

Н. А. В е т р о в а

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ
СМЕСИТЕЛЕЙ РАДИОСИГНАЛОВ
НА РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫХ
НАНОДИОДАХ**

Решена проблема обеспечения заданного уровня надежности современных смесителей радиосигналов СВЧ-диапазона на резонансно-туннельных диодах. Достижение показателей надежности, необходимых для областей применения с высокой ценой отказа изделия, возможно благодаря проведению конструкторско-технологической оптимизации смесителей радиосигналов.

E-mail: vetrova@bmstu.ru

Ключевые слова: нанотехнологии, наноприборы, надежность, смесители радиосигналов, резонансно-туннельный нанодиод.

Тенденции развития современных радиоэлектронных средств (РЭС) связи определяют необходимость реализации таких требований, как миниатюризация и изменение показателей технических характеристик (уменьшение потерь преобразования и искажений сигналов, увеличение динамического диапазона, расширение диапазона рабочих частот и т. д.). При этом остаются неизменными требования повышения показателей надежности РЭС.

В состав большинства РЭС входят в качестве отдельных функциональных модулей смесители радиосигналов. В таких устройствах, построенных по схеме с преобразованием частоты, именно от смесителей в основном зависит чувствительность, помехоустойчивость и искажения обрабатываемых сигналов, а, следовательно, и надежность всей системы.

Основным элементом смесителя радиосигнала, определяющим его технические характеристики, является нелинейный элемент (диод или транзистор). Для выполнения вышеперечисленных задач, стоящих перед современными РЭС связи СВЧ-диапазона, перспективным является использование полупроводниковых приборов, функционирующих на основе квантоворазмерных эффектов. К таким приборам относится резонансно-туннельный диод (РТД) с поперечным токопереносом на базе многослойных полупроводниковых резонансно-туннельных гетероструктур (РТС). Для улучшения эксплуатационных характеристик нелинейного преобразователя возможно создание РТД с необходимой формой вольт-амперной характеристики (ВАХ), позволяющей уменьшить интермодуляционные составляющие частот гетеродина и сигнала в спектре выходного сигнала [1].

Одна из основных проблем, сдерживающих распространение применения указанных изделий в различных радиоэлектронных системах, состоит в недостаточной их надежности: гамма-процентная наработка $T_{\gamma=0,9999}$ составляет 3–4 года [2]. Этого мало для РЭС, используемых в тех областях приборостроения, где цена отказа чрезвычайно велика. Так для авиационного приборостроения необходимы смесители радиосигналов с $T_{\gamma=0,9999}$ составляет 6–8 лет, для космической отрасли – 13–15 лет.

Задача достижения заданных показателей надежности для данной группы изделий может быть решена при системном подходе к этой проблеме, основанном на выявлении причинно-следственных связей и факторов, определяющих формирование отказов смесителей и учитывающих конструкторско-технологические особенности их производства. Это позволит разработать инженерные методики и связанные с ними технологические мероприятия для расчетно-методического обеспечения выбора рациональных конструкторско-технологических решений при производстве смесителей радиосигналов на резонансно-туннельных нанодиодах (См РТД СВЧ), позволяющих повысить их надежность и обеспечить необходимые для смесителей радиосигналов специального назначения показатели надежности на этапе их сборки.

Между тем, имеющиеся на сегодняшний день результаты исследований показали, что слабым местом, с точки зрения надежности смесителя, является РТД [3]. Установлено, что доля отказов пассивных элементов смесителя мала, доминируют отказы РТД, обусловленные деградационными процессами в РТС. Интенсивность данного процесса зависит от характеристик гетероструктуры и от технологии ее изготовления, информация о которых является неполной.

Для выявления причинно-следственных связей, определяющих постепенные отказы, разработана схема формирования эксплуатационных параметров См РТД СВЧ с учетом деградационных процессов, обусловленных диффузионными явлениями в РТС РТД, и конструкторско-технологических особенностей производства изделия (рис. 1).

