

Определение управляемых параметров для конструкторско-технологической оптимизации СВЧ смесителей радиосигналов на резонансно-туннельных диодах по критерию их надежности. 77-30569/228008

10, октябрь 2011

Шашурин В. Д., Ветрова Н. А., Назаров Н. В.

УДК 621.382

МГТУ им. Н.Э. Баумана

shashurin@bmstu.ru

vetrova@bmstu.ru

Тенденции развития современных радиоэлектронных систем связи предполагает улучшение их технических характеристик (увеличение объема и скорости передачи данных), что требует повышения пропускной способности систем связи. Это заставляет не только переходить на более высокие рабочие частоты, но и искать пути расширения полосы пропускания узлов приёмных и передающих устройств.

Одним из важных узлов, во многом определяющим характеристики приемного тракта системы связи, является нелинейный преобразователь сигнала – смеситель [1]. Существенное улучшение потребительских характеристик систем связи достигается за счёт принципа преобразования частоты принимаемого сигнала – переноса его в частотную область, где он может быть обработан с наибольшей эффективностью. При этом от качества преобразования сигнала смесителем во многом зависят выходные параметры системы 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 формы вольтамперной характеристики (ВАХ) нелинейного элемента, на основе которого выполнен смеситель. Существующие смесители радиосигналов традиционно строятся на основе диода с барьером Шоттки, который имеет экспоненциальную ВАХ. Устранение паразитных продуктов частотного преобразования осуществляется за счёт включения в цепь смесителя частотных фильтров, что усложняет его схему, увеличивает габариты, повышает цену и снижает надёжность. Кардинальным способом улучшения

технических характеристик смесителей радиосигналов является применение нелинейного элемента с ВАХ отличной от экспоненты, что позволяет уменьшить количество интермодуляционных составляющих в спектре выходного сигнала и в результате расширить полосу рабочих частот без применения фильтров [2].

Таким перспективным техническим решением является резонансно-туннельный диод (РТД) с поперечным токопереносом на базе многослойных гетероструктур A_3B_5 [3]. Квантоворазмерный эффект резонансного туннелирования сохраняется при комнатной и повышенной температурах. Изменяя характеристики гетероструктуры РТД (толщину слоев, химический состав), толщина которых составляет несколько нанометров, возможно управлять формой его ВАХ и создавать РТД с оптимальной её формой для конкретного вида нелинейного преобразования. Это позволяет повысить качество и объём передаваемой информации, что особенно важно для систем космической, спутниковой, а также мобильной связи.

Вместе с тем смесители радиосигналов на основе резонансно-туннельных диодов (См РТД), обладая улучшенными эксплуатационными характеристиками, характеризуются на сегодняшний день достаточно низкими показателями надежности (гамма-процентная наработка до отказа $T_{\gamma=0,9999}$ составляет 3-4 года [4]). В то время как для авиационного приборостроения необходимы смесители радиосигналов с $T_{\gamma=0,9999} \approx 6-8$ лет, для космической отрасли – 13-15 лет. Задача достижения указанных значений надежности может быть решена при системном подходе к этой проблеме, основанном на выявлении причинно-следственных факторов, определяющих формирование отказов смесителей и учитывающих конструкторско-технологические особенности их производства. Первоочередной задачей в этом системном подходе является выявление управляемых параметров для оптимизации См РТД СВЧ по критерию надежности.

Математическая модель формирования отображения параметров гетероструктуры РТД в пространство ВАХ диода в соответствующий момент времени t (формирование ВАХ диода в момент t) может быть основана на формуле Цу-Есаки [1]. Для вычисления прозрачности исследуемой слоистой наноструктуры необходимо решить одномерное стационарное уравнение Шредингера для одного электрона, например, методом матриц переноса.

Математическая модель деградационных процессов гетероструктуры основана на том факте, что диффузия внутри резонансно-туннельной структуры является тем определяющим процессом, который модифицирует физико-химические свойства гетероструктуры, следовательно, изменяет условия токопереноса в РТД (изменяет форму

ВАХ РТД) и, таким образом, влияет на изменение выходных электрических параметров смесителя радиосигналов. Надежность РТД на основе GaAs/Al_xGa_{1-x}As определяется скоростью диффузии алюминия в прилегающие слои, а математическая модель деградационных процессов гетероструктуры может быть построена на основе уравнения диффузии Фика (модель одномерной диффузии Al поперёк слоёв гетероструктуры разработана в [4]).

Для формирования функции отображения пространства параметров См РТД СВЧ во множество эксплуатационных характеристик смесителя в фиксированный момент времени может быть использован программный продукт Microwave Office AWR Design Environment.

