электронное научно-техническое издание
НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ
Эл № ФС 77 - 30569. Государственная регистрация №0421100025. ISSN 1994-0408

Анализ влияния технологических погрешностей на выходные электрические параметры СВЧ смесителей радиосигналов на резонансно-туннельных диодах.

77-30569/228502

12, декабрь 2011

Шашурин В. Д., Ветрова Н. А., Скороходов Е. А.

УДК 621.382

МГТУ им. Н.Э.Баумана
shashurin@bmstu.ru;
vetrova@bmstu.ru

Улучшение технических характеристик СВЧ смесителей радиосигналов возможно благодаря применению резонансно-туннельных диодов (РТД) с необходимой формой вольтамперной характеристики (ВАХ), позволяющей уменьшить количество комбинационных составляющих в спектре выходного сигнала без применения фильтров [1, 2].

В настоящее время конструктивно смесители радиосигналов на резонансно-туннельных диодах СВЧ диапазона (См РТД СВЧ) реализуются в виде гибридной (реже монолитной) интегральной схемы. Конструкция См РТД СВЧ включает в себя подложку, на которой реализуется интегральная схема, расположенные на ней пассивные элементы и, собственно, РТД.

В технологическом цикле изготовления смесителя можно выделить два базовых процесса. Первый – это изготовление основного элемента – РТД с заданной формой ВАХ под конкретный тип преобразователя радиосигналов. Основу этого технологического процесса составляет операция формирования гетероструктуры (например, *GaAs-AlGaAs*), так как именно ее характеристики определяют форму ВАХ РТД, а погрешности операции определяют величину поля рассеивания последней. Второй основной базовый технологический процесс изготовления См РТД СВЧ – это изготовление пассивных элементов (микрополосков, сосредоточенных элементов и т. д.), формирование контактов, реализация межсоединений, корпусирование и т. д. Эти технологические операции давно известны и хорошо технологически отработаны.

Исследования, проведённые в МГТУ им. Н. Э. Баумана [1], показали, что «слабым местом» с точки зрения надежности смесителя является РТД. Установлено, что доля отказов пассивных элементов смесителя мала, а доминируют постепенные отказы РТД, обусловленные деградационными процессами в ГС. Интенсивность данного процесса зависит от характеристик гетероструктуры и от технологии ее изготовления.

Разработана структурная схема формирования эксплуатационных параметров См РТД СВЧ с учетом деградационных процессов, обусловленных диффузионными явлениями в резонансно-туннельной структуре диода, и конструкторско-технологических особенностей производства изделия, которая сводится к виду, приведенному на рис. 1 (на котором приняты следующие обозначения: φ - пространство возможных параметров ГС; Г(0) – параметры ГС в t=0; ВАХ(0) – вольтамперная характеристика диода в t=0; Y(0) – выходные параметры смесителя в t=0; $F_{МЛЭ}$ – формирование параметров РТД доступными методами эпитаксии; $F_д$ – формирование ВАХ РТД; $F_Ф$ – деградация РТС в процессе эксплуатации РТД; $F_{вых}$ – формирование выходных параметров См РТД СВЧ).

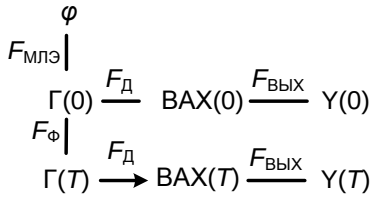

Рис. 1. Формализация структурной схемы формирования эксплуатационных параметров См РТД СВЧ

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 электрических параметров смесителя в зависимости от интенсивности протекания диффузионных процессов в РТС. Системно модель объединяет три расчётных модуля. Модуль 1 предназначен для расчёта изменения характеристик РТС РТД в зависимости от времени и температуры эксплуатации изделия в результате протекания диффузионных процессов. Модуль 2 предназначен для моделирования ВАХ РТД, имеющих в своём составе полупроводниковые гетеростуктуры с различным составом слоёв (*GaAs*, *AlGaAs*, и др.). Модуль 3 предназначен для оценивания изменения электрических параметров

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

Модель позволяет решить важную для обеспечения заданного уровня надежности См РТД СВЧ (особенно остро [**Ошибка! Закладка не определена.**] стоящей в следующих областях применения: космического, авиационного и специального приборостроения) задачу анализа влияния технологических погрешностей на выходные электрические параметры См РТД СВЧ.