Особенность этой схемы состоит в том, что пространство ее «исходов» определяется множеством различных вариантов построения РТС, которая обеспечивает заданные выходные электрические характеристики изделия в целом.

Формализация структурной схемы в виде математической модели позволяет исследовать характер изменения показателей надежности смесителя в зависимости от интенсивности протекания диффузионных процессов в РТС. Модель объединяет три расчетных модуля. Модуль 1 предназначен для расчета изменения характеристик РТС РТД

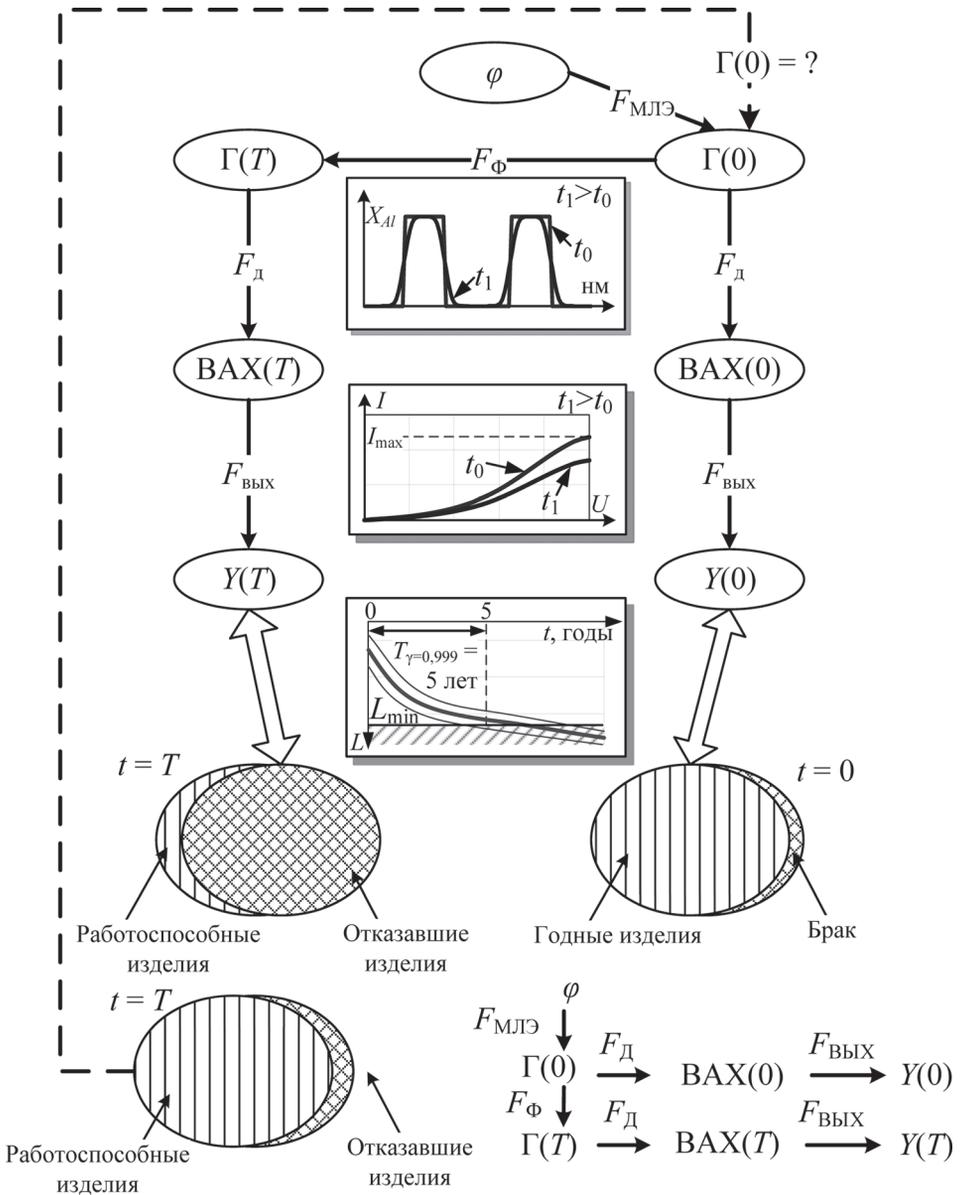


Рис. 1. Структурная схема формирования эксплуатационных параметров смесителя РТД СВЧ с учетом деградационных процессов:

