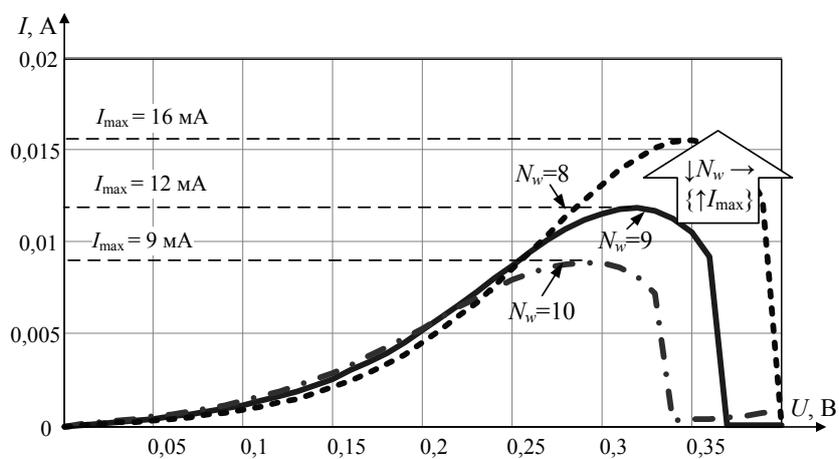
Влияние ширины ямы  $N_w$  РТС «modA-[ $N_w$ ]» на энергию  $E_0$  резонанса и его ширину  $\Gamma_0$  наглядно представлено на рис. 2.19.

Пример результатов анализа влияния изменения ширины ямы на ВАХ рассматриваемой РТС «А» при прочих неизменных параметрах ( $E_f = 0,077$  эВ;  $V = 0,9$  эВ;  $N_{b1} = N_{b2} = 5$  монослоев AlAs,  $S = 900$  мкм<sup>2</sup>) приведен на рис. 2.20.

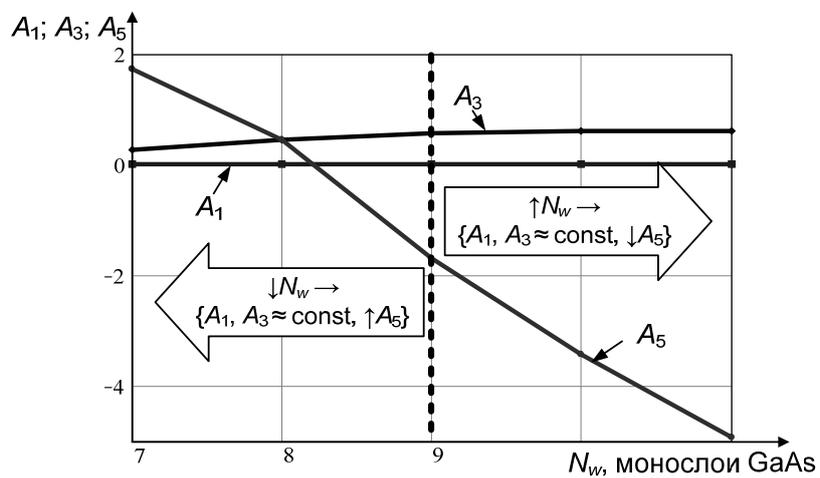
Аппроксимация ВАХ РТД «modA-[ $N_w$ ]» полиномом пятой степени дает результаты, приведенные на рис. 2.21 и 2.22.



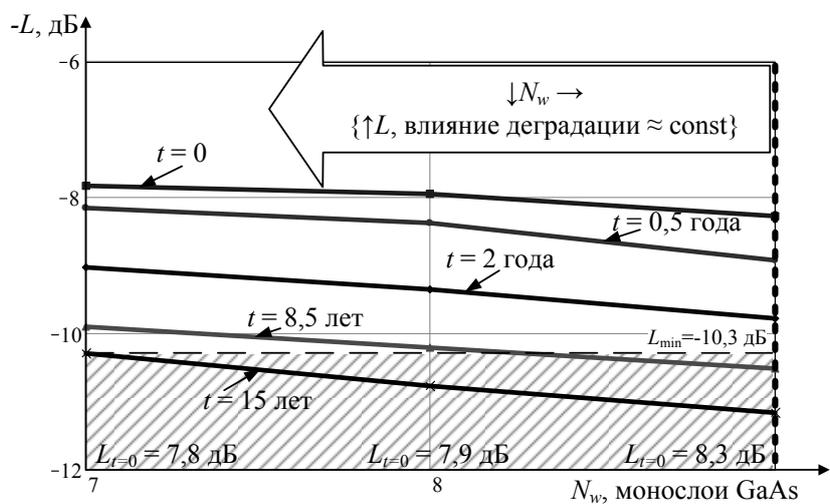
**Рис. 2.19.** Влияние изменения ширины ямы  $N_w$  ПТС «modA- $[N_w]$ » на первый пик прозрачности при наименьшей энергии  $E_0$  резонанса



**Рис. 2.20.** Влияние изменения ширины ямы  $N_w$  ПТС «modA- $[N_w]$ » на ВАХ



**Рис. 2.21.** Влияние изменения ширины ямы  $N_w$  РТД «modA-[ $N_w$ ]» на коэффициенты аппроксимированных ВАХ



**Рис. 2.22.** Влияние изменения ширины ямы  $N_w$  на потери преобразования балансного смесителя на основе РТД «modA-[ $N_w$ ]»

Коэффициент чувствительности  $S_L$  потерь преобразования балансного См РТД СВЧ к ширине ямы  $N_w$  РТС рассчитывают по формуле

$$S_L = \frac{L_{new} - L_{исх}}{N_{w,new} - N_{w,исх}} \frac{N_{w,исх}}{L_{исх}}, \quad (2.14)$$

где  $L_{new}$  и  $L_{исх}$  ( $N_{w,new}$  и  $N_{w,исх}$ ) — потери преобразования См РТД СВЧ (ширина ям РТС) на базе РТС «modA-[ $N_w - 1$ ]» и «А» соответственно.

Коэффициент чувствительности коэффициента 1 дБ-компрессии  $K_{1дБ}$  балансного См РТД СВЧ к ширине ямы  $N_w$  РТС можно рассчитать по формуле

$$S_{K_{1дБ}} = \frac{K_{1дБ, new} - K_{1дБ, исх}}{N_{w,new} - N_{w,исх}} \frac{N_{w,исх}}{K_{1дБ, исх}}, \quad (2.15)$$

где  $K_{1дБ, new}$  и  $K_{1дБ, исх}$  — коэффициенты 1 дБ-компрессии См РТД СВЧ на базе РТС «modA-[ $N_w - 1$ ]» и РТС «А» соответственно.

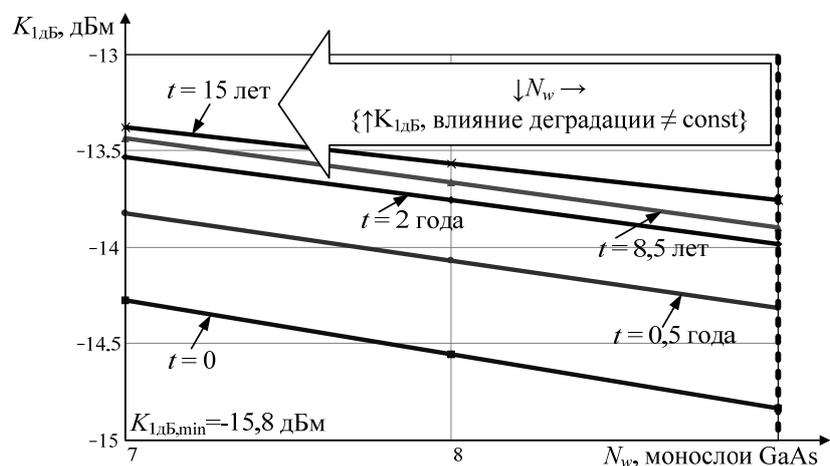
Числовые значения коэффициентов чувствительности  $S_L$  (%) потерь преобразования и коэффициента 1 дБ-компрессии  $S_{K_{1дБ}}$  к уменьшению толщины ямы  $N_w$  РТС на один монослой GaAs приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

**Значения коэффициентов  $S_L$  и  $S_{K_{1дБ}}$  в зависимости от наработки до отказа**

Коэффициент	Наработка				
	0	0,5 года	2 года	8,5 лет	15 лет
$S_L$	35,4	54,2	39,6	26,1	31,6
$S_{K_{1дБ}}$	16,9	15,5	14,5	14,9	12,3

Таким образом, численное моделирование балансного См РТД СВЧ позволило сделать следующий важный вывод: уменьшение номинальной ширины барьеров и их высоты влечет за собой значительное ухудшение балансного См РТД СВЧ по номинальным потерям преобразования и увеличению скорости деградации Al из барьеров в прилегающие слои РТС (см. рис. 2.14 и 2.18). Уменьшение номинальной ширины ямы при прочих неизменных параметрах рас-



**Рис. 2.23.** Влияние изменения ширины ямы  $N_w$  на коэффициент 1дБ-компрессии балансного смесителя на основе РТД «modA- $[N_w]$ »

смотренной РТС сопровождается улучшением номинальных значений потерь преобразования, сохранением скорости деградации РТС и расширением динамического диапазона по коэффициенту 1 дБ-компрессии (рис. 2.22 и 2.23). Таким образом, коэффициент чувствительности потерь преобразования и коэффициент 1 дБ-компрессии к уменьшению ширины ямы РТС максимальны на протяжении всей рассматриваемой наработки (15 лет). Это позволило выбрать ширину ямы двухбарьерной симметричной РТС GaAs —  $Al_xGa_{1-x}As$  в качестве управляемого параметра при конструкторско-технологической оптимизации См РТД СВЧ.

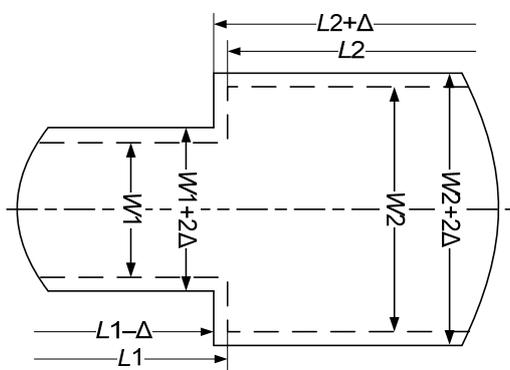
### 2.3. Анализ влияния технологических погрешностей на выходные электрические параметры радиоэлектронных устройств на основе наноприборов

Для исследования влияния технологических погрешностей на электрические параметры радиоэлектронных устройств на основе наноприборов необходимо учесть корреляционные связи между различными параметрами топологии. При рассмотрении См РТД СВЧ можно выделить следующие группы технологических погрешностей, влияющих на электрические параметры См РТД СВЧ: 1) погрешно-

сти направленного ответвителя Ланге; 2) погрешности микрополосков; 3) погрешности подложки; 4) погрешности диодов.

Для этих четырех групп погрешностей реально могут быть определены лишь связи между погрешностями микрополосков и направленного ответвителя Ланге.

На рис. 2.24 показано образование корреляционных связей между шириной и длиной микрополосков на примере «ступеньки» трансформатора.



**Рис. 2.24.** Корреляционные связи параметров микрополосков на примере «ступеньки» трансформатора

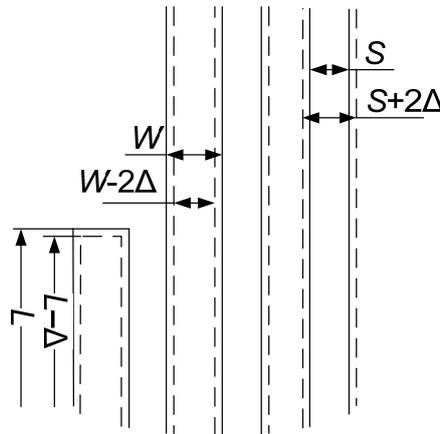
Поскольку рассматриваются погрешности процесса фотолитографии, то при изменении ширины  $W1$  на некую величину  $2\Delta$  длина  $L1$  изменяется на величину  $\Delta$ , но с противоположным знаком, т. е. коэффициент корреляционной связи между величинами  $W1$  и  $L1$  должен быть принят равным единице. В то же время при изменении на величину  $\Delta$  длины  $L1$  связанная с ней длина  $L2$  изменится на ту же величину  $\Delta$ , но с противоположным знаком, т. е. коэффициент корреляционной связи между длинами  $L1$  и  $L2$  можно принять равным  $-1$ .