Для исследования влияния технологических погрешностей на электрические параметры См РТД СВЧ необходимо учесть корреляционные связи между различными параметрами топологии. Можно выделить следующие группы технологических погрешностей [2], влияющих на электрические параметры смесителя: погрешности направленного ответвителя, полосков, подложки, диодов. Для этих четырёх групп реально могут быть определены лишь связи между погрешностями микрополосков и направленного ответвителя.

Пример, изображенный на рис. 2, демонстрирует образование корреляционных связей между ширинами и длинами микрополосков на примере «ступеньки» трансформатора. Так как рассматриваются погрешности процесса фотолитографии, то при изменении параметра ширины $W1$ на некую величину 2Δ, параметр $L1$ меняется на величину Δ, но с противоположным знаком. Т. е. коэффициент корреляционной связи между величинами $W1$ и $L1$ должен быть принят равным 1. С другой стороны, при изменении параметра $L1$ на Δ, связанный с ним параметр ширины $L2$ изменится на ту же величину Δ, с противоположным знаком. Т. е. коэффициент корреляционной связи между параметрами $L1$ и $L2$ можно принять равным – 1.

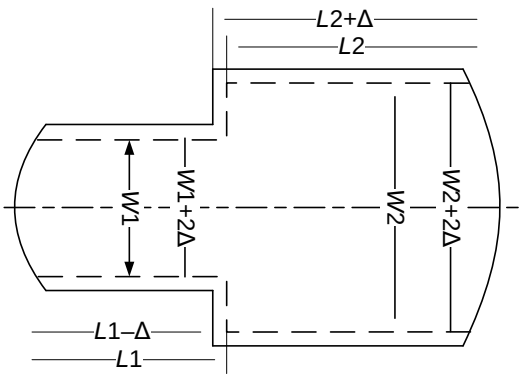

Рис. 2. Оценка корреляционных связей параметров микрополосков (погрешности фотолитографии) на примере «ступеньки» трансформатора

Таким образом, при технологической погрешности в металлизации равной Δ=±0,01 мм, принимая для «ступеньки» трансформатора справедливым нормальный закон рассеяния параметра ширины *L*2 с математическим ожиданием MO_{L2} и среднеквадратическим отклонением (СКО) $\sigma_{L2} = \Delta/3$, тогда будут справедливы зависимости учета корреляционных связей (1).

$$L1=-1\cdot L2 + (MO_{L2}+ MO_{L1});$$

$$W1=2\cdot L2 + (-2\cdot MO_{L2}+ MO_{W1}); \quad , \qquad (1)$$

$$W2=2\cdot L2 + (-2\cdot MO_{L2}+ MO_{W2}).$$

Для ответвителя Ланге важными параметрами являются не только длины и ширины микрополосков, но также и ширины зазоров между ними (рис. 3). Поэтому для задания корреляционных зависимостей в Microwave Office необходимо учитывать, что параметры *S* и *W* связаны коэффициентом корреляции равным -1.

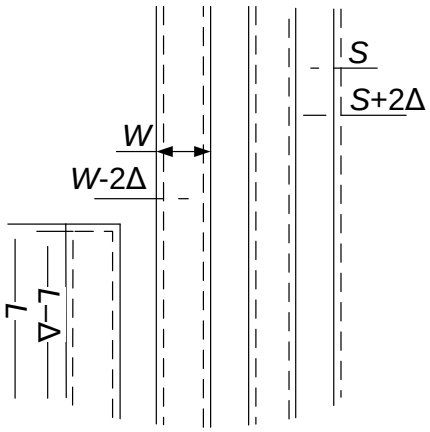

Рис. 3. Оценка корреляционных связей параметров микрополосков (погрешности фотолитографии) на примере ответвителя Ланге

Т. е. для ответвителя Ланге будут справедливы следующие зависимости учета корреляционных связей (2).

$$L=1\cdot L2 + (-MOL2+ MOL);$$

$$W=2\cdot L2 + (-2\cdot MOL2+ MOW); \qquad (2)$$

$$S=-1\cdot L2 + (MOL2+ MOS).$$

Соотношения различных параметров в Microwave Office можно задать при помощи инструмента создания переменных и формул. В разделе проекта Global Definitions задавались формулы, моделирующие связь параметров См РТД СВЧ. При этом полагалось, что корреляционные связи есть только между параметрами металлизации, как определено выше. Параметры подложки, ёмкости, индуктивности и диодов меняются независимо.