φ – пространство возможных параметров РТС; $\Gamma(0)$ – параметры РТС, $t = 0$; $BAX(0)$ – вольт-амперная характеристика диода, $t = 0$; $Y(0)$ – выходные параметры смесителя, $t = 0$; $F_{\text{МЛЭ}}$ – формирование параметров РТД доступными методами молекулярно-лучевой эпитаксии; $F_{\text{Д}}$ – формирование ВАХ РТД; $F_{\text{Ф}}$ – деградация РТС в процессе эксплуатации РТД; $F_{\text{ВЫХ}}$ – формирование выходных параметров См РТД СВЧ

в зависимости от времени и температуры эксплуатации изделия в результате протекания диффузионных процессов. Модуль 2 служит для моделирования ВАХ РТД, имеющих в своем составе полупроводниковые гетероструктуры с различным составом слоев (GaAs, AlGaAs и др.). Модуль 3 предназначен для оценивания изменения электрических параметров смесителя в зависимости от дрейфа ВАХ РТД.

Расчет деградиационных процессов в гетероструктуре РТД реализован в программном пакете DiRL, а для расчета ВАХ РТД использовался программный продукт VARMA, для расчета выходных электрических параметров смесителя с учетом технологических погрешностей – Microwave Office.

В соответствии с представленной математической моделью было проведено численное моделирование с целью определения характеристик РТС, изменение которых оказывает значительное влияние на дрейф ВАХ РТД и, как следствие, на значения выходных электрических параметров смесителя.

В качестве объекта моделирования был выбран типовой балансный смеситель СВЧ-диапазона (выходные электрические параметры: потери преобразования $L = 8,3$ дБ; коэффициент 1дБ-компрессии $K_{1дБ} = -14,8$ дБм). РТД реализован на основе гетероструктуры «А» (двухбарьерная симметричная GaAs-Al_xGa_{1-x}As, концентрация Si в приэлектродных слоях $5 \cdot 10^{18}$ см⁻³, толщины AlAs- и GaAs-слоев, соответственно составляют $N_b = 5$ и $N_w = 9$ монослоев, молярная доля алюминия x_{Al} в соединении Al_xGa_{1-x}As равна 1). Изменяемыми характеристиками гетероструктуры являлись N_b , N_w и x_{Al} .

Полученные результаты (табл. 1) оценивались коэффициентами чувствительности S_L и $S_{K_{1дБ}}$:

$$S_L = \frac{L_{new} - L_{исх}}{\Gamma_{i,new} - \Gamma_{i,исх}} \frac{\Gamma_{i,исх}}{L_{исх}}; \quad S_{K_{1дБ}} = \frac{K_{1дБnew} - K_{1дБисх}}{\Gamma_{i,new} - \Gamma_{i,исх}} \frac{\Gamma_{i,исх}}{K_{1дБисх}},$$

где $L_{исх}$, L_{new} – потери преобразования смесителя на РТД со структурой «А» и на РТС с изменением ее характеристики соответственно; $K_{1дБисх}$, $K_{1дБnew}$ – коэффициент 1дБ-компрессии смесителя на РТД со структурой «А» и на РТС с изменением ее характеристики соответственно; $\Gamma_{i,исх}$, $\Gamma_{i,new}$ ($i = 1, 2, 3$) – характеристика (N_b и N_w , или x_{Al}) структуры «А» и РТС с изменением ее характеристики соответственно.

Установлено, что уменьшение номинальных значений N_b и x_{Al} при прочих неизменных характеристиках рассмотренной РТС влечет за собой значительное увеличение L (см. табл. 1), тогда как номинальной толщины N_w сопровождается уменьшением номинальных значений L и расширением динамического диапазона (увеличением $K_{1дБ}$).