Таким образом, при технологической погрешности параметров металлизации, равной  $\Delta = \pm 0,01$  мм, принимая, что для «ступеньки» трансформатора справедлив нормальный закон рассеивания длины  $L2$  с математическим ожиданием (МО)  $MO_{L2}$  и средним квадратичным отклонением (СКО)  $\sigma_{L2} = \Delta/3$ , можно считать справедливыми следующие зависимости учета корреляционных связей:

$$\begin{aligned}
 L1 &= -1 \cdot L2 + (MO_{L2} + MO_{L1}); \\
 W1 &= 2 \cdot L2 + (-2 \cdot MO_{L2} + MO_{W1}); \\
 W2 &= 2 \cdot L2 + (-2 \cdot MO_{L2} + MO_{W2}).
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

Для ответвителя Ланге важны не только длина  $L$  и ширина  $S$  микрополосков, но и ширина  $W$  зазоров между ними (рис. 2.25). Например, необходимо учитывать, что параметры  $S$  и  $W$  связаны коэффициентом корреляции, равным  $-1$ , т. е. для ответвителя Ланге будут справедливы следующие зависимости, позволяющие учесть корреляционные связи:

$$\begin{aligned}
 L &= 1 \cdot L2 + (-MO_{L2} + MO_L); \\
 W &= 2 \cdot L2 + (-2 \cdot MO_{L2} + MO_W); \\
 S &= -1 \cdot L2 + (MO_{L2} + MO_S).
 \end{aligned}
 \tag{2.17}$$

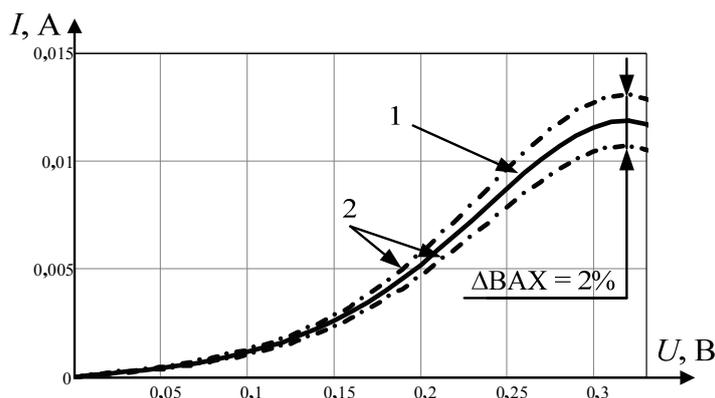


**Рис. 2.25.** Корреляционные связи параметров микрополосков (погрешности процесса фотолитографии) на примере ответвителя Ланге

Соотношения различных параметров в программном пакете Microwave Office AWR Design Environment можно задать с помощью инструмента создания переменных и формул. В разделе Global Definitions проекта можно задавать формулы, моделирующие связь параметров СМ РТД СВЧ. Параметры подложки, емкости, индуктивности

диодов изменяются независимо, корреляционные связи параметров металлизации задаются согласно формулам (2.16), (2.17).

При численном моделировании, например, можно применять следующие значения технологических погрешностей параметров, изменяющихся независимо: толщина подложки ( $\Delta H$ )  $\pm 0,05$  мм; диэлектрическая проницаемость подложки ( $\Delta \epsilon_r$ )  $\pm 0,2$  мм; емкость и индуктивность  $\pm 20\%$  от номинального значения. Ширина поля разброса ВАХ РТД ( $\Delta \text{ВАХ}$ ) может быть определена методом Монте-Карло на основе данных о технологических погрешностях параметров РТС:  $\Delta N_{b1} = \Delta N_{b2} = \pm 1$  монослой  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ;  $\Delta V_{b1} = \Delta V_{b2} = \pm 0,1$  эВ, т. е.  $x_{\text{Al}} = \pm 0,1$  эВ;  $\Delta N_w = \pm 1$  монослой  $\text{GaAs}$ ;  $\Delta E_{f1} = \Delta E_{f2} = \pm 0,01$  эВ (в предположении, что закон распределения этих параметров нормальный) с использованием математической модели формирования функции  $F_d$  (рассмотренной в разд. 2.1) (рис. 2.26).



**Рис. 2.26.** Технологическая погрешность ВАХ РТД ( $\Delta \text{ВАХ}$ ):

1 — ВАХ без учета технологических погрешностей; 2 — границы разброса ВАХ с учетом технологических погрешностей

В программном пакете Microwave Office AWR Design Environment отсутствуют средства для построения гистограмм распределения выходных электрических параметров устройств, поэтому для получения гистограмм можно использовать встроенный в программу модуль, предназначенный для определения вероятности выхода годных изделий методом Монте-Карло. Предполагаемый диапазон значений параметров См РТД СВЧ разбивают на интер-

валы. Поочередно задавая с целью вероятностного анализа границы нового интервала, определяют вероятность попадания интересующего нас параметра в заданные границы.

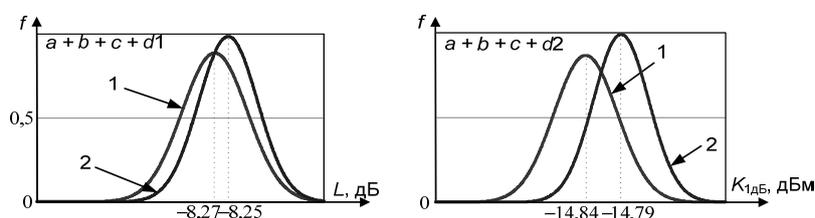
Таким способом может быть определена ширина поля рассеивания (в процентах) потерь преобразования  $L$  и коэффициента  $K_{1дБ}$  при наличии (табл. 2.3): только погрешностей металлизации ( $a$ ); погрешностей подложки ( $b$ ); погрешностей емкостей и индуктивностей ( $c$ ); погрешностей изготовления РТД при условии, что диоды подобраны в пару ( $d1$ ); погрешностей РТС при условии, что диоды подобраны не в пару ( $d2$ ). Также для определения совокупного влияния на электрические параметры  $S_m$  РТД СВЧ должны быть выполнены расчеты ширины их поля рассеивания при наличии: погрешностей металлизации и подложки ( $a + b$ ); погрешностей металлизации, подложки, емкостей и индуктивностей ( $a + b + c$ ); погрешностей металлизации, подложки, емкостей, индуктивностей и ВАХ РТД при условии, что диоды подобраны в пару ( $a + b + c + d1$ ); погрешностей металлизации, подложки, емкостей, индуктивностей и ВАХ РТД при условии, что диоды подобраны не в пару ( $a + b + c + d2$ ). Числовые значения этих полей рассеивания приведены в табл. 2.3 и на рис. 2.27.

Таблица 2.3

**Ширина поля рассеивания  $\Delta L$  и  $\Delta K_{1дБ}$  (%) величин  $L$  и  $K_{1дБ}$  при наличии технологических погрешностей**

Поле рассеивания	Погрешности								
	$a$	$b$	$c$	$d1$	$d2$	$a + b$	$a + b + c$	$a + b + c + d1$	$a + b + c + d2$
$\Delta L$	2,18	2,27	1,75	3,59	2,82	4,27	4,66	5,60	5,05
$\Delta K_{1дБ}$	1,28	2,29	1,96	4,08	3,35	3,88	4,01	6,21	5,79

Для проверки адекватности полученных результатов оценки влияния технологических погрешностей  $S_m$  РТД СВЧ на его электрические параметры необходимо провести проверочный расчет по формуле квадратичного суммирования погрешностей (сумма квадратов составляющих погрешностей должна быть равна квадрату общей погрешности — эта формула применима, так как между указанными параметрами нет корреляционных связей). Результаты расчета приведены в табл. 2.4.



**Рис. 2.27.** Влияние погрешности подбора диодов в пару на поле рассеивания значений потерь преобразования и коэффициента 1 дБ-компрессии:

1 — подобраны в пару; 2 — подобраны не в пару

Таблица 2.4

**Расчетные и моделируемые значения ширины полей рассеивания  $\Delta L$  и  $\Delta K_{1дБ}$  (%) величин  $L$  и  $K_{1дБ}$  при совместном влиянии технологических погрешностей**

Поля рассеивания	Погрешности			
	$a + b$	$a + b + c$	$a + b + c + d1$	$a + b + c + d2$
$\Delta L$	3,15* (4,27**)	3,60 (4,66)	5,08 (5,60)	4,57 (5,05)
$\Delta K_{1дБ}$	2,62 (3,88)	3,27 (4,01)	5,23 (6,21)	4,68 (5,79)

\* Расчетное значение.  
 \*\* Значение, получаемое при моделировании совместного влияния технологических погрешностей.

На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что подбор РТД в пару не оказывает значимого влияния на ширину поля рассеивания параметров См РТД СВЧ. Это можно объяснить возникновением взаимных компенсаций погрешностей различных типов. Из табл. 2.3 также следует, что наибольший вклад в поле рассеивания электрических параметров См РТД СВЧ вносят погрешности РТД.

Полученные при моделировании гистограммы разброса значений  $L$  и  $K_{1дБ}$  позволяют сделать вывод о том, что рассматриваемые выходные электрические параметры См РТД СВЧ (рис. 2.27—2.33) согласно критерию Пирсона подчиняются нормальному закону распределения (при уровне значимости не ниже  $\alpha = 0,01$ ).

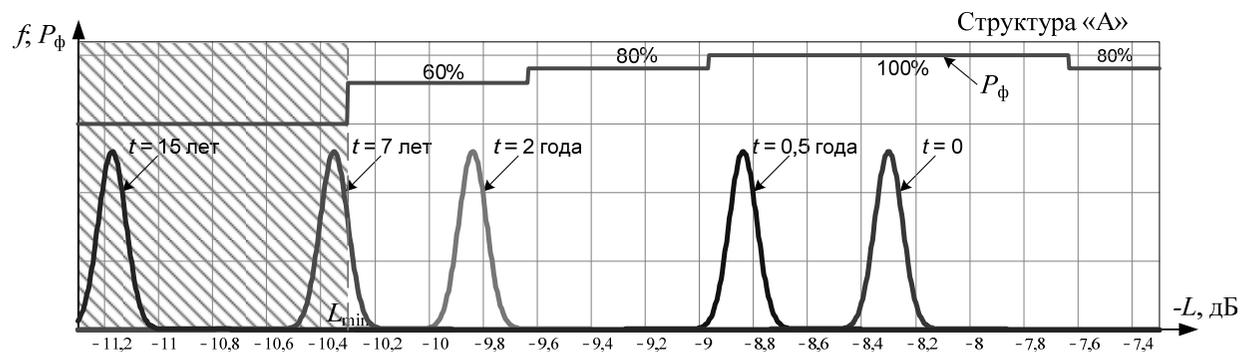


Рис. 2.28. Влияние деградации РТД на плотность распределения потерь преобразования  $f(L)$  См РТД СВЧ, реализованного на РТД «А»

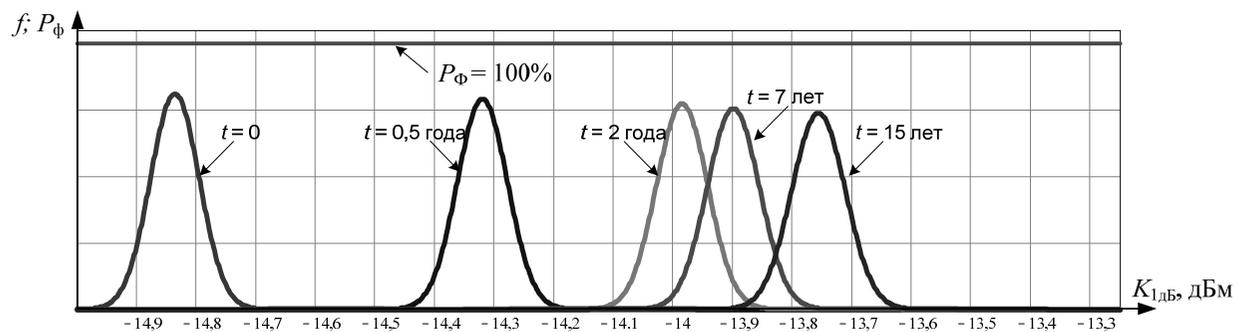
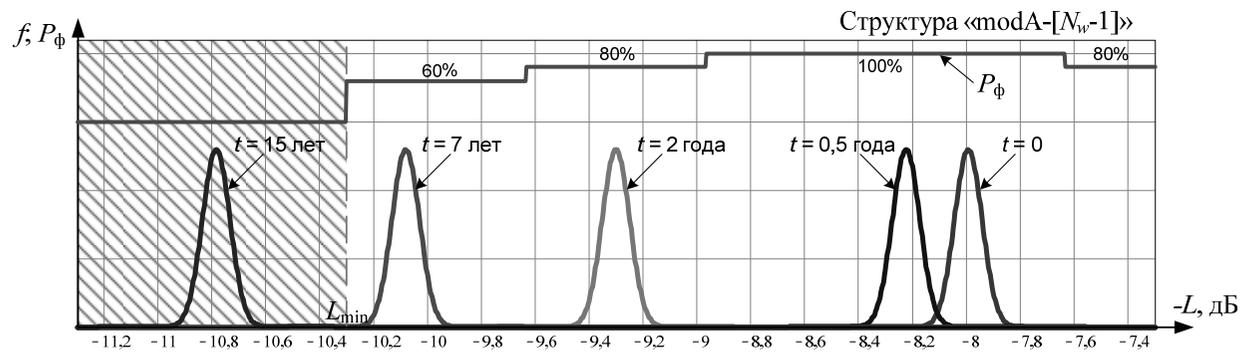
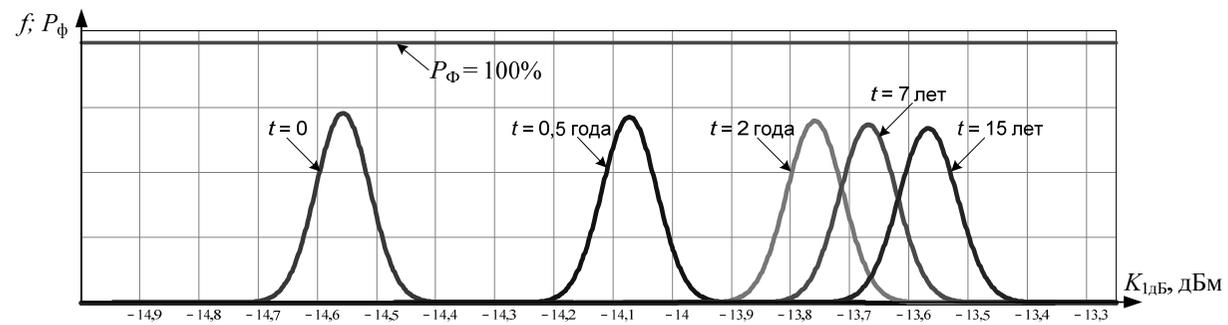