Проведено численное моделирование балансного См РТД СВЧ (f_c=11,05 ГГц; P_c=-20 дБм; $f_г$=11,4 ГГц; $f_{пч}$=350 МГц) на РТД с симметричной двухбарьерной *GaAs - AlAs* – резонансно-туннельной гетероструктурой, условно названной структурой «***A***», высоты V_b симметричных барьеров которой составляют 1эВ, уровень Ферми E_f = 0,077 эВ, толщина потенциальной ямы N_w = 9 монослоев GaAs; толщины барьеров N_{b1} = N_{b2} = 5 монослоев AlAs, площадь S = 900 мкм^2.

При моделировании принимались следующие значения технологических погрешностей параметров, меняющихся независимо: толщины подложки (ΔH) ±0,05 мм; диэлектрической проницаемости подложки (ΔEr) ±0,2 мм; емкости и индуктивности ±20 % от номинального значения. Ширина поля разброса вольтамперных характеристик диодов (ΔВАХ) определялась на основе данных о технологических погрешностях параметров гетероструктуры $\Delta N_{b1} = \Delta N_{b2} = \pm 1$ монослой $Al_xGa_{1-x}As$; $\Delta V_{b1} = \Delta V_{b2} = \pm 0{,}1$ эВ, т. е. $x_{Al} = \pm 0{,}1$ эВ; $\Delta N_w = \pm 1$ монослой $GaAs$; $\Delta E_{f1} = \Delta E_{f2} = \pm 0{,}01$ эВ (в предположении нормального закона распределения этих параметров) на основе математической модели формирования функции $F_Д$ (рис. 1) методом Монте-Карло. В результате расчета (рис. 4) получено значение ширины поля рассеивания ВАХ РТД при изготовлении резонансно-туннельной структуры методом молекулярно-лучевой эпитаксии 2% (ΔВАХ=2 %).

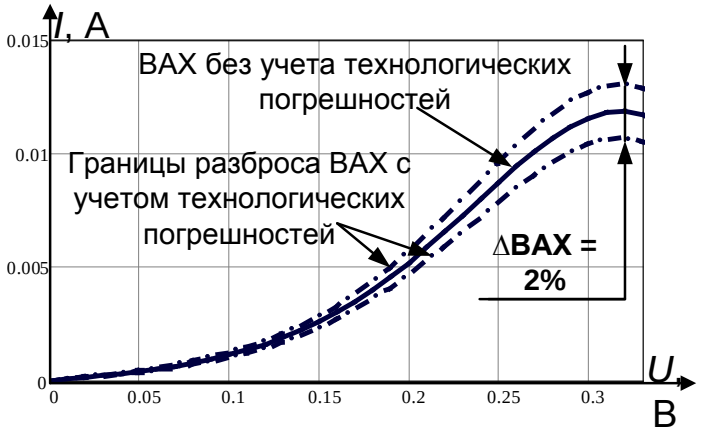

Рис. 4. Технологическая погрешность ВАХ РТД (ΔВАХ)

В Microwave Office отсутствуют средства для построения гистограмм распределения измеряемых параметров устройства. Поэтому для получения гистограмм использовался встроенный в программу модуль, предназначенный для определения вероятности выхода годных изделий методом Монте-Карло. Предполагаемый диапазон разброса параметров смесителя разбивался на интервалы. Поочерёдно задавая в целях вероятностного анализа границы нового интервала, определялась вероятность попадания интересующего нас параметра в заданные границы.

Таким способом была определена ширина поля рассеивания (%) потерь преобразования L и коэффициента 1 дБ компрессии K_{1dB} при наличии: только погрешностей металлизации (a); погрешностей подложки (b); погрешностей емкостей и индуктивностей (c); погрешностей изготовления РТД при условии, что диоды подобраны в пару ($d1$); погрешностей гетероструктуры при условии, что диоды подобраны не в пару ($d2$). Также для определения совокупного влияния на электрические параметры смесителя были произведены 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 ($a+b+c+d2$). Численные значения этих полей рассеивания приведены в таблице 1 и на рис. 5 – рис. 6.