Таким образом, коэффициент чувствительности L и $K_{1дБ}$ к уменьшению N_w максимален на всем временном интервале (15 лет), что позволило выбрать толщину GaAs-слоя (N_w) двухбарьерной симметричной GaAs–Al_xGa_{1-x}As – РТС в качестве управляемого параметра для оптимизации смесителя.

Таблица 1

**Чувствительность выходных электрических параметров
См РТД СВЧ к изменению параметров РТС**

| Наработка, лет | $S_{L_s}, \%$ ($N_b = 5-4$) | $S_{L_s}, \%$ ($V_b = 1-0,9$) | $S_{L_s}, \%$ ($N_w = 9-8$) | $S_{K_{1дБ}}, \%$ ($N_w = 9-8$) |
|-------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| 0 | -189,0 | -13,5 | 35,4 | 16,9 |
| 0,5 | -174,6 | -10,7 | 54,2 | 15,5 |
| 2 | -151,7 | 0,8 | 39,6 | 14,5 |
| 8,5 | -137,8 | -0,7 | 26,1 | 14,9 |
| 15 | -127,3 | -0,4 | 31,6 | 12,3 |

Исследования влияния конструкторско-технологических факторов производства смесителя (погрешностей изготовления подложки, микрополосков, направленного ответвителя, сосредоточенных элементов, РТД) на формирование поля рассеивания выходных электрических параметров См РТД СВЧ позволили сделать следующие выводы. Установлено, что поле рассеивания L и $K_{1дБ}$ увеличивается при уменьшении толщин слоев РТС. Закон распределения L и $K_{1дБ}$ близок к нормальному и остается таковым на всем временном интервале. При этом доминирующее влияние на поле рассеивания L и $K_{1дБ}$ оказывают технологические погрешности РТД, определяемые выбранной технологией формирования РТС.

Таким образом, установлено, что повышение надежности См РТД СВЧ возможно с помощью оптимизации характеристик РТС диода и выборе технологической операции формирования РТС диода.

Структуру математической модели конструкторско-технологической оптимизации определяет задача максимизации гамма-процентной наработки партии смесителей РТД СВЧ при заданных конструкторских допусках на выходные параметры смесителя и технологических погрешностях на элементную базу смесителя РТД СВЧ, исходя из вариантности построения РТС и технологии ее формирования:

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

где $T_\gamma(\bar{\Gamma}, \bar{\Pi}, \bar{\Pi}_д, \bar{\Delta\Gamma}, \bar{\Delta\Pi}, \bar{\Delta\Pi}_д, \bar{\Delta Y}_k)$ – гамма-процентная наработка до отказа (целевая функция); $\bar{\Pi}, \bar{\Pi}_д$ – векторы параметров конструкции (пассивных элементов и подложки, соответственно) См РТД СВЧ; вектор параметров РТС; $\bar{\Delta\Pi}, \bar{\Delta\Pi}_д, \bar{\Delta\Gamma}$ – векторы технологических погрешностей соответствующих параметров; $\bar{\Delta Y}_k$ – допуски на электрические параметры \bar{Y} См РТД СВЧ.

При конструкторско-технологической оптимизации балансного смесителя был рассмотрен ряд модификаций базовой гетероструктуры «А» РТД (варианты отличаются значениями N_w , обеспечивая при этом необходимую степень полинома ВАХ РТД). Установлено, что постепенный отказ См РТД СВЧ определяется изменением L в процессе эксплуатации, в то время как $K_{1дБ}$ не оказывает влияния на его надежность в пределах исследуемой наработки. В табл. 2 приведены значения T_γ смесителя, годы, на основе этих вариантов РТС. Структуры, характеристики которых отличаются значением N_w , обозначены «А○» = modA – [N_w – ○], где ○ – количество монослоев GaAs, на которое толщина этого слоя меньше соответствующего слоя структуры «А».