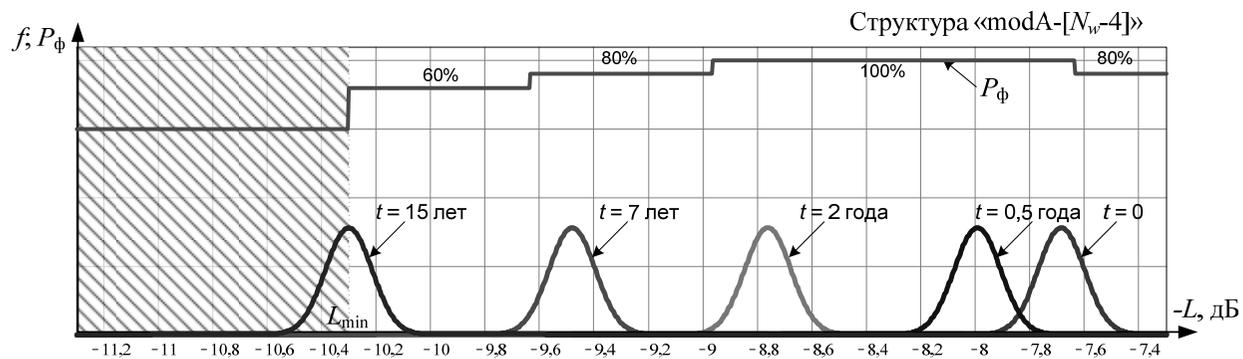
Рис. 2.29. Влияние деградации РТД на плотность распределения коэффициента 1 дБ-компрессии  $f(K_{1\text{дБ}})$  См РТД СВЧ, реализованного на РТД «А»



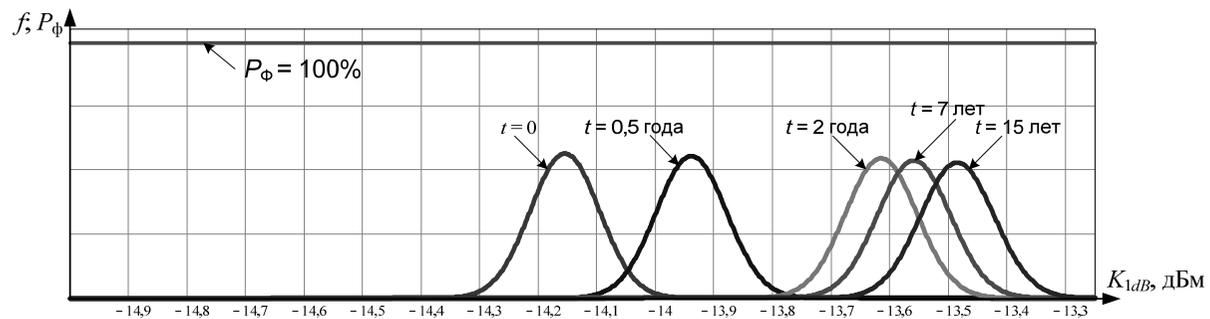
**Рис. 2.30.** Влияние деградации РТД на плотность распределения потерь преобразования  $f(L)$  См РТД СВЧ, реализованного на РТД «modA-[N<sub>w</sub>-1]»



**Рис. 2.31.** Влияние деградации РТД на плотность распределения коэффициента 1дБ-компрессии  $f(K_{1\text{дБ}})$  См РТД СВЧ, реализованного на РТД «modA-[N<sub>w</sub>-1]»



**Рис. 2.32.** Влияние деградации РТД на плотность распределения потерь преобразования  $f(L)$  См РТД СВЧ, реализованного на РТД «modA-[ $N_w-4$ ]»



**Рис. 2.33.** Влияние деградации РТД на плотность распределения коэффициента 1дБ-компрессии  $f(K_{1dB})$  См РТД СВЧ, реализованного на РТД «modA-[ $N_w-4$ ]»

Далее по этой же методике учета совместного влияния технологических погрешностей См РТД СВЧ следует провести исследование влияния ширины ямы симметричной двухбарьерной РТС на выходные параметры балансного См РТВ СВЧ в процессе деградации. Анализ полученных результатов (см. рис. 2.28—2.33) показал, что закон распределения потерь преобразования и значений коэффициента 1 дБ-компрессии под влиянием технологических погрешностей при различных значениях толщины слоя GaAs РТС является нормальным (согласно критерию Пирсона) и остается таковым (согласно критерию Фишера) на протяжении рассматриваемой наработки (15 лет). Разброс значений выходных параметров увеличивается при уменьшении толщины слоев РТС.

Таким образом, возможность повышения надежности радиоэлектронных устройств на основе наноприборов (в частности, См РТД СВЧ) заключается в оптимизации характеристик гетероструктуры наноприбора и выборе технологической операции ее формирования.

### 3. КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ НАНОПРИБОРОВ

Глава посвящена описанию математической модели конструкторско-технологической оптимизации радиоэлектронных устройств на основе наноприборов и выбору на ее основе рациональных конструкторско-технологических решений.

#### 3.1. Конструкторско-технологическая оптимизация радиоэлектронных устройств на основе наноприборов по критерию максимальной гамма-процентной наработки до отказа

Структура математической модели технологической оптимизации определяется задачей максимизации гамма-процентной наработки  $T_\gamma$  партии радиоэлектронных устройств на основе наноприборов при заданных конструкторских допусках на выходные параметры устройства  $\Delta Y_k$  и технологических погрешностях на элементную базу, исходя из вариантности построения гетеро-структуры и технологии ее формирования:

$$\begin{cases} \max T_\gamma (\bar{\Gamma}, \bar{\Pi}, \bar{\Pi}_d, \bar{\Delta\Gamma}, \bar{\Delta\Pi}, \bar{\Delta\Pi}_d, \bar{\Delta Y}_k), \\ \varphi, \bar{\Delta\Gamma}, \bar{\Delta\Pi}, \bar{\Delta\Pi}_d = \text{const}, \quad \bar{Y} \in \bar{\Delta Y}_k, \end{cases} \quad (3.1)$$

где  $T_\gamma (\bar{\Gamma}, \bar{\Pi}, \bar{\Pi}_d, \bar{\Delta\Gamma}, \bar{\Delta\Pi}, \bar{\Delta\Pi}_d, \bar{\Delta Y}_k)$  — гамма-процентная наработка до отказа (целевая функция);

$\bar{\Pi} = [\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{kp}, \dots, \Pi_{kp \max}]^T$  — вектор параметров конструкции (пассивных элементов), где  $kp = 1, 2, \dots, kp_{\max}$ ;

$\bar{\Pi}_d = [\Pi_{d1}, \Pi_{d2}, \dots, \Pi_{dkpd}, \dots, \Pi_{dkpd \max}]^T$  — вектор параметров подложки;

$\bar{\Gamma} = m\Gamma = [\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_{ka}, \dots, \Gamma_{ka \max}]^T \in \Phi$  — вектор параметров гетероструктуры;

$\Phi = \{\bar{\Gamma}_1, \bar{\Gamma}_2, \dots, \bar{\Gamma}_{kma}, \dots, \bar{\Gamma}_{kma \max}\}$  — пространство возможных параметров гетероструктуры, обеспечивающих требуемую форму ВАХ наноприбора и экстремальные выходные электрические параметры;

$\overline{m\Gamma}_u = \{m\Gamma_1, m\Gamma_2, \dots, m\Gamma_{kmu}, \dots, m\Gamma_{kmu \max}\} \subseteq \Phi$  — подмножество векторов параметров активных элементов, отличающихся значениями управляемых параметров (получено в гл. 2). В задаче максимизации (3.1) следует рассматривать именно эти векторы

$$\bar{\Gamma} = m\Gamma_{kmu}, \quad kmu = 1, 2, \dots, kmu_{\max};$$

$$\overline{\Delta\Pi} = [\Delta\Pi_1, \dots, \Delta\Pi_{kp}, \dots, \Delta\Pi_{kp \max}]^T;$$

$$\overline{\Delta\Pi_d} = [\Delta\Pi_{d1}, \dots, \Delta\Pi_{d kpd}, \dots, \Delta\Pi_{d kpd \max}]^T,$$

а также  $\overline{\Delta\Gamma} = [\Delta\Gamma_1, \dots, \Delta\Gamma_{ka}, \dots, \Delta\Gamma_{ka \max}]^T$  — векторы разбросов (технологическая точность) параметров конструкции, подложки и гетероструктуры соответственно;

$\overline{\Delta Y_{ky}} = [\Delta Y_1, \dots, \Delta Y_{ky}, \dots, \Delta Y_{ky \max}]^T$  — допуски на электрические параметры  $\bar{Y} = [Y_1, \dots, Y_{ky}, \dots, Y_{ky \max}]^T$  радиоэлектронного устройства на основе наноприбора.

Алгоритм математической модели технологической оптимизации См РТД СВЧ приведен на рис. 3.1. Исходной информацией являются:

1) схема См РТД СВЧ как результат структурного синтеза (эвристический этап) на базе типовых схемных и конструкторских решений;

2) параметры пассивных элементов  $\Pi_{kp}$  ( $kp = 1, 2, \dots, kp_{\max}$ ) и подложки  $\Pi_{d kpd}$  ( $kpd = 1, 2, \dots, kpd_{\max}$ );

3) векторы параметров  $m\Gamma_{kmu} = [\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_{ka \max}]_{kmu}$  ( $kmu = 1, 2, \dots, kmu_{\max}$ ) гетероструктуры и конструкции РТД с различными значениями управляемых параметров;

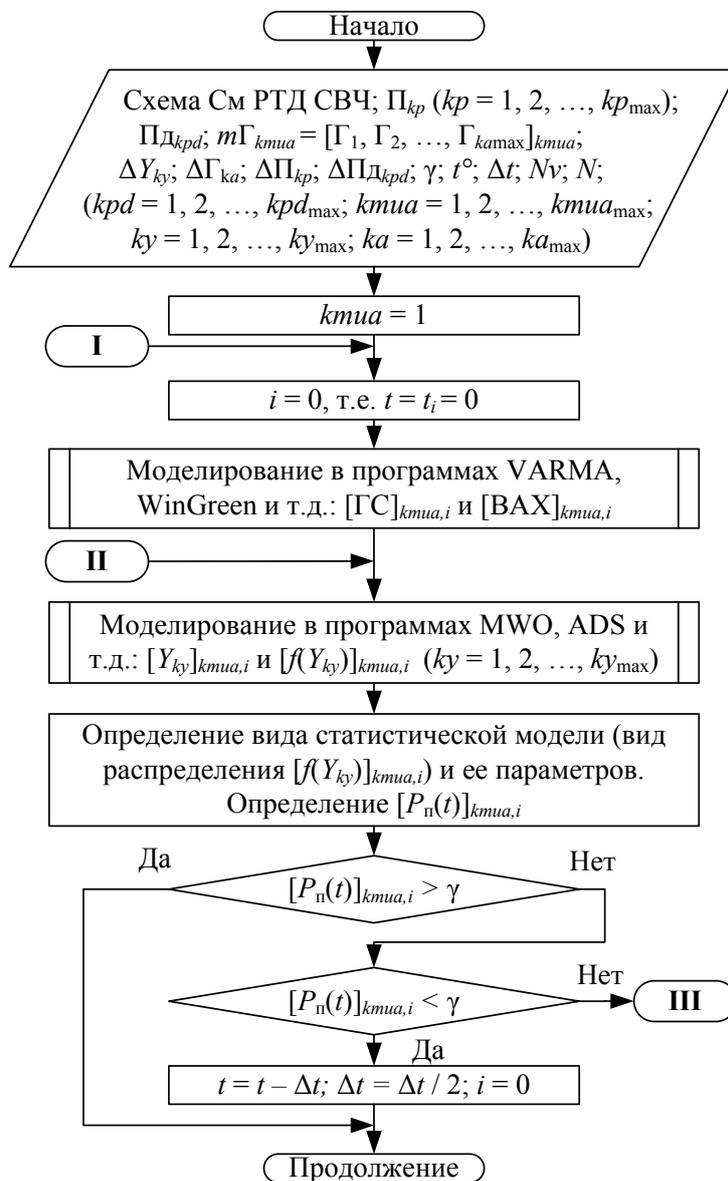
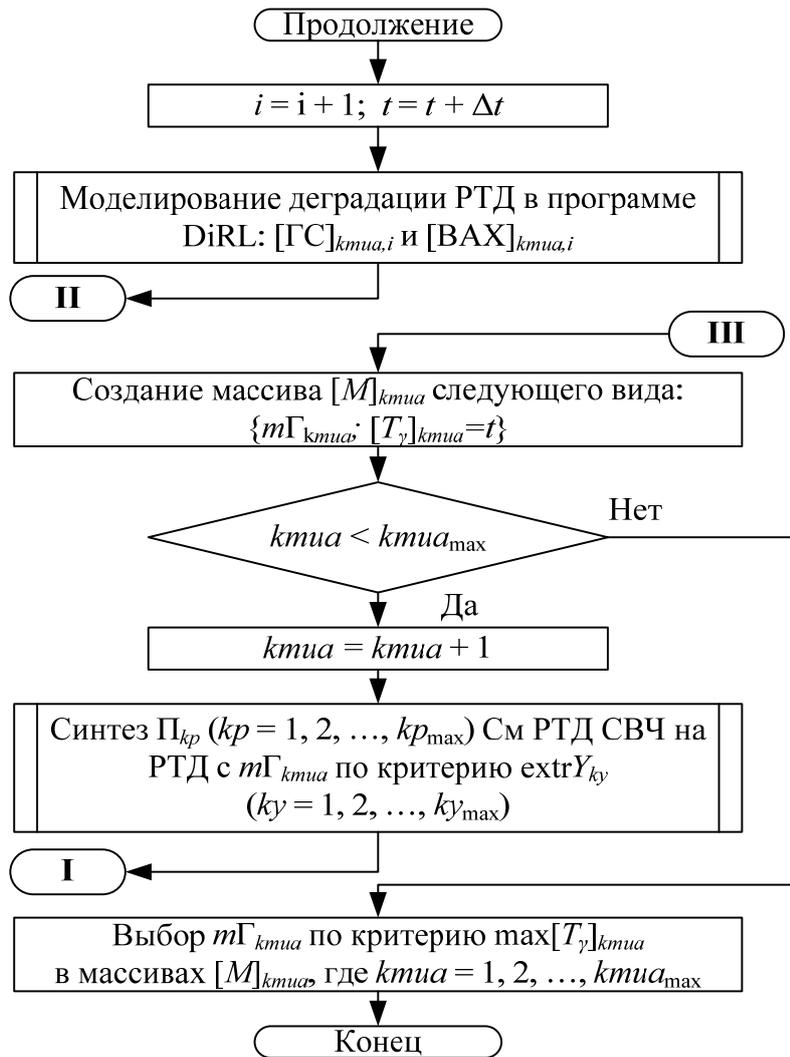