Таблица 1.

Ширина поля рассеивания (%) L и K_{1dB} при наличии a, b, c, $d1$ и $d2$ технологических погрешностей

	a	b	c	$d1$	$d2$	$a+b$	$a+b+c$	$a+b+c+d1$	$a+b+c+d2$
ΔL	2,18	2,27	1,75	3,59	2,82	4,27	4,66	5,60	5,05
ΔK_{1dB}	1,28	2,29	1,96	4,08	3,35	3,88	4,01	6,21	5,79

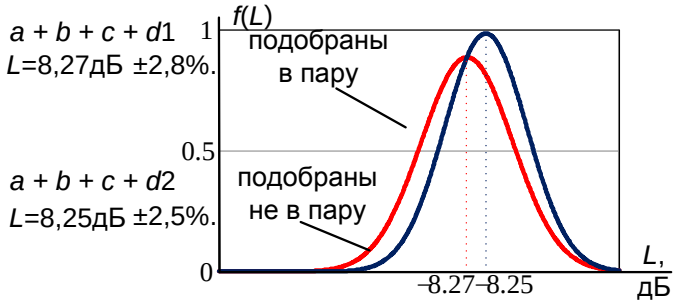

Рис. 5. Влияние погрешности подбора в пару диодов на поле рассеивания значений потерь преобразования

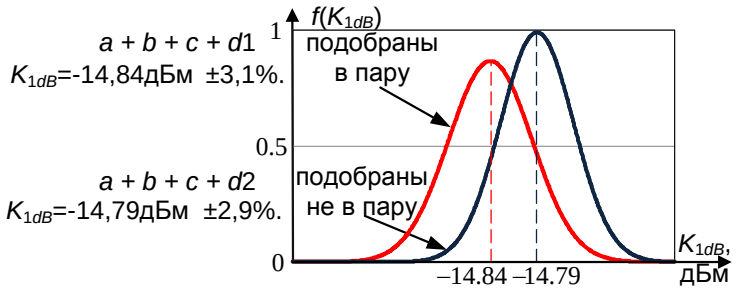

Рис. 6. Влияние погрешности подбора в пару диодов на поле рассеивания значений коэффициента 1 дБ – компрессии

Для проверки адекватности полученных расчетов влияния технологических погрешностей См РТД СВЧ на его электрические параметры был проведен проверочный расчет по формуле квадратичного суммирования погрешностей (сумма квадратов составляющих погрешностей должна быть равна квадрату общей погрешности - данная формула применима, так как между данными параметрами нет корреляционных связей). Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Расчетные и моделируемые значения ширины поля рассеивания (%) L и K_{1dB} при совместном влиянии технологических погрешностей

	$a+b$	$a+b+c$	$a+b+c+d1$	$a+b+c+d2$
ΔL	3,15* (4,27**)	3,60 (4,66)	5,08 (5,60)	4,57 (5,05)
ΔK_{1dB}	2,62 (3,88)	3,27 (4,01)	5,23 (6,21)	4,68 (5,79)
* - расчетное значение; ** - значение, получаемое при моделировании совместного влияния				

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что подбор диодов в пару не оказывает сколь-нибудь значимого влияния на ширину поля рассеивания параметров смесителя. Это можно объяснить возникновением взаимных компенсаций различных типов погрешностей. Также, из таблицы 1 видно, что наибольший вклад в поле рассеивания электрических параметров См РТД СВЧ дают погрешности диодов.

Полученные при моделировании гистограммы разброса значений L и K_{1dB} позволили сделать вывод о том, что рассматриваемые выходные электрические параметры См РТД СВЧ (см. рис. 5 –) согласно критерию Пирсона подчиняются нормальному закону распределения (при уровне значимости не ниже α=0,01).

Далее по этой же методике учета совместного влияния технологических погрешностей См РТД СВЧ было проведено исследование влияния толщины ямы симметричной двухбарьерной гетероструктуры на выходные параметры балансного СВЧ смесителя в процессе деградации.