В соответствии с представленной математической моделью было проведено численное моделирование для выявления параметров гетероструктуры наиболее сильно влияющих на выходные характеристики См РТД СВЧ с учетом старения гетероструктуры (т. е. дрейфа ВАХ РТД и, как следствие, выходных характеристик См РТД СВЧ). 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. Для решения обозначенной задачи исследована чувствительность основных выходных характеристик (потерь преобразования L и коэффициента 1 дБ-компрессии K_{1dB}) балансного См РТД СВЧ ($f_c=11,05$ ГГц; $P_c=-20$ дБм; $f_r=11,4$ ГГц; $f_{пч}=350$ МГц) к изменению параметров гетероструктуры (толщин барьеров и ямы, высоты барьеров). Смеситель реализован на РТД с симметричной двухбарьерной GaAs - AlAs – гетероструктурой, условно названной структурой «А» или резонансно-туннельной структурой (РТС) «А», параметры которой вместе с параметрами РТД, реализованного на этой структуре (далее – РТД «А») таковы: высоты V_b симметричных барьеров = 1эВ, $E_f=0,077$ эВ, $N_w=9$ монослоев GaAs; $N_{b1}=N_{b2}=5$ монослоев AlAs, $S=900$ мкм². Первый пик прозрачности ГС «А» для нулевого напряжения расположен на $E_0=0,19119$ эВ, его ширина на уровне 0,7 составляет $\Gamma_0=2,67\cdot10^{-5}$ эВ. Такой балансный См РТД СВЧ имеет ВАХ в начальный момент времени ($t=0$), представленную на рис. 1.

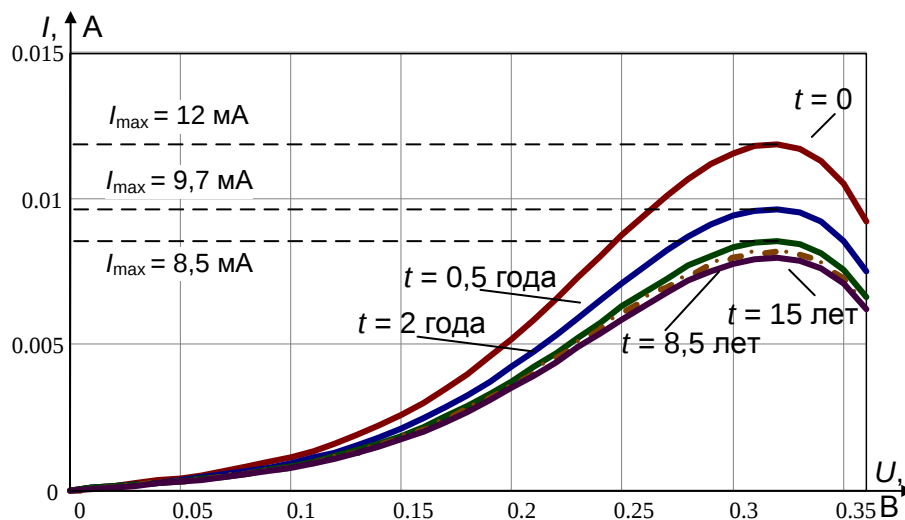


Рис. 1. Изменение во времени ВАХ РТС на основе структуры «А», обусловленное диффузией Al в прилегающие слои

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

Деградация гетероструктуры РТД (диффузия алюминия из барьерных слоёв структуры «А» в соседние слои) определяет дрейф ВАХ во времени, представленный на рис. 1.

Результаты моделирования изменения потерь преобразования $L(t)$ и коэффициента 1дБ-компрессии $K_{1dB}(t)$ в процессе деградации гетероструктуры РТД (диффузии алюминия из барьерных слоёв структуры «А» в соседние слои) приведены на рис. 2 и . Согласно этим рисункам надежность См РТД СВЧ определяется изменениями потерь преобразования в процессе деградации.

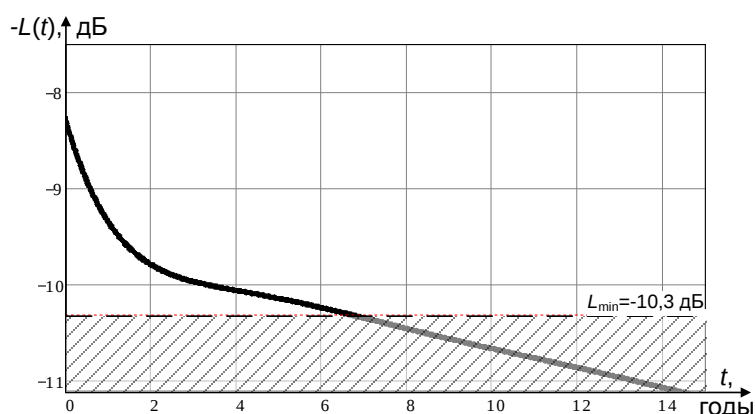


Рис. 2. «Старение» См РТД СВЧ, реализованного на гетероструктуре «А», по потерям преобразования $L(t)$