Рис. 3.1. Алгоритм математической модели



технологической оптимизации СМ РТД СВЧ

- 4) допустимые отклонения электрических параметров См РТД СВЧ  $\Delta Y_{ky}$ ; ( $ky = 1, 2, \dots, ky_{\max}$ );
- 5) технологические погрешности РТД  $\Delta \Gamma_{ka}$  ( $ka = 1, 2, \dots, ka_{\max}$ ) пассивных элементов  $\Delta \Pi_{kp}$  и подложки  $\Delta \Pi_{kpd}$ ;
- 6) температура эксплуатации См РТД СВЧ  $t^\circ$ ;
- 7) шаг по времени  $\Delta t$  (точность оценки скорости деградации См РТД СВЧ);
- 8) объем выборки  $Nv$  для оценки разброса  $f(Y_{ky})$  выходных параметров См РТД СВЧ (выбирается с учетом вероятности принятия гипотезы о распределении выходного параметра См РТД СВЧ);
- 9)  $N$  — точность вычисления целевой функции (число интервалов, на которые разбивается  $f(Y_{ky})$  для вычисления вероятности безотказной работы См РТД СВЧ в фиксированный момент времени и, следовательно, целевой функции).

Для оптимизации См РТД СВЧ по критерию максимальной гамма-процентной наработки до отказа необходимо решить задачу поиска условного экстремума, т. е. из множества допустимых решений (заданного условием достижения экстремальных значений выходных электрических параметров См РТД СВЧ) найти такое решение  $\{m\Gamma_{kmu\alpha}; \Pi_{kp}; \Pi_{kpd}, T_\gamma\}^*$ , которое обеспечит максимальную надежность См РТД СВЧ.

Поставленная задача может быть решена методом перебора возможных значений управляемых параметров с использованием приведенной в разд. 2.1 математической модели формирования эксплуатационных характеристик См РТД СВЧ с учетом деградационных процессов. При решении задачи технологической оптимизации См РТД СВЧ с целью повышения его надежности сначала моделируют профиль потенциальной энергии электронов проводимости поперек слоев РТД  $[\Gamma C]_{kmu\alpha}$  (математическая модель, основанная на зонной теории твердых тел, реализована в таких программных продуктах, как VARMA, WinGreen и т. д.), определяемый химическим составом и толщиной слоев РТС  $m\Gamma_{kmu\alpha}$ . Для нахождения зависимости потока электронов от напряжения  $[BAX]_{kmu\alpha}$  может быть выбран тот, который приводит к численному интегрированию по формуле Цу — Есаки (2.2), и реализован в программном продукте VARMA.

Далее проводят расчет, исходя из конструкторско-технологических параметров РТС (толщина и состав слоев), изменения состава слоев в зависимости от времени и температуры эксплуатации

изделия в результате протекания диффузионных процессов. Изменения можно моделировать с помощью программного продукта DiRL. Синтез параметров пассивных элементов проводят согласно стандартным методам по критерию экстремальности выходных электрических параметров См РТД СВЧ. Оценка изменения электрических параметров См РТД СВЧ в зависимости от дрейфа ВАХ РТД с учетом технологических погрешностей может быть выполнена в Microwave Office AWR Design Environment. После этого следует рассчитать значение целевой функции  $T_\gamma$ , соответствующее значениям  $m\Gamma_{kmu\alpha}$ ;  $P_{kp}$ ;  $P_{dkpd}$ , на данном шаге.

На последнем итерационном шаге в матрице рассмотренных комбинаций параметров  $\{m\Gamma_{kmu\alpha}; P_{kp}; P_{dkpd}, T_\gamma\}$  выбирают решение  $\{m\Gamma_{kmu\alpha}; P_{kp}; P_{dkpd}, T_\gamma\}^*$  по критерию (в соответствии с (3.1)) максимума целевой функции.

При решении задачи технологической оптимизации балансного См РТД СВЧ необходимо рассмотреть модификации базовой РТС; варианты РТС должны отличаться значениями управляемого параметра, при этом должна обеспечиваться требуемая степень полинома ВАХ РТД (табл. 3.1).

Таблица 3.1

**Значения  $T_\gamma$  (годы) балансных См РТД СВЧ с различными гетероструктурами**

$\gamma$	Структура				
	«А»	«А1» = = «modA- [ $N_w - 1$ ]»	«А2» = = «modA- [ $N_w - 2$ ]»	«А3» = = «modA- [ $N_w - 3$ ]»	«А4» = = «modA- [ $N_w - 4$ ]»
0,999	4,04	6,81	9,99	10,62	10,53
0,9999	3,47	6,08	9,13	9,75	9,94

Из приведенных данных следует, что конструкторско-технологическая оптимизация по критерию надежности радиоэлектронных устройств на основе наноприборов позволяет существенно повысить значения их показателей надежности.

### **3.2. Конструкторско-технологическая оптимизация радиоэлектронных устройств на основе наноприборов с учетом экспертных оценок поля допустимых значений их выходных параметров**

См РТД СВЧ, реализованные на РТС «А2», «А3» и «А4», имеют близкие значения гамма-процентной наработки (при  $\gamma = 0,9999$   $T_\gamma = 9,1$ ; 9,8 и 9,9 лет соответственно), и по критерию максимального значения  $T_\gamma$  формально следует выбрать См РТД СВЧ «А4». Однако качество этих См РТД СВЧ не одинаково, что может стать решающим фактором при их технологической оптимизации.

Общим критерием, определяющим качество конкретного См РТД СВЧ, как и любого другого радиоэлектронного устройства на основе наноприборов, является эффективность выполнения функций (преобразования принимаемого СВЧ-сигнала в сигнал промежуточной частоты) при отклонении значений выходных параметров от номинальных. Однако этот критерий качества является достаточно абстрактным, а главное, не характеризует качество изделия количественно, что затрудняет расчет надежности, основанный на количественных показателях.

В связи с этим в качестве универсального количественного критерия эффективности работы радиоэлектронных устройств на основе наноприборов примем вероятность выполнения устройством его функций —  $P_\phi$ . Такая характеристика позволяет объективно привести различные показатели качества, а также разные сочетания значений этих показателей к одному обобщенному показателю, а главное, выразить качество количественно.

Вероятность  $P_\phi$  позволяет учесть, что при отклонении значения выходного параметра от номинального в первую очередь проявляются малозначительные дефекты, которые несущественно ухудшают функционирование устройств, однако значение  $P_\phi$  начинает уменьшаться; затем проявляются значительные дефекты, уже более сильно снижающие вероятность выполнения функций, и так до достижения значения  $P_\phi = 0$ . Количественно описанное изменение качества радиоэлектронных устройств можно выразить в виде уменьшения значения  $P_\phi$ .

Вероятность выполнения функций балансными См РТД СВЧ может быть получена методом экспертных оценок. Применение этого метода обусловлено трудноформализуемым характером рас-

сма­три­вае­мой функ­ции. Под­ход, основанный на мето­де экс­пертных оце­нок, позво­ляет мето­дически верно обосновать вероятность выполнения функций балансным См РТД СВЧ и обеспечить объективную оценку его качества.

Основной задачей при использовании метода экспертных оценок является задание вероятности выполнения функций балансным См РТД СВЧ как функции потерь преобразования и коэффициента 1 дБ-компрессии с целью технологической оптимизации, направленной на повышение надежности смесителей. В соответствии с поставленной задачей на основе анализа накопленного опыта в число критериев, по которым оценивается вероятность выполнения функций См РТД СВЧ, могут быть включены различные критерии, например: отношение сигнал / шум (критерий № 1); уровень шума (критерий № 2); искажение сигнала (критерий № 3).

Выбор и обоснование перечня критериев также является самостоятельной задачей при использовании метода экспертных оценок. Действительно, неправильный выбор критериев может привести не только к нивелированию значимости ожидаемого (прогнозируемого) результата экспертного оценивания, но и к его недопустимой в данных условиях многозначности.

Для обработки результатов экспертного оценивания традиционно используют хорошо апробированный при решении аналогичных задач метод взвешенной суммы. Согласно этому методу итоговая оценка вероятности выполнения функций См РТД СВЧ на  $j$ -м интервале потерь преобразования или коэффициента 1 дБ-компрессии равна аддитивной сумме отдельных экспертных оценок  $k_i$ , имеющих свои весовые коэффициенты  $G_i$ :

$$P_{\phi j} = \sum_{i=1}^n G_i k_{i,j}, \quad (3.2)$$

где  $n$  — общее число критериев итоговой оценки  $P_{\phi j}$ ;  $G_i$  — средняя по экспертам значимость  $i$ -го критерия;  $k_i$  — средняя по экспертам оценка вероятности выполнения функций См РТД СВЧ на рассматриваемом  $j$ -м интервале по  $i$ -му критерию.

Для соотношения (3.2) допускается дальнейшая процедура статистической обработки результатов анкетирования с целью получения вероятностно-достоверной итоговой оценки экспертируемой функции. При этом анализ статистических характеристик ответов

экспертов позволяет получить дополнительную информацию для принятия верного решения. Особенно важна при этом оценка дисперсии (разброса) мнений квалифицированных экспертов.

Групповая оценка может считаться достаточно надежной только при условии хорошей согласованности ответов опрашиваемых специалистов. В связи с этим статистическая обработка информации, полученной от экспертов, должна включать в себя оценку согласованности мнений экспертов и выявление причин их неоднородности.

Для оценки согласованности мнений экспертов по нескольким факторам вычисляют коэффициент конкордации  $W$ , т. е. общий коэффициент ранговой корреляции для группы экспертов. При этом выполняют ранжирование полученных оценок, т. е. первый ранг присваивают оценке, имеющей наибольшую величину, следующей по величине оценке присваивают второй ранг и т. д.

Для расчета значения коэффициента конкордации сначала находят сумму оценок (рангов) по каждому фактору, полученную

от всех экспертов:  $\sum_{j=1}^m x_{i,j}$ , а затем — разность этой суммы и средней суммы рангов  $T$ :

$$\Delta_i = \sum_{j=1}^m x_{i,j} - T, \quad (3.3)$$

где

$$T = \frac{1}{2} m(n+1) \quad (3.4)$$

(здесь  $n$  — число факторов;  $m$  — число экспертов).

Далее рассчитывают сумму квадратов разностей (отклонений):

$$S = \sum_{i=1}^n \Delta_i^2. \quad (3.5)$$

Коэффициент конкордации  $W$  может рассматриваться как отношение фактически полученного значения суммы  $S$  к ее максимальному значению для данной группы экспертов ( $m$ ) и числа

факторов ( $n$ ), при этом  $S$  имеет максимальное значение, когда все эксперты дают одинаковые оценки:

$$W = \frac{S}{S_{\max}}; \quad (3.6)$$

$$S_{\max} = \frac{1}{12}nm^2(n^2 - 1). \quad (3.7)$$

Очевидно, что значение  $W$  может изменяться от нуля до единицы, причем равенство коэффициента конкордации единице означает, что все эксперты по данному признаку  $X$  дали одинаковые оценки, а равенство нулю означает, что связи между оценками, полученными от разных экспертов, не существует. Считают, что имеется хорошая согласованность мнений экспертов при  $W > 0,6$ . Если есть ранговое совпадение нескольких факторов, то коэффициент конкордации рассчитывают по формуле

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12}m^2(n^3 - n) - m \sum_{j=1}^m T_j}, \quad (3.8)$$

где

$$T_j = \frac{1}{12} \sum_{kj} (t_{kj}^3 - t_{kj});$$

$kj$  — число групп одинаковых рангов  $j$ -го эксперта;  $t_{kj}$  — число одинаковых рангов в  $k$ -й группе одинаковых рангов  $j$ -го эксперта.