Таблица 2

T_γ балансных См СВЧ на РТД с различными РТС

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

Как следует из приведенных данных, конструкторско-технологическая оптимизация См РТД СВЧ позволила достигнуть высоких показаний надежности: $T_{\gamma=0,9999} \approx 10$ лет. В то же время установлено, что См РТД СВЧ, реализованные на трех различных РТС «А2», «А3» и «А4», имеют близкую по значению T_γ ($T_{\gamma=0,9999}$ соответственно равную 9,1; 9,8 и 9,9 лет).

В связи с тем, что переход смесителя в неработоспособное состояние обусловлен постепенным отказом, наблюдается тенденция выделения экспертами в поле допуска электрических параметров См РТД СВЧ областей с различным «качеством» выполнения прибором

функций (с различной «вероятностью выполнения рабочих функций» [4]). Поэтому полученные перспективные варианты См РТД СВЧ (реализованные на РТС «А2», «А3» и «А4») были ранжированы по уровню групповой надежности с учетом вероятности выполнения рабочих функций смесителем, полученной методом экспертных оценок (рис. 2). Для обеспечения максимального времени пребывания См РТД СВЧ в области поля допуска с максимальной вероятностью выполнения функций была решена следующая задача:

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

где $\tilde{P}_{\phi,п} (P_{\phi}(\bar{Y}), \bar{\Gamma}, \bar{\Pi}, \bar{\Pi}_д, \bar{\Delta\Gamma}, \bar{\Delta\Pi}, \bar{\Delta\Pi}_д, \bar{\Delta Y}_{\kappa}, t)$ – интегральная функция качества партии См РТД СВЧ; $P_{\phi}(\bar{Y}) = P_{\phi,зад}(\bar{Y})$ – заданная экспертами вероятность выполнения функций См РТД СВЧ (см. рис. 2). Интегральная функция качества партии См РТД СВЧ рассчитывается по формуле

$$\tilde{P}_{\phi,п} = \int_0^{\infty} P_{\phi,п}(t) dt; \quad P_{\phi,п}(t) = P_{\phi,п}^{Y_1}(t) P_{\phi,п}^{Y_2}(t) \dots P_{\phi,п}^{Y_i}(t) \dots P_{\phi,п}^{Y_n}(t);$$

$$P_{\phi,п}^{Y_i}(t) = \frac{P_{\text{экв.п}}^{Y_i}(t)}{P_{\text{п}}^{Y_i}(t)},$$

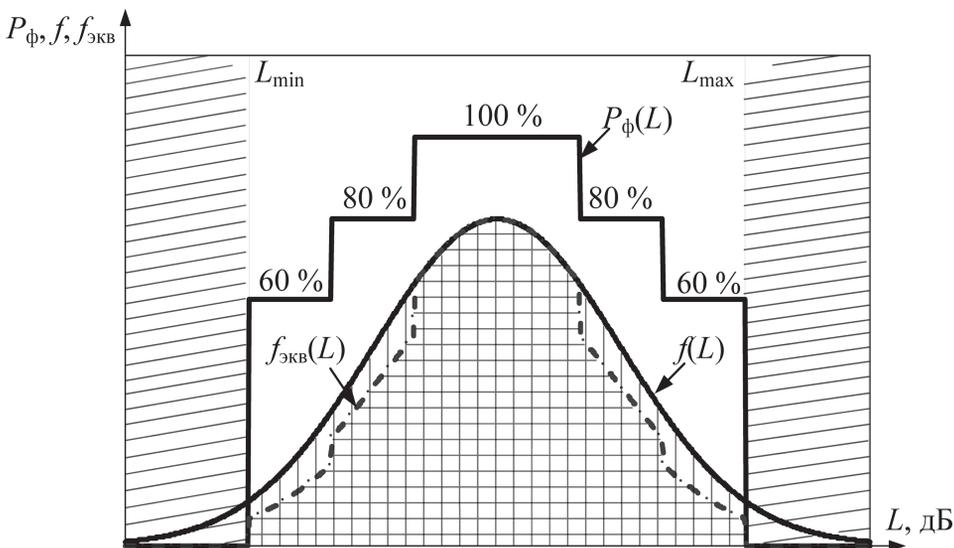


Рис. 2. Определение интегральной вероятности выполнения функций партиями См РТД СВЧ по L в фиксированный момент времени