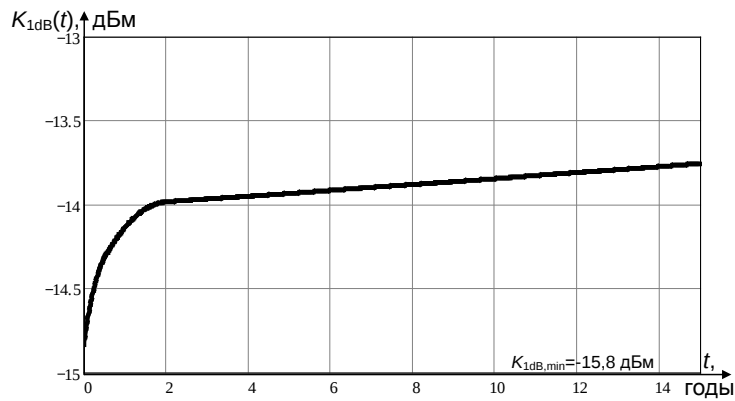


Рис. 3. Изменение коэффициента 1дБ-компрессии $K_{1dB}(t)$ См РТД СВЧ, реализованного на гетероструктуре «А», во времени t

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

Структуры, отличающиеся от гетероструктуры «А» одним из параметров, обозначим «modA-[*]», где в квадратных скобках [*] будем указывать собственно тот параметр, который отличает модифицированную гетероструктуру от «А», а именно: N_w – толщина наноразмерного нелегированного слоя GaAs, образующего потенциальную яму на профиле потенциальной энергии РТС из-за разницы в уровне зоны проводимости GaAs и $Al_xGa_{1-x}As$; N_b – толщина симметричных слоев $Al_xGa_{1-x}As$, так называемых, барьеров резонансно-туннельной структуры (РТС); V_b – высота барьеров симметричной РТС (разница в уровне зоны проводимости GaAs и $Al_xGa_{1-x}As$).

Исследование чувствительности выходных электрических параметров балансного См РТД СВЧ к толщине барьеров симметричной слоистой гетероструктуры N_b

При уменьшении толщины N_b симметричных барьеров слоистой наноструктуры «modA- $[N_b]$ » с 5 до 3 нанослоев AlAs: энергия E_0 резонанса примерно остается постоянной около $E_0 \approx 0,19$ эВ; ширина Γ_0 первого резонансного пика увеличивается на порядок с $3,0 \cdot 10^{-5}$ до $6,8 \cdot 10^{-4}$ эВ (ширина Γ_0 пропорциональна вероятности ухода из ямы, поэтому она растет с уменьшением толщины барьеров); амплитуда f резонанса для симметричной структуры $f = 1$. Указанная динамика позволяет ожидать увеличение

пиковых значений тока перед первым падающим участком ВАХ структур «modA-[N_b]». При увеличении же толщины N_b симметричных барьеров с 5 до 7 нанослоев AlAs, соответственно, наблюдаем противоположные изменения характеристик первого резонансного пика и пиковых значений тока перед первым падающим участком ВАХ структур «modA-[N_b]».

Для анализа влияния изменений толщин N_b симметричных барьеров на ВАХ рассматриваемой слоистой наноструктуры «A» при неизменных всех прочих параметрах моделировались структуры с толщиной симметричных барьеров от 3 до 7 монослоев AlAs (рис. 4 и рис. 5).

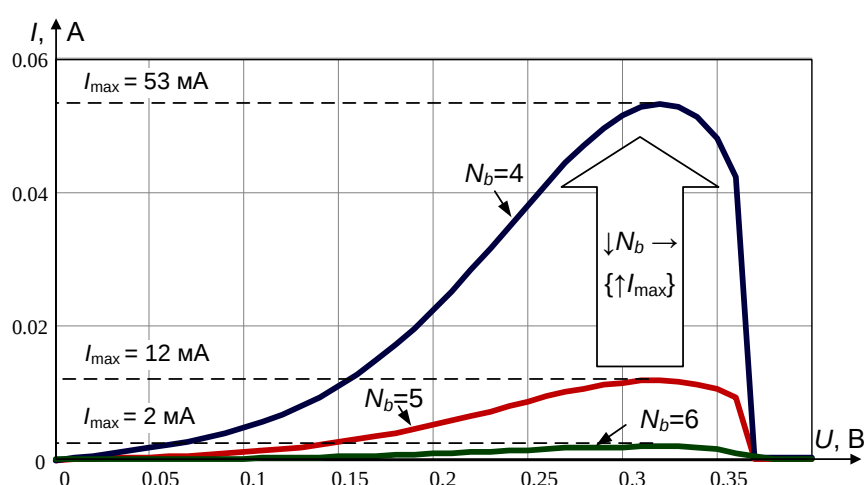


Рис. 4. Влияние толщины N_b симметричных барьеров структуры «modA-[N_b]» на её ВАХ