Для оценки значимости коэффициента конкордации  $W$  необходимо и достаточно, чтобы величина  $(n-1)mW$ , имеющая  $\chi^2$ -распределение с  $\nu = n-1$  степенями свободы, имела значение  $\chi^2$ , большее табличного (значение  $\chi^2$  определяется числом степеней свободы  $\nu$  и уровнем доверительной вероятности  $P$ ). Анализ полученных в результате экспертизы данных, включая их необходимую статистическую обработку (МО и СКО значимости критерия), результаты которой представлены в табл. 3.2—3.4 и на рис. 3.2—3.5, показал, что вероятность выполнения функций  $P_{\phi}$  балансным См РТД СВЧ как функция потерь преобразования и коэффициента 1 дБ-компрессии имеет вид, приведенный на рис. 3.6 и 3.7 соответственно.

Таблица 3.2

**Экспертная оценка значимости критериев,  
характеризующих параметры качества принимаемого решения**

Критерий	Значимость критерия	
	МО	СКО
№ 1	9,7	0,49
№ 2	9,1	0,69
№ 3	7,0	1,15

Таблица 3.3

**Экспертная критериальная оценка вероятности  $P_{\phi}$  (%)  
в зависимости от значения  $L$**

Интервал значений $L$ , дБ	Критерий		
	№ 1	№ 2	№ 3
[10,30; 9,63]	60 <sup>*</sup> /8,2 <sup>**</sup>	60 / 11,5	59 / 15,7
[9,63; 8,97]	81 / 13,4	78 / 12,1	81 / 16,8
[8,97; 8,30]	100 / 0	98 / 3,8	100 / 0
[8,30; 7,63]	100 / 0	98 / 3,8	100 / 0
[7,63; 6,97]	81 / 13,4	78 / 12,1	81 / 16,8
[6,97; 6,30]	60 / 8,2	60 / 11,5	59 / 15,7

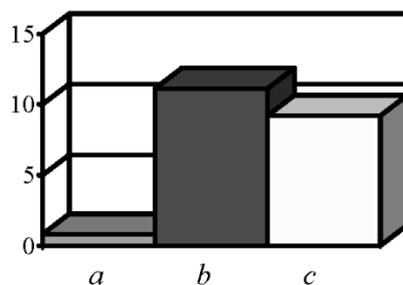
\* Среднее значение оценки.  
\*\* Дисперсия.

Таблица 3.4

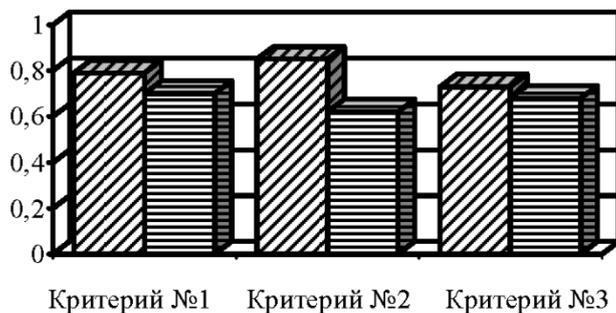
**Экспертная критериальная оценка вероятности  $P_{\phi}$  (%) выполнения  
функций в зависимости от значения  $K_{1дБ}$**

Интервал значений $K_{1дБ}$ , дБ	Критерий		
	№ 1	№ 2	№ 3
[-15,80; -15,47]	64 <sup>*</sup> /12,7 <sup>**</sup>	61 / 14,6	53 / 20,6
[-15,47; -15,13]	79 / 14,6	79 / 16,8	81 / 15,7
[-15,13; -14,80]	100 / 0	100 / 0	99 / 3,8
[-14,80; -14,47]	100 / 0	100 / 0	100 / 0
[-14,47; -14,13]	100 / 0	100 / 0	100 / 0
[-14,13; -13,80]	100 / 0	100 / 0	100 / 0

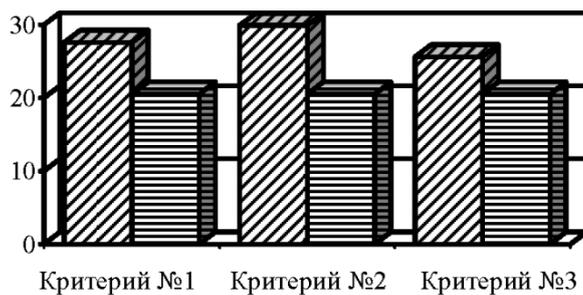
\* Среднее значение оценки.  
\*\* Дисперсия.



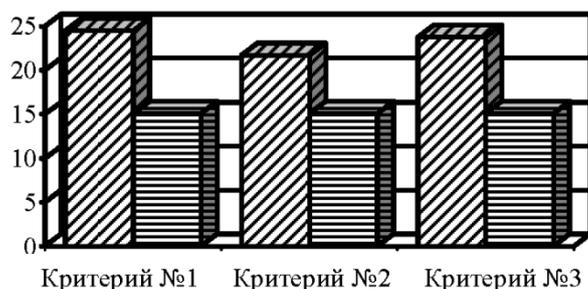
**Рис. 3.2.** Коэффициент конкордации (*a*) экспертной оценки значимости критериев; критерий значимости фактический (*b*) и табличный (*c*) при двух степенях свободы и вероятности согласованности мнения экспертов 99 %



**Рис. 3.3.** Коэффициент конкордации  $W$  экспертной оценки функций:  $P_{\phi}(L)$  — диагональная штриховка;  $P_{\phi}(K_{1,2})$  — горизонтальная штриховка



**Рис. 3.4.** Критерий значимости фактический  $\chi^2_{\text{факт}}$  (диагональная штриховка) и табличный  $\chi^2_{\text{табл}}$  (горизонтальная штриховка) для  $P_{\phi}(L)$  при двух степенях свободы и вероятности согласованности мнения экспертов 99,9 %



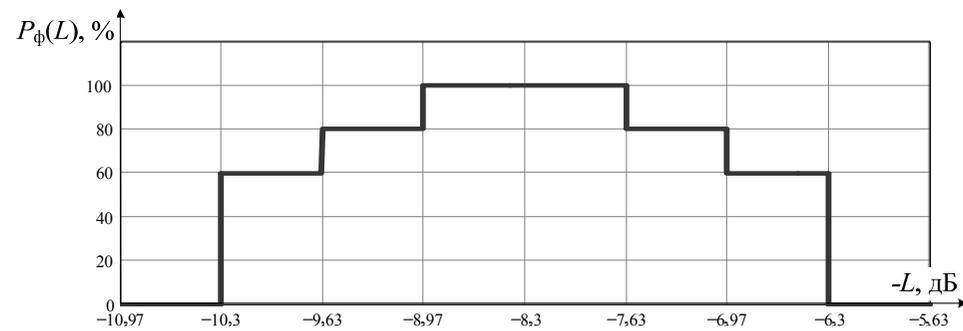
**Рис. 3.5.** Критерий значимости фактический  $\chi^2_{\text{факт}}$  (диагональная штриховка) и табличный  $\chi^2_{\text{табл}}$  (горизонтальная штриховка) для  $P_{\phi}(K_{1\text{дБ}})$  при двух степенях свободы и вероятности согласованности мнения экспертов 99,9 %

Таким образом, для дальнейшего ранжирования наиболее перспективных по критерию гамма-процентной наработки до отказа (см. (3.1)) См РТД СВЧ (реализованных на РТС «А2», «А3» и «А4») в поле допуска на выходные параметры См РТД СВЧ необходимо выделить области с различными вероятностями выполнения функций См РТД СВЧ (табл. 3.5).

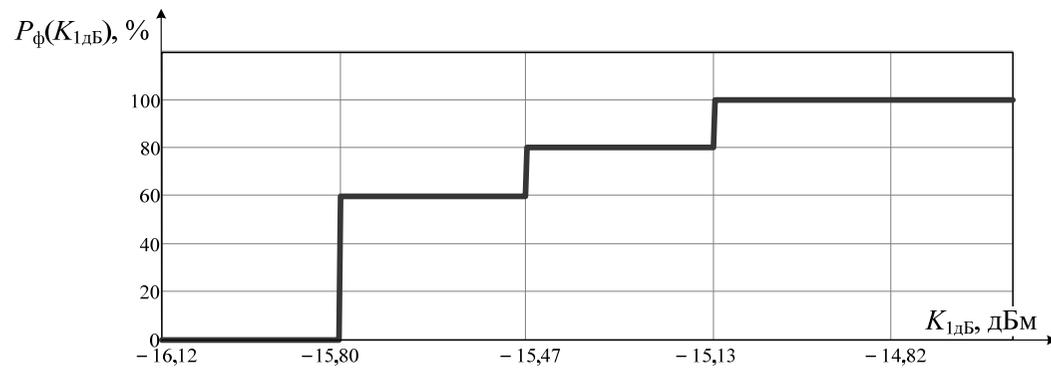
Таблица 3.5

**Экспертные оценки поля допустимых значений  
выходных электрических параметров См РТД СВЧ**

Параметр	Допуск	$P_{\phi} = 100 \%$	$P_{\phi} = 80 \%$	$P_{\phi} = 60 \%$
Потери преобразования, дБ	10,3...6,3	8,97...7,63	9,63...8,97	10,3...9,63
			7,63...6,97	6,97...6,3
Коэффициент 1 дБ-компрессии, дБм	Более -15,8	Более -15,13	-15,47...-15,13	-15,8...-15,47



**Рис. 3.6.** Вероятность функционирования  $P_\phi(L)$  балансного См РТД СВЧ как функция потерь преобразования  $L$



**Рис. 3.7.** Вероятность функционирования  $P_\phi(K_{1\text{дБ}})$  балансного См РТД СВЧ как функция коэффициента 1дБ-компрессии  $K_{1\text{дБ}}$

Для обеспечения максимального времени пребывания См РТД СВЧ в области допуска с максимальной вероятностью выполнения функций необходимо решить следующую задачу:

$$\begin{cases} \max \tilde{P}_{\phi.п} (P_{\phi}(\bar{Y}), \bar{\Gamma}, \bar{\Pi}, \bar{\Pi}_д, \bar{\Delta\Gamma}, \bar{\Delta\Pi}, \bar{\Delta\Pi}_д, \bar{\Delta Y}_к, t), \\ \varphi, \bar{\Delta\Gamma}, \bar{\Delta\Pi}, \bar{\Delta\Pi}_д = \text{const}, \quad \bar{Y} \in \bar{\Delta Y}_к, \quad P_{\phi}(\bar{Y}) = P_{\phi\text{зад}}(\bar{Y}), \end{cases} \quad (3.9)$$

где  $\tilde{P}_{\phi.п} (P_{\phi}(\bar{Y}), \bar{\Gamma}, \bar{\Pi}, \bar{\Pi}_д, \bar{\Delta\Gamma}, \bar{\Delta\Pi}, \bar{\Delta\Pi}_д, \bar{\Delta Y}_к, t)$  — интегральная вероятность выполнения функций партией (или «функция качества» партии) См РТД СВЧ на наработке  $t$  (далее, имея в виду, что «функция качества» партии зависит от всех параметров, указанных в скобках, для упрощения будем обозначать:  $\tilde{P}_{\phi.п} (P_{\phi}(\bar{Y}), \bar{\Gamma}, \bar{\Pi}, \bar{\Pi}_д, \bar{\Delta\Gamma}, \bar{\Delta\Pi}, \bar{\Delta\Pi}_д, \bar{\Delta Y}_к, t) = VPekv(0, t)$ );  $P_{\phi}(\bar{Y}) = P_{\phi\text{зад}}(\bar{Y})$  — заданная экспертами вероятность выполнения функций См РТД СВЧ (т. е.  $P_{\phi}(L)$  и  $P_{\phi}(K_{1дБ})$ , см. рис. 3.6, 3.7 и табл. 3.5).