Обозначим «mod***A***-[N_w-k]» (или «**A**k») смесители на РТД на структурах, отличающихся от гетероструктуры «***A***» толщиной наноразмерного нелегированного слоя *GaAs*, образующего потенциальную яму на профиле потенциальной энергии резонансно-туннельной структуры из-за разницы в уровне зоны проводимости *GaAs* и $Al_xGa_{1-x}As$ на k монослоев *GaAs*.

Анализ полученных результатов (часть которых приведена на рис. 7 –) показал, что закон распределения потерь преобразования и коэффициента 1-дБ компрессии под влиянием технологических погрешностей при различных значениях толщины слоя *GaAs* резонансно-туннельной структуры является нормальным (согласно критерию Пирсона) и остается таковым (согласно критерию Фишера) на рассмотренной наработке (15 лет). Разброс же рассмотренных выходных параметров увеличивается при уменьшении толщин слоев гетероструктуры.

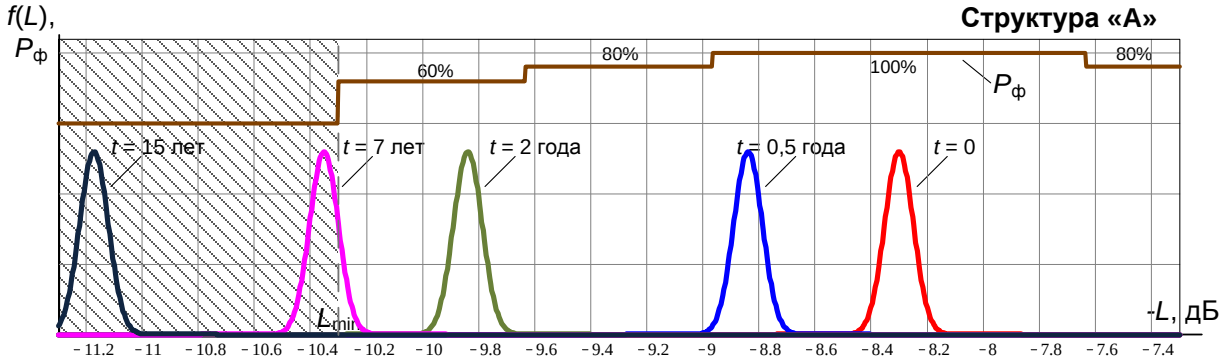

Рис. 7. Влияние деградации РТД на плотность распределения потерь преобразования $f(L)$ См РТД СВЧ, реализованного на РТД «***A***»

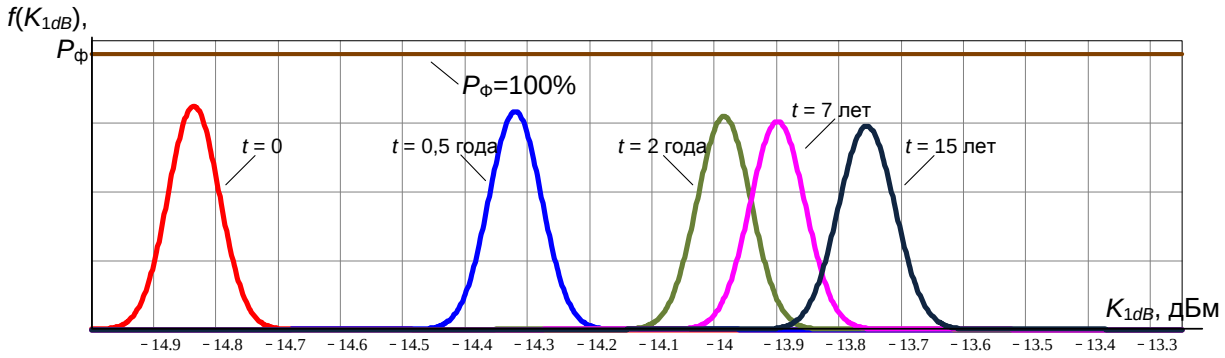

Рис. 8. Влияние деградации РТД на плотность распределения коэффициента 1дБ-компрессии $f(K_{1dB})$ См РТД СВЧ «***A***»