где $P_{\phi,п}(t)$ – интегральная функция качества партии См РТД СВЧ в момент времени t ; $P_{\phi,п}^{Y_i}(t)$ – интегральная функция качества партии См РТД СВЧ в момент времени t по выходному электрическому параметру Y_i ; $P_{п}^{Y_i}(t)$ – вероятность попадания выходного параметра Y_i См РТД СВЧ в момент времени t в допустимые пределы ΔY_{ik} (вертикальная штриховка на рис. 2); $P_{экр.п}^{Y_i}(t)$ – вероятность $P_{п}^{Y_i}(t)$, скорректированная с учетом $P_{\phi}(Y_i)$ (горизонтальная штриховка на рис. 2).

Таблица 3

**Интегральная функция качества партии См СВЧ
на РТД с различными РТС**

| Структура | $T_{P_{\phi}=100\%}$ лет | $T_{P_{\phi}=80\%}$ лет | $T_{P_{\phi}=60\%}$ лет | $\tilde{P}_{\phi,п} = \int_0^{\infty} P_{п,\phi}(t) dt$ |
|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|---|
| A | 0,5 | 1,0 | 6 | 4 366 (37,0 %) |
| A1 = mod – $[N_w - 1]$ | 1,3 | 1,5 | 7,8 | 6 468 (54,9 %) |
| A2 = mod – $[N_w - 2]$ | 1,9 | 2,4 | 12,5 | 10 260 (87,1 %) |
| A3 = mod – $[N_w - 3]$ | 4,3 | 5,3 | 7,2 | 11 780 (100 %) |
| A4 = mod – $[N_w - 4]$ | 2,8 | 5,7 | 8,3 | 11 270 (95,6 %) |

Как показали проведенные исследования, оптимальным является См РТД СВЧ, реализованный на структуре «A3» (табл. 3), так как он характеризуется наиболее продолжительным пребыванием в области 100%-й вероятности выполнения функций смесителем ($T_{P_{\phi}=100\%} \approx 4$ года) и минимальным временем пребывания в области низкой P_{ϕ} ($T_{P_{\phi}=60\%} \approx 7$ лет), а, следовательно, и максимальной ($\tilde{P}_{\phi,п}(t = 15 \text{ лет}) = 11 790$) целевой функцией.

Таким образом, результаты математического моделирования позволяют сделать вывод, что за счет 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 показателей надежности ($T_{\gamma=0,9999} > 10$ лет) связано с расширением зоны конструкторско-технологической оптимизации за счет разработки дополнительных технологических контрольно-диагностических мероприятий, направленных на определение надежности каждого смесителя в партии. В частности, как показывают расчеты, уровень надежности $T_{\gamma=0,9999}$ составляет 15 лет, могут обеспечить только 8 % изделий партии См РТД СВЧ, выявить которые можно методом термотестирования на этапе сборки.

Экспериментальные исследования, результаты которых представлены на рис. 3, подтверждают повышение надежности путем проведения оптимизации См РТД СВЧ и введения операции термотестирования смесителей на этапе их сборки.

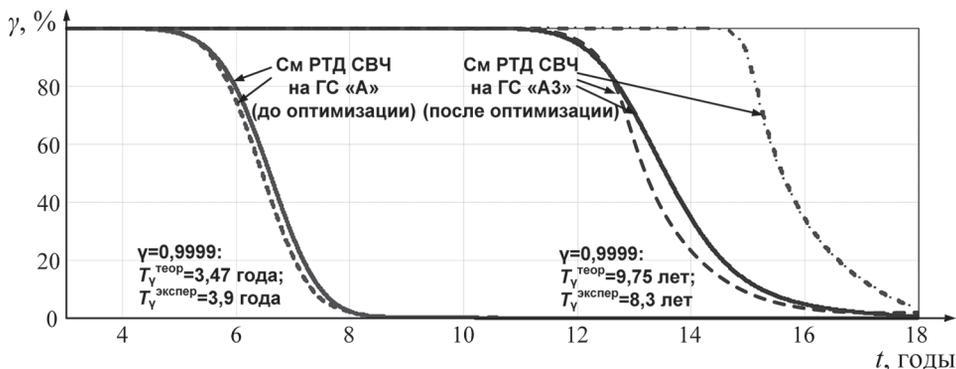


Рис. 3. Вероятность безотказной работы См РТД СВЧ, реализованных на РТС «А» и «А3»:

сплошная линия – теоретическая надежность партии; пунктирная – экспериментальная надежность партии; пунктирная с точкой – надежность 8 % партии после термотестирования, обеспечивающего $T_{\gamma=99,99\%} = 15$ лет

Для реализации рассмотренной конструкторско-технологической оптимизации См РТД СВЧ построен алгоритм методики ее выполнения, который состоит из двух модулей. Первый модуль позволяет решить задачу достижения максимально возможного или требуемого значения выбранного показателя надежности (T_{γ} – в случае 100%-й вероятности выполнения функций смесителя в пределах допуска на выходные электрические параметры; интегральной функции качества партии См РТД СВЧ – в случае проранжированного экспертами поля допуска выходных электрических параметров смесителя). Входными данными алгоритма являются: заданное значение γ (для задачи максимизации T_{γ}) или T_{γ} (для задачи достижения заданного уровня надежности), предельные значения выходных электрических параметров смесителя, а также возможные параметры слоев РТС (толщины и состав слоев) РТД, их технологических отклонений соответствующих методов эпитаксии. На выходе, исходя из физических закономерностей старения РТС, получают конструктивно-технологические характеристики См РТД СВЧ с прогнозом значения T_{γ} .

Для селекции изделий по группам с заданными показателями надежности (например, превышающими для рассмотренного примера $T_{\gamma=0,99} \approx 11,7$ лет, $T_{\gamma=0,999} \approx 10,6$ лет, $T_{\gamma=0,9999} \approx 9,8$ лет) в технологический процесс производства вводится операция термотестирования.

Это и есть второй модуль методики, задача которой – непосредственная экспериментальная оценка индивидуальной надежности каждого См РТД СВЧ в партии и последующая селекция высоконадежных изделий.

В основу термотестирования заложен принцип искусственного старения изделия путем воздействия температурного фактора (ускоренные испытания). Выбор температурного режима в зависимости от заданного временного диапазона эксплуатации изделия осуществляется на основе моделирования процессов деградации изделия в диапазоне физически допустимых температур. Испытания при таких температурах инициируют отказы, связанные с высокой энергией активации процесса деградации. При этом режимы технологических испытаний уменьшают ресурс изделия не более чем на 5 %.

Таким образом, реализация разработанной методики обеспечения заданного уровня надежности смесителя СВЧ за счет его конструкторско-технологической оптимизации позволяет обеспечить необходимый потребителю уровень надежности изделия авиационно-космического приборостроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов Ю. А., Мешков С. А., Синякин В. Ю., Федоренко И. А., Федоркова Н. В., Федоров И. Б., Шашурин В. Д. Повышение показателей качества радиоэлектронных систем нового поколения за счет применения резонансно-туннельных нанодиодов // Наноинженерия в приборостроении. – 2011. – № 1. – С. 34–43.
2. Иванов Ю. А., Мешков С. А., Синякин В. Ю., Федоренко И. А., Федоркова Н. В., Федоров И. Б., Шашурин В. Д. Повышение показателей качества радиоэлектронных систем нового поколения за счет применения резонансно-туннельных нанодиодов (продолжение) // Наноинженерия в приборостроении. – 2011. – № 2. – С. 20–22.
3. 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.
4. Оценка показателей качества на этапах проектирования и производства электронных устройств в условиях применения высоких технологий / Ю. П. Ермолаев [и др.]. – Казань: Новое знание, 2006. – 96 с.

Статья поступила в редакцию 30.05.2012