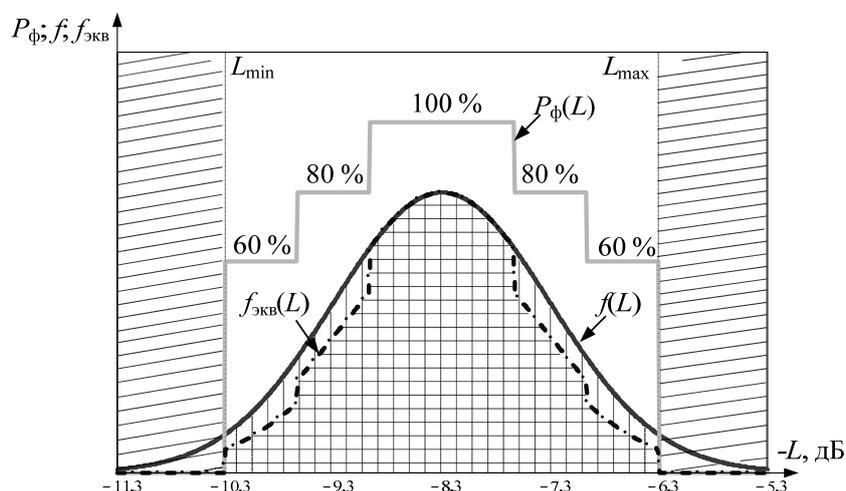
Интегральную вероятность выполнения функций партией См РТД СВЧ рассчитывают по формуле

$$\tilde{P}_{\phi.п} = \int_0^{\infty} P_{\phi.п}(t) dt,$$

где

$$P_{\phi.п}(t) = P_{\phi.п}^{Y_1}(t) P_{\phi.п}^{Y_2}(t) \dots P_{\phi.п}^{Y_i}(t) \dots P_{\phi.п}^{Y_n}(t)$$

— интегральная вероятность выполнения функций партией См РТД СВЧ в момент времени  $t$ ;  $P_{\phi.п}^{Y_i}(t)$  — интегральная вероятность выполнения функций партией См РТД СВЧ в момент времени  $t$  по выходному электрическому параметру  $Y_i$ ,  $P_{\phi.п}^{Y_i}(t) = \frac{P_{\text{экв.п}}^{Y_i}(t)}{P_{\Pi}^{Y_i}(t)}$ ;  $P_{\Pi}^{Y_i}(t)$  — вероятность попадания выходного параметра  $Y_i$  См РТД СВЧ в момент времени  $t$  в допустимые пределы  $\Delta Y_{ik}$  (вертикальная штриховка на рис. 3.8);  $P_{\text{экв.п}}^{Y_i}(t)$  — вероятность  $P_{\Pi}^{Y_i}(t)$ , скорректированная с учетом  $P_{\phi}(Y_i)$  (горизонтальная штриховка на рис. 3.8).



**Рис. 3.8.** Иллюстрация к определению в фиксированный момент времени интегральной вероятности выполнения функций партией См РТД СВЧ по потерям преобразования  $L$  (эквивалентная функция распределения  $f_{\text{экр}}(L) = f(L)P_{\phi}(L)$ )

Алгоритм решения задачи (3.9) приведен на рис. 3.9. Исходная информация — такая же, как для алгоритма, приведенного на рис. 3.1, за исключением того, что в данном случае нет необходимости задавать уровень  $\gamma$ . При проведении технологической оптимизации по рассматриваемому алгоритму необходимо задать вероятность  $P_{\phi}$  выполнения функций См РТД СВЧ, например, с помощью метода экспертных оценок (см. рис. 3.6, 3.7). После оценки коэффициента конкордации и расчета собственно функции  $P_{\phi}$  с учетом весовых коэффициентов, соответствующих значимости критериев задания вероятности, получают зависимости  $P_{\phi}(Y_{ky})$ ,  $ky = 1, 2, \dots, ky_{\text{max}}$  (в случае рассмотрения двух выходных электрических параметров См РТД СВЧ — потерь преобразования и коэффициента 1дБ-компрессии — соответственно  $P_{\phi}(L)$  и  $P_{\phi}(K_{1\text{дБ}})$ , т. е.  $Y_1 = L$  и  $Y_2 = K_{1\text{дБ}}$ ,  $ky_{\text{max}} = 2$ ).

В дальнейшем алгоритм технологической оптимизации См РТД СВЧ отличается от описанного ранее алгоритма (см. рис. 3.1) отсутствием (вследствие различий целевых функций) при переборе допустимых вариантов РТС блока «нащупывания» уровня  $\gamma$ , принимаемого вероятностью  $P_{\text{н}}(t)$  безотказной работы в фиксированный момент времени.

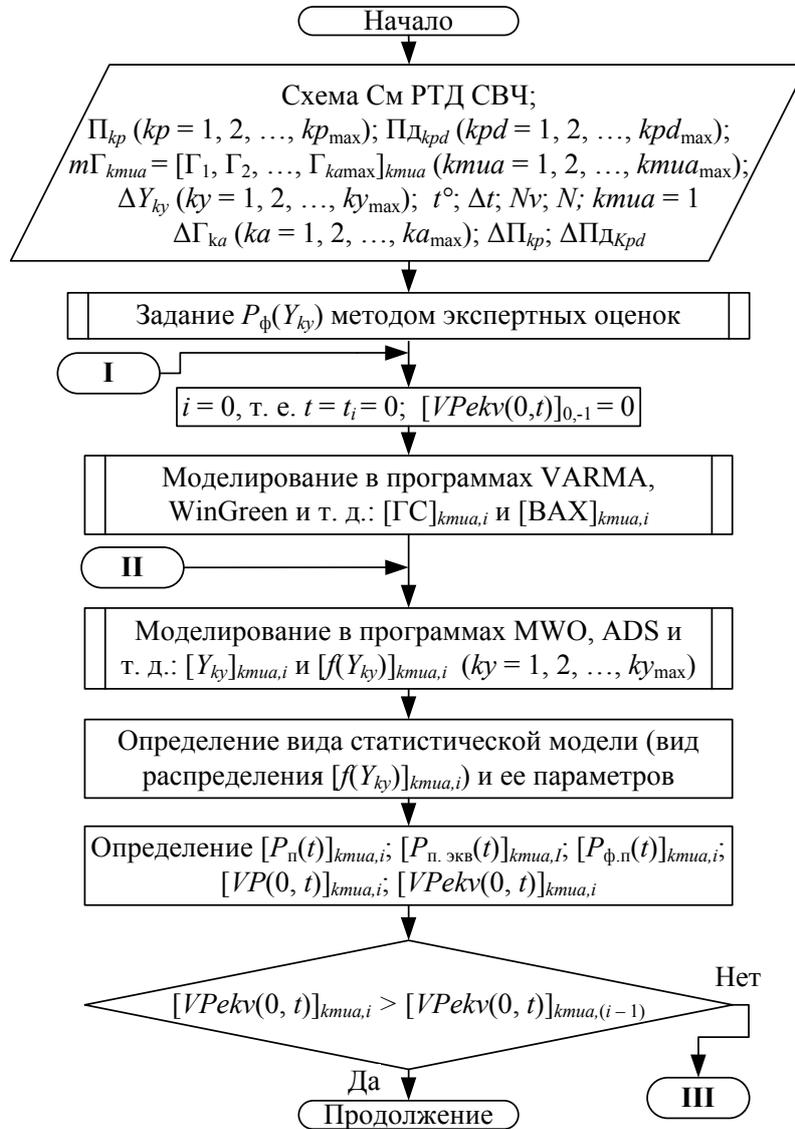
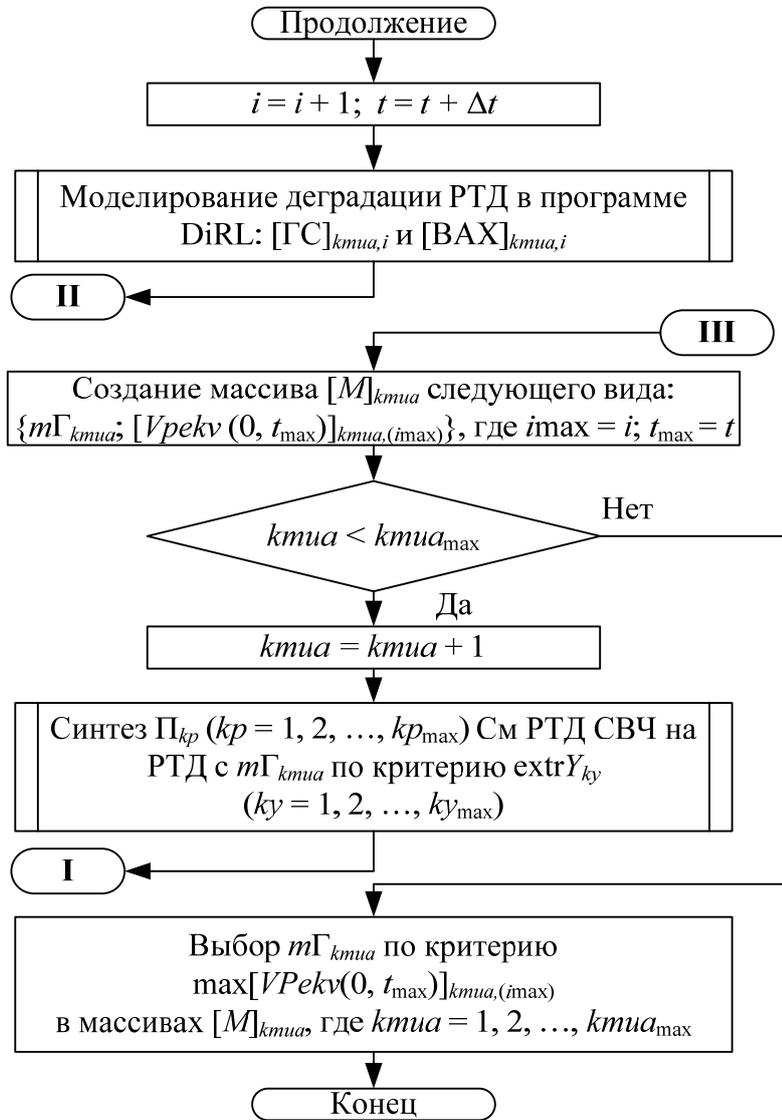


Рис. 3.9. Алгоритм математической модели



технологической оптимизации

В алгоритм вводится блок расчета следующих параметров, необходимых для расчета целевой функции: вероятности  $[P_{п.экв}(t)]$  попадания выходных параметров в пределы допуска, скорректированной на величину вероятности выполнения функций См РТД СВЧ и определяемой для фиксированного момента времени  $t$ ; интегральной (средней) вероятности  $[P_{ф.п}(t)]$  выполнения функций партией См РТД СВЧ в фиксированный момент времени  $t$ ; величины, пропорциональной сдвигу рассеивания выходных параметров См РТД СВЧ в пределах назначенных допусков на  $Y_{ky}$  в процессе эксплуатации  $[VP(0, t)]$ .

Критерием останова цикла расчета влияния деградации РТС на надежность См РТД СВЧ с параметрами  $m\Gamma_{kmu\alpha}$  ( $kmu\alpha = 1, 2, \dots, kmu\alpha_{max}$ ) является отказ последнего изделия партии, т. е. невыполнение условия увеличения во времени  $VPekv(0, t)$ , которое означает прекращение увеличения объема фигуры, образованной сдвигом плотности распределения  $f_{экв}(Y)$  в пределах допуска на выходные параметры См РТД СВЧ во времени и плоскостью наработки. После останова цикла учета скорости расхода надежности при эксплуатации См РТД СВЧ формируется массив  $[M]_{kmu\alpha}$  соответствия рассмотренных возможных векторов  $m\Gamma_{kmu\alpha}$  ( $kmu\alpha = 1, 2, \dots, kmu\alpha_{max}$ ) и величин «функций качества» партии  $VPekv(0, t_{max})$ , где  $t_{max}$  соответствует моменту отказа последнего изделия партии, для См РТД СВЧ. На последнем этапе технологической оптимизации по алгоритму, приведенному на рис. 3.9, в массиве  $[M]$  выбираем такой вектор  $m\Gamma_{kmu\alpha}$  ( $kmu\alpha = 1, 2, \dots, kmu\alpha_{max}$ ) параметров РТД, который обеспечивает максимум функции  $VPekv(0, t_{max})$ .

Решение задачи технологической оптимизации балансного См РТД СВЧ по критерию максимальной функции качества приводит к результатам, приведенным на рис. 3.10, 3.11 и в табл. 3.6.

Оптимальным является См РТД СВЧ, реализованный на структуре «А3» (см. табл. 3.6), так как он характеризуется наиболее продолжительным пребыванием в области 100%-ной вероятности выполнения функций смесителем ( $T_{P_{\phi}} = 100\% \approx 4$  года) и минимальным временем пребывания в области низкого значения  $P_{\phi}$  ( $T_{P_{\phi}=60\%} \approx 7$  лет), а следовательно, максимальной ( $\tilde{P}_{ф.п}(t=15 \text{ лет}) = 11\,790$ ) целевой функцией.

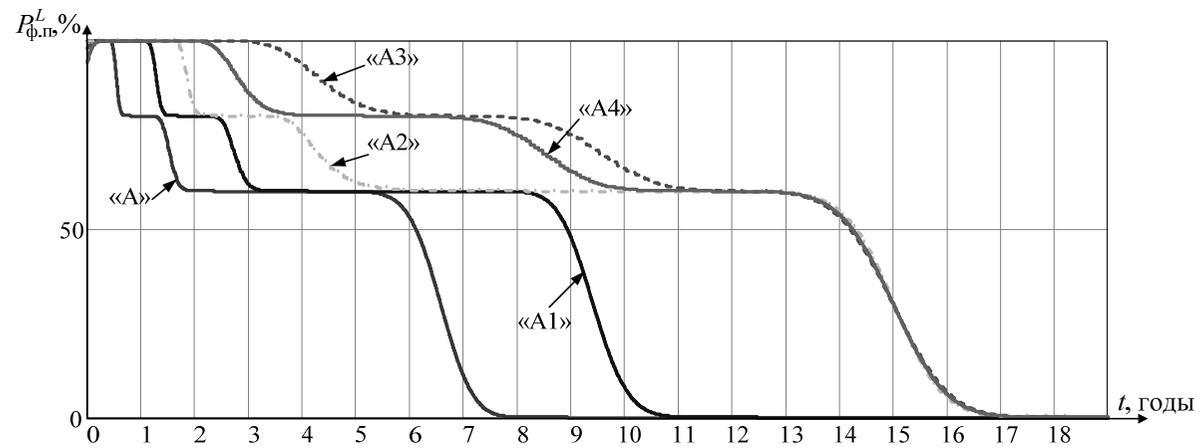


Рис. 3.10. Интегральная вероятность  $P_{ф.п}$  выполнения функций См РТД СВЧ по потерям преобразования  $L$

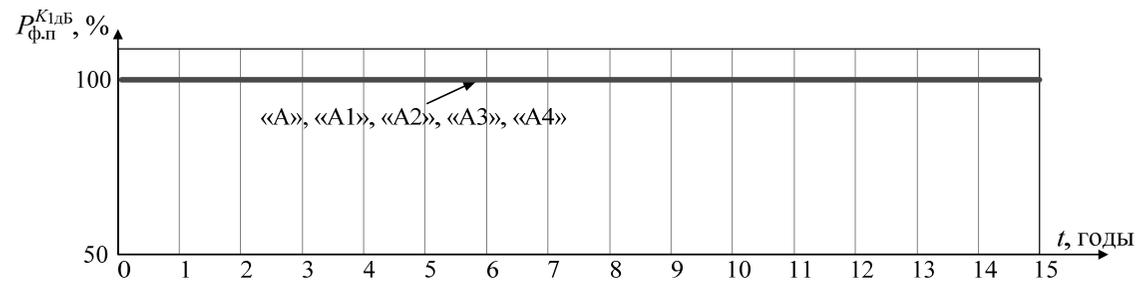
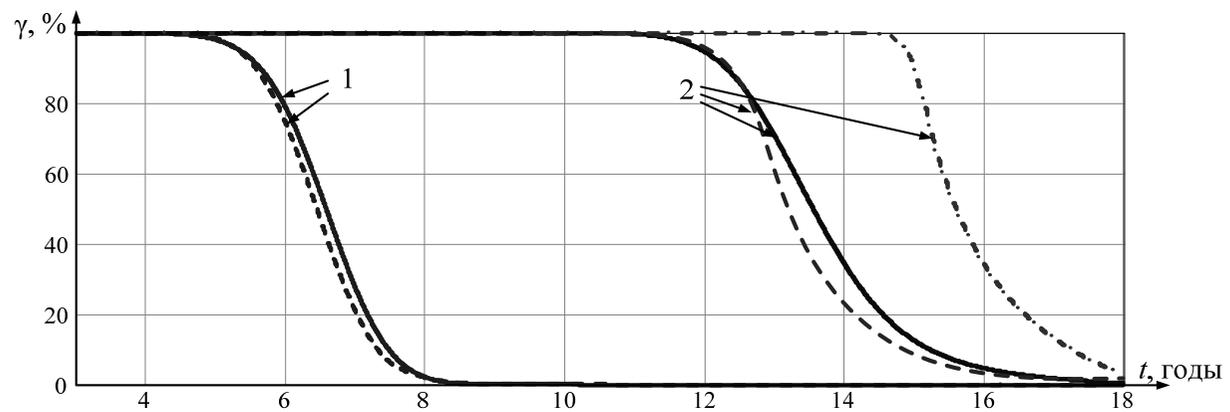


Рис. 3.11. Интегральная вероятность  $P_{ф.п}$  выполнения функций См РТД СВЧ по коэффициенту 1 дБ-компрессии



**Рис. 3.12.** Вероятность безотказной работы См РТД СВЧ, реализованных на РТС «А» и «А3»:

1 — показатели надежности См РТД СВЧ на гетероструктуре «А» до оптимизации; 2 — См РТД СВЧ на гетероструктуре «А3» после оптимизации; ———— теоретическая надежность партии; - - - - - экспериментальная надежность партии; - · - · - надежность 8 % изделий партии после термотестирования, обеспечивающего  $T_{\gamma=99,99\%} = 15$  лет

Таблица 3.6

**Результаты технологической оптимизации партии балансных  
См РТД СВЧ**

Структура	Наработка (годы), в течение которой значение $P_{\phi}$ составляет			$\tilde{P}_{\phi.n} = \int_0^{\infty} P_{\phi.n}(t) dt$
	100 %	80 %	60 %	
«А»	0,5	1,0	6	4 366 (37,0 %)
«А1» = = «modA-[ $N_w - 1$ ]»	1,3	1,5	7,8	6 468 (54,9 %)
«А2» = = «modA-[ $N_w - 2$ ]»	1,9	2,4	12,5	10 260 (87,1 %)
«А3» = = «modA-[ $N_w - 3$ ]»	4,3	5,3	7,2	11 780 (100 %)
«А4» = = «modA-[ $N_w - 4$ ]»	2,8	5,7	8,3	11 270 (95,6 %)

Таким образом, результаты математического моделирования позволяют сделать вывод, что в результате оптимизации характеристик РТС и технологических погрешностей изготовления может быть достигнут достаточно высокий уровень надежности партии См РТД СВЧ ( $T_{\gamma=0,9999} \approx 10$  лет). Вместе с тем надо отметить, что достижение более высоких значений надежности ( $T_{\gamma=0,9999} > 10$  лет) связано с расширением зоны технологической оптимизации за счет разработки дополнительных технологических контрольно-диагностических мероприятий, направленных на определение индивидуальной надежности См РТД СВЧ в партии. В частности, как показывают расчеты, уровень надежности  $T_{\gamma=0,9999} = 15$  лет может быть обеспечен только 8 % изделий партии См РТД СВЧ.

Экспериментальные исследования (результаты которых приведены на рис. 3.12) подтверждают повышение надежности См РТД СВЧ благодаря проведению его оптимизации и введению операции термотестирования на этапе сборки (значение  $T_{\gamma=0,9999}$  повышено с 3,9 до 8,3 года).

#### **4. ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ НАНОПРИБОРОВ**

Структурно методику выполнения конструкторско-технологической оптимизации радиоэлектронных устройств на основе наноприборов с целью обеспечения их надежности следует разделить на два модуля (рис. 4.1).

Первый модуль — решение задачи достижения максимально возможного или требуемого значения выбранного показателя надежности (гамма-процентной наработки до отказа — в случае 100 %-ной вероятности выполнения устройством функций в пределах допуска на выходные электрические параметры либо интегральной вероятности выполнения функций партией радиоэлектронных устройств на основе наноприборов — в случае проранжированного экспертами поля допуска выходных электрических параметров устройства).

Входными данными являются: заданное значение уровня гамма (для задачи максимизации  $T_\gamma$ ) или гамма-процентной наработки до отказа  $T_\gamma$  (для задачи достижения заданного уровня надежности); предельные значения выходных электрических параметров устройства, а также массив возможных параметров слоев гетероструктуры (толщины и состав слоев) наноприбора, их технологических отклонений. Затем создается модель гетероструктуры прибора при номинальных параметрах слоев.

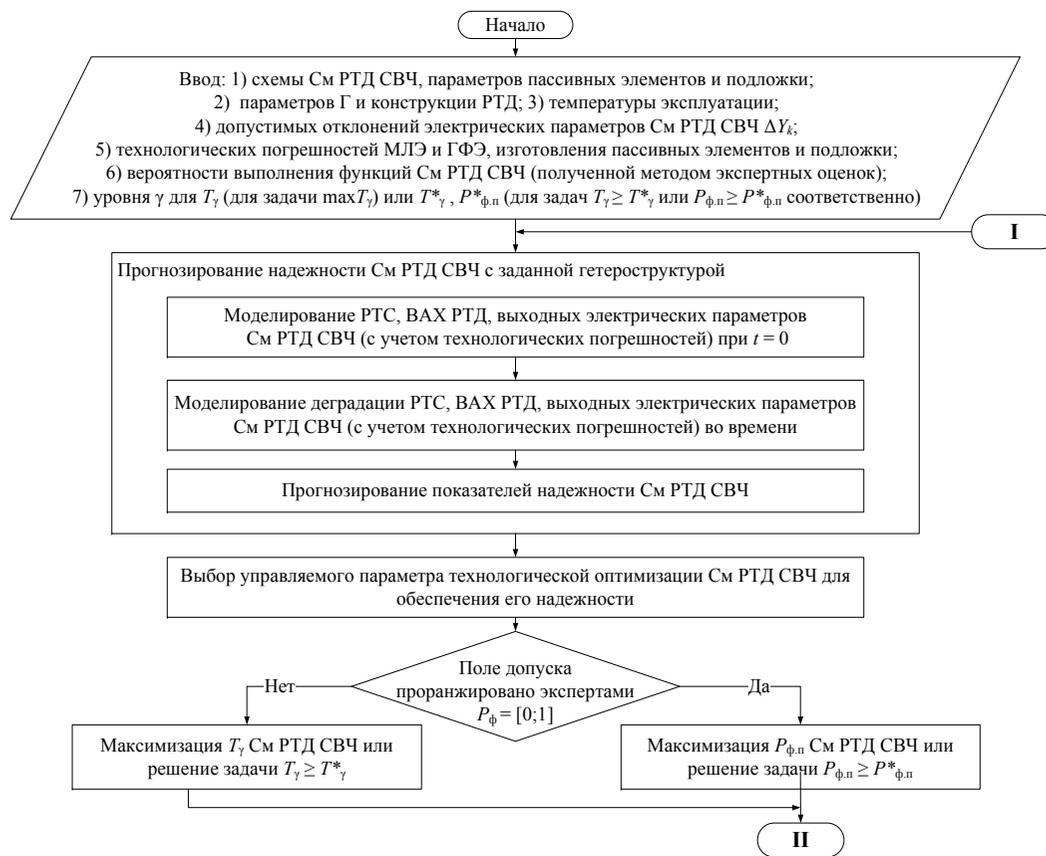
Следующим этапом расчета является моделирование ВАХ наноприбора для полученной гетероструктуры, которая соответствует начальному моменту времени  $t = 0$ . Далее выполняют аппроксимацию ВАХ наноприбора и моделирование выходных электрических параметров устройства. Указанные этапы моделирования для См РТД СВЧ можно осуществлять в программных средах VARMA (для моделирования ВАХ), MathCAD (для аппроксимации ВАХ), MWO или ADS (для реализации электрической принципиальной схемы См РТД СВЧ и расчета его выходных электрических парамет-

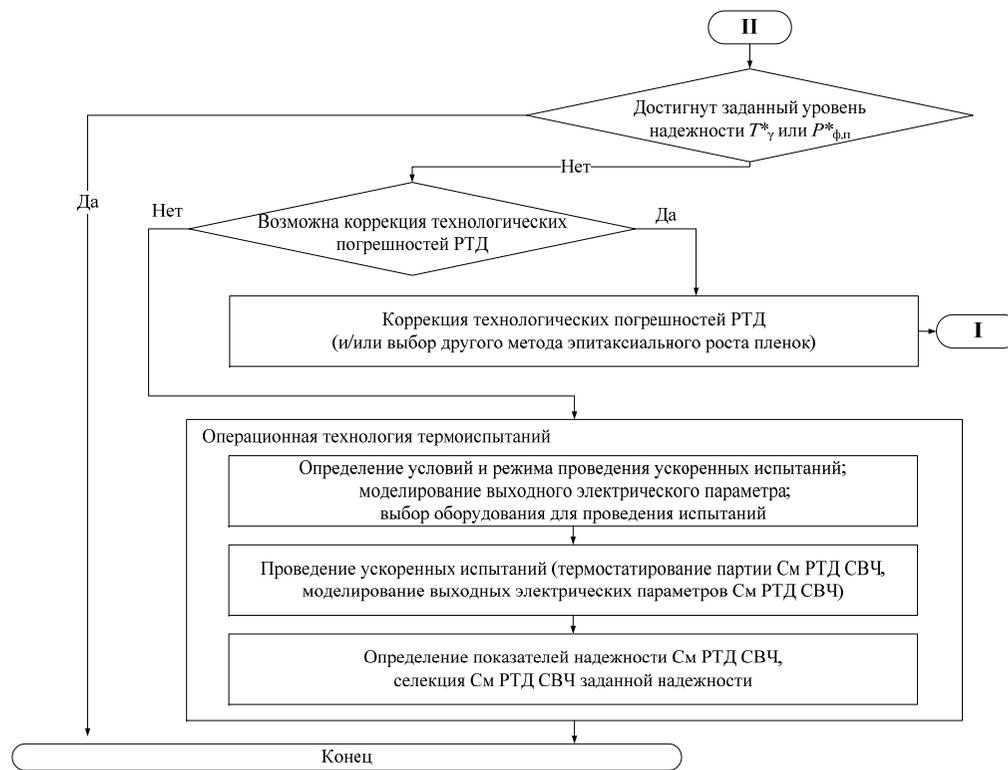
ров). Моделирование влияния деградации РТС в результате процесса диффузии Al на выходные электрические параметры См РТД СВЧ позволит определить его надежность (гамма-процентную наработку до отказа или интегральную вероятность выполнения функций партией смесителей — в зависимости от ранжированности поля допуска выходных электрических параметров смесителя).