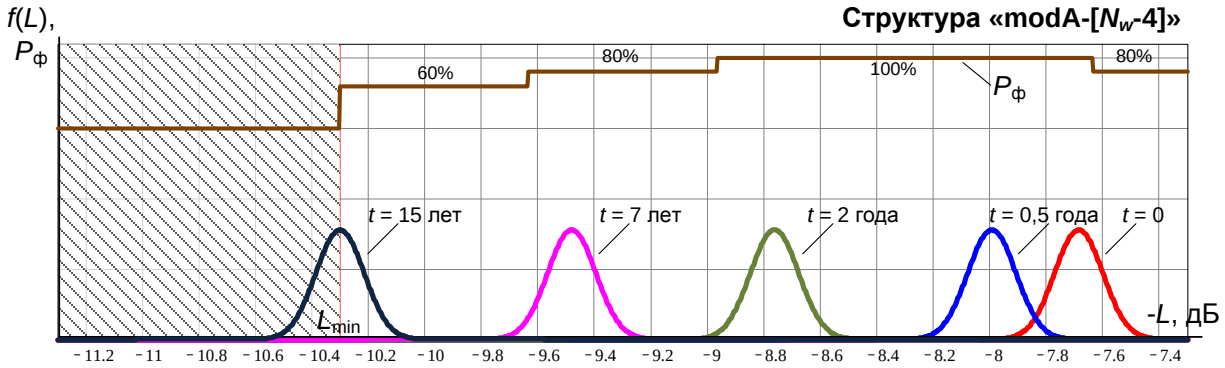

Рис. 9. Влияние деградации РТД на плотность распределения потерь преобразования $f(L)$ См РТД СВЧ, реализованного на РТД «**mod*A***-[N_w-4]»

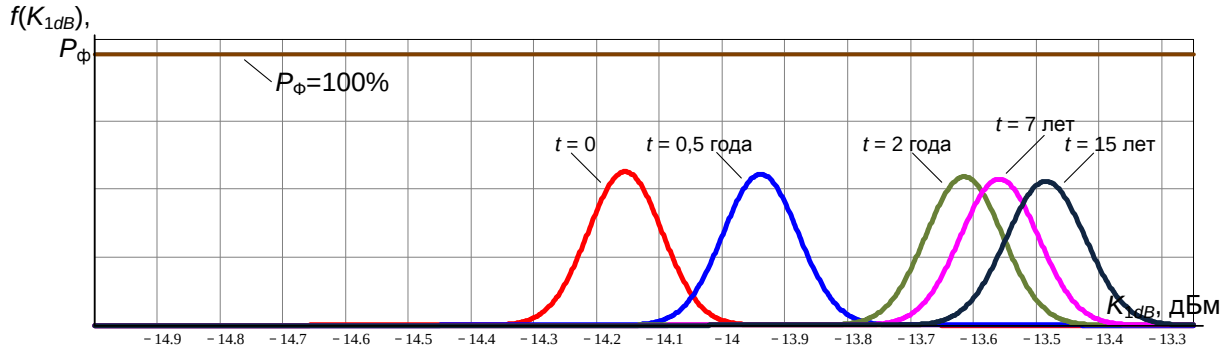

Рис. 10. Влияние деградации РТД на плотность распределения коэффициента 1дБ-компрессии $f(K_{1dB})$ См РТД СВЧ «**mod*A***-[N_w-4]»

Экспериментальная оценка (*таблица 3*) вероятностных характеристик L и $K_{1дБ}$ смесителя подтвердила теоретический вывод о гауссовском характере и параметрах распределения исследуемых параметров. Подтверждено, что при уменьшении значения

управляемого параметра увеличивается коэффициент вариации выходных параметров См РТД СВЧ.

Таблица 3.

Теоретические и экспериментальные значения потерь преобразования См РТД СВЧ, реализованных на структурах: *а*) «***А***», *б*) «***А3***»