Следующим этапом является моделирование изменения состава слоев РТС в результате воздействия доминирующего процесса деградации — диффузии Al за период времени от 0 до  $t_{\max}$  (значение  $t_{\max}$  соответствует моменту отказа последнего смесителя в партии — в случае задачи максимизации надежности и моменту достижения заданного уровня целевой функции — в случае задачи обеспечения заданного уровня надежности См РТД СВЧ). Затем для каждой итерации по времени (от начального момента времени до достижения значения  $t_{\max}$ ) выполняют моделирование ВАХ РТД, ее аппроксимацию и расчет выходных электрических параметров См РТД СВЧ с учетом технологических погрешностей. Полученный разброс значений выходных электрических параметров проверяют на попадание в заданные пределы их допусков (или в области этих допусков) и цикл моделирования деградации См РТД СВЧ повторяют (в случае недостижения максимума целевой функции для рассматриваемой РТС) или же формируют массив с полученным значением целевой функции для См РТД СВЧ с соответствующей РТС. Описанные действия выполняются для всех возможных вариантов РТС.

Исходя из физических закономерностей старения РТС, на выходе получают конструктивно-технологические характеристики См РТД СВЧ и прогноз значения целевой функции (заданного уровня или максимально достижимого уровня — в зависимости от поставленной задачи).

Если применение первого модуля методики технологической оптимизации не позволило выйти на заданный уровень надежности (т. е. для получения См РТД СВЧ, по уровню надежности не уступающих смесителям на ДБШ, например, с требованием  $T_\gamma > 10$  лет при  $\gamma = 0,9999$ ) (рис. 4.2), то в методике технологической оптимизации следует предусмотреть второй модуль — технологические испытания См РТД СВЧ, проводимые на этапе входного контроля элементов См РТД СВЧ. Задача испытаний — непосредственная экспериментальная оценка индивидуальной надежности каждого См РТД СВЧ в партии и последующая селекция высоконадежных изделий, для которых обеспечивается требуемый уровень значений  $T_\gamma$ .





**Рис. 4.1.** Методика конструкторско-технологической оптимизации радиоэлектронных устройств на наноприборах (на примере СМ РТД СВЧ)

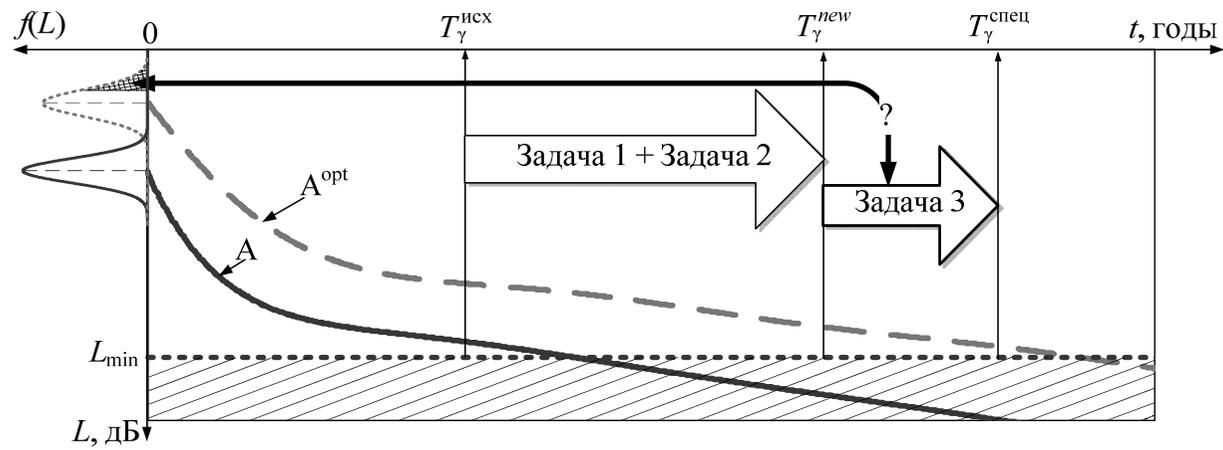


Рис. 4.2. Иллюстрация к задаче повышения значения  $T_\gamma$

В основу испытаний заложен принцип искусственного старения изделия под действием температуры (ускоренные испытания). Выбор температурного режима в зависимости от заданного временного диапазона эксплуатации изделия осуществляется на основе моделирования процессов деградации изделия при физически допустимых температурах. При этом в процессе испытаний инициируют отказы, связанные с высокой энергией активации процесса деградации. Режимы технологических испытаний уменьшают ресурс изделия не более чем на 5 %.

Результаты применения второго модуля методики технологической оптимизации (технологических испытаний, проводимых на этапе входного контроля элементов См РТД СВЧ) приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

**Значения гамма-процентной наработки  $T_\gamma$  (годы) См РТД СВЧ до и после применения операционной технологии термоиспытаний**

Показатель надежности	До	После
	применения технологии термоиспытаний	
$T_{\gamma=0,999}$	10,62	15,14
$T_{\gamma=0,9999}$	9,75	15,13

После непосредственной экспериментальной оценки индивидуальной надежности каждого См РТД СВЧ в партии и последующей селекции 8 % высоконадежных изделий удается обеспечить значение  $T_{\gamma=0,9999} \approx 15$  лет.

Обобщим полученные результаты. Разработанная методика конструкторско-технологической оптимизации радиоэлектронных устройств на основе наноприборов структурно состоит из двух модулей. Первый модуль позволяет решить задачу достижения максимально возможного или требуемого значения выбранного показателя надежности ( $T_\gamma$  — в случае 100%-ной вероятности выполнения функций устройства в пределах допуска на выходные электрические параметры либо интегральной вероятности выполнения функций партией устройств — в случае проранжированного экспертами поля допуска выходных электрических параметров устройства). При требованиях потребителя к уровню групповой

надежности, превышающих достигнутый уровень (например для См РТД СВЧ:  $T_{\gamma=0,99} \approx 11,7$  лет,  $T_{\gamma=0,999} \approx 10,6$  лет,  $T_{\gamma=0,9999} \approx 9,8$  лет), в технологический процесс производства целесообразно ввести операцию термотестирования на этапе выходного контроля устройств в партии (второй модуль методики). Ее цель — непосредственная экспериментальная оценка индивидуальной надежности каждого устройства в партии и последующая селекция высоконадежных изделий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тенденции развития РЭС обуславливают перспективность применения радиоэлектронных устройств на базе гетероструктурных наноприборов. В настоящее время актуально проведение комплексных исследований закономерностей формирования показателей надежности и разработки на их основе методики обеспечения заданного уровня надежности таких устройств при помощи выбора рациональных конструкторско-технологических решений при их производстве.

Структурная схема формирования эксплуатационных параметров радиоэлектронных устройств на базе наноприборов с учетом деградационных процессов позволяет проанализировать взаимосвязь факторов, определяющих отказы таких устройств. Формализация структурной схемы в виде математической модели изменения выходных параметров устройства в процессе его эксплуатации, определяемых интенсивностью протекания деградационных процессов в гетероструктуре наноприбора и конструкторско-технологическими особенностями производства изделия, позволяет определять показатели его надежности.

Влияние характеристик гетероструктуры и технологии ее изготовления на изменение выходных параметров устройства в процессе его эксплуатации позволяет обосновать возможность обеспечения заданного уровня надежности на основе оптимизации характеристик гетероструктуры и технологических погрешностей изготовления.

Конструкторско-технологическая оптимизация устройства может быть сведена к решению задачи максимизации (или обеспечения заданного потребителем значения) гамма-процентной наработки до отказа и (или) интегральной вероятности выполнения функций радиоэлектронными устройствами на основе наноприборов, при этом выбор целевой функции обусловлен экспертным ранжированием поля допустимых значений выходных параметров изделия.

Инженерная методика конструкторско-технологической оптимизации производства радиоэлектронных устройств на основе наноприборов включает в себя: оптимизацию характеристик гете-

роструктуры наноприбора, технологической операции формирования гетероструктуры наноприбора и введение контрольно-диагностической операции термотестирования устройства. Реализация этой методики обеспечивает повышение как групповой (например, для См РТД СВЧ может быть получена гамма-процентная наработка до отказа  $T_{\gamma=0,9999} \approx 10$  лет), так и индивидуальной (для См РТД СВЧ может быть получена гамма-процентная наработка до отказа  $T_{\gamma=0,9999} \approx 18$  лет) надежности изделия и позволяет достичь заданных потребителем показателей уровня его надежности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Приемные системы спутникового телевидения* / И.П. Бушминский, Д.И. Кузнецов, А.А. Романов и др. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 320 с.
2. *Бонч-Бруевич В.Л., Калашиков С.Г. Физика полупроводников: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп.* М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1990. 688 с.
3. *Мокеров В.Г. Наногетероструктуры в сверхвысокочастотной полупроводниковой электронике.* М.: Техносфера, 2010. 435 с.
4. *Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию / Пер с яп. А.В. Хагояна; Под ред. проф. Л.Н. Патрикеева.* М.: Бином. Лаборатория знаний, 2008. 138 с.
5. *Шишкин Г.Г., Агеев И.М. Нанoeлектроника: элементы, приборы, устройства.* М.: Бином. Лаборатория знаний, 2011. 408 с.
6. *Ветрова Н.А., Хныкина С.В., Шашурин В.Д. К вопросу о прогнозировании качества смесителей радиосигналов на основе РТД на этапе их сборки // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 4. С. 30—37.*
7. *Повышение показателей качества радиоэлектронных систем нового поколения за счет применения резонансно-туннельных нанодиодов / Ю.А. Иванов, С.А. Мешков, Н.В. Федоркова, В.Д. Шашурин и др. // Нанoeинженерия в приборостроении. 2011. № 1. С. 34—43.*
8. *Mizuta H., Tanoue T. The Physics and Applications of Resonant Tunneling Diodes (Cambridge Studies in Semiconductor Physics and Microelectronic Engineering). Cambridge University Press. 1995. 256 p.*
9. *Ермолаев Ю.П. Оценка показателей качества на этапах проектирования и производства электронных устройств в условиях применения высоких технологий.* Казань: Новое знание, 2006. 96 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений .....	3
Список основных обозначений .....	3
Введение .....	5
<b>1. Проблемы обеспечения качества производства наноприборов и радиоэлектронных устройств на их основе.....</b>	<b>6</b>
1.1. Тенденции развития радиоэлектронных систем связи .....	6
1.2. Конструкторско-технологические аспекты изготовления радиоэлектронных устройств на базе наноприборов ...	8
1.3. Формирование показателей надежности радиоэлектронных устройств на базе наноприборов .....	10
1.4. Проблемы обеспечения качества производства радиоэлектронных устройств на базе наноприборов на примере смесителей радиосигналов СВЧ-диапазона на основе резонансно-туннельных диодов .....	11
<b>2. Закономерности формирования постепенных отказов наноприборов и радиоэлектронных устройств на их основе .....</b>	<b>18</b>
2.1. Структурная схема формирования и изменения эксплуатационных параметров наноприборов и радиоэлектронных устройств на их основе .....	18
2.2. Влияние изменения в процессе деградации параметров резонансно-туннельной структуры на электрические характеристики смесителей радиосигналов СВЧ-диапазона на основе резонансно-туннельных диодов.....	28
2.2.1. Исследование чувствительности электрических параметров балансного СМ РТД СВЧ к ширине $N_b$ барьеров РТС .....	32
2.2.2. Исследование чувствительности электрических параметров балансного СМ РТД СВЧ к высоте $V_b$ барьеров РТС .....	35
2.2.3. Исследование чувствительности электрических параметров балансного СМ РТД СВЧ к ширине ямы $N_w$ РТС.....	38

2.3. Анализ влияния технологических погрешностей на выходные электрические параметры радиоэлектронных устройств на основе наноприборов .....	42
<b>3. Конструкторско-технологическая оптимизация радиоэлектронных устройств на основе наноприборов .....</b>	<b>52</b>
3.1. Конструкторско-технологическая оптимизация радиоэлектронных устройств на основе наноприборов по критерию максимальной гамма-процентной наработки до отказа .....	52
3.2. Конструкторско-технологическая оптимизация радиоэлектронных устройств на основе наноприборов с учетом экспертных оценок поля допустимых значений его выходных параметров .....	58
<b>4. Инженерная методика выполнения конструкторско-технологической оптимизации радиоэлектронных устройств на основе наноприборов .....</b>	<b>74</b>
<b>Заключение .....</b>	<b>81</b>
<b>Литература .....</b>	<b>83</b>

*Учебное издание*

**Шашурин** Василий Дмитриевич  
**Ветрова** Наталия Алексеевна  
**Иванов** Юрий Александрович  
**Мешков** Сергей Анатольевич  
**Нарайкин** Олег Степанович  
**Федоркова** Нина Валентиновна  
**Москаленко** Валерий Осипович

## **НАНОТЕХНОЛОГИЯ И МИКРОМЕХАНИКА**

### **Часть 5**

#### **Надежность наноприборов и радиоэлектронных устройств на их основе**

Редактор *Е.К. Кошелева*  
Корректор *Е.В. Авалова*  
Компьютерная верстка *О.В. Беляевой*

Подписано в печать 17.12.2012. Формат 60 × 84/16. Усл. печ. л. 5,12.  
Изд. № 36. Тираж 100 экз. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Для заметок

Для заметок