Изделие	Вид данных	Исследуемый параметр	Время, 10^3 час (годы)						
			0 (0)	6 (0,5)	18 (2)	35 (4)	66 (7,5)	87 (10)	130 (15)
А	Теоретический	*L* (дБ)	8,27	8,92	9,79	10,06	10,40	10,66	11,17
		3σ (%)	2,79	2,59	2,36	2,30	2,22	2,17	2,07
	Экспериментальный	*L* (дБ)	8,4	8,7	9,9	10,1	10,5	10,7	11,3
		3σ (%)	2,81	2,71	2,38	2,33	2,24	2,20	2,08
	Погрешность, %	*L*	1,57	2,47	1,12	0,40	0,96	0,38	1,16
		3σ (%)	0,7	4,6	0,8	1,3	0,9	1,4	0,5
А3	Теоретический	*L* (дБ)	7,76	7,99	8,51	8,92	9,38	9,69	10,31
		3σ (%)	6,7	6,5	6,2	5,9	5,6	5,4	5,1
	Экспериментальный	*L* (дБ)	7,9	8,15	8,55	9,1	9,5	9,75	10,4
		3σ (%)	7,9	7,7	7,3	6,9	6,6	6,4	6,0
	Погрешность, %	*L*	1,8	2,0	0,5	2,0	1,3	0,6	0,9
		3σ (%)	16,9	17,9	17,7	16,9	17,8	18,5	17,6

Проведенные исследования влияния констукторско-технологических факторов производства смесителя (погрешностей изготовления подложки, микрополосков, направленного ответвителя, сосредоточенных элементов, РТД) на формирование поля рассеивания выходных электрических параметров См РТД СВЧ позволили установить, что поле рассеивания L и K_{1dB} увеличивается при уменьшении толщин слоев ГС. Закон распределения L и K_{1dB} близок к нормальному и остается таковым на всем временном интервале. При этом доминирующее влияние на поле рассеивания L и K_{1dB} оказывают

технологические погрешности РТД, определяемые выбранной технологией формирования ГС.

Таким образом, анализ влияния технологических погрешностей на выходные электрические параметры См РТД СВЧ показал, что погрешности очень чувствительны к изменению толщин нанослоев РТД, определяют годность партии смесителей, влияние их в процессе деградации изделия остается стабильным.

Результаты получены в ходе поисковой научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Список литературы

1. Повышение показателей качества радиоэлектронных систем нового поколения за счет применения резонансно-туннельных нанодиодов / Ю. А. Иванов, С. А. Мешков, В. Ю. Синякин, И. А. Федоренко, Н. В. Федоркова, И. Б. Федоров, В. Д. Шашурин // Наноинженения в приборостроении. – 2011. – №1. – С. 34-43.

2. Патент 2372691 (РФ). Наноэлектронный полупроводниковый смесительный диод / В. М. Башков, Ю. А. Иванов, В. Д. Шашурин и др. // Б. И. – 2009. - №14.

3. Хныкина С. В. Разработка операционной технологии термоиспытаний с целью оценки надежности смесителей радиосигналов на основе резонансно-туннельного диода: Дис. … канд. техн. наук. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 133 с.

4. 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.

electronic scientific and technical periodical
SCIENCE and EDUCATION
EL № FS 77 - 30569. №0421100025. ISSN 1994-0408

Analysis of the impact of the technological errors on the output electrical parameters of microwave radio signals mixers based on resonant tunneling diodes.

77-30569/228502

12, December 2011

Shashurin V.D., Vetrova N.A., Skorohodov E.A.

Bauman Moscow State Technical University
shashurin@bmstu.ru;
vetrova@bmstu.ru

The authors carried out an analysis of the impact of technological errors on the output electrical parameters of microwave radio signals mixers based on resonant tunneling diodes and stability of this impact in time (in the process of degradation products) . Obtained results are very important for their technological optimization according to the reliability criterion.

Publications with keywords: nanodevices, radio signals mixers, resonant tunneling diode, reliability
Publications with words: nanodevices, radio signals mixers, resonant tunneling diode, reliability

Reference

1. Iu. A. Ivanov, S. A. Meshkov, V. Iu. Siniakin, I. A. Fedorenko, N. V. Fedorkova, I. B. Fedorov, V. D. Shashurin, Nanoinzheneniia v priborostroenii 1 (2011) 34-43.
2. V. M. Bashkov, Iu. A. Ivanov, V. D. Shashurin, et al., Patent 2372691 RF, 2009.
3. Khnykina S.V., Cand.Sci.Tech. dissertation, Moscow, BMSTU, 2008, 133 p.
4. P. Bushminskii, D. I. Kuznetsov, A. A. Romanov, et al., Reception systems of satellite television, Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana - BMSTU Press, 2002, 320 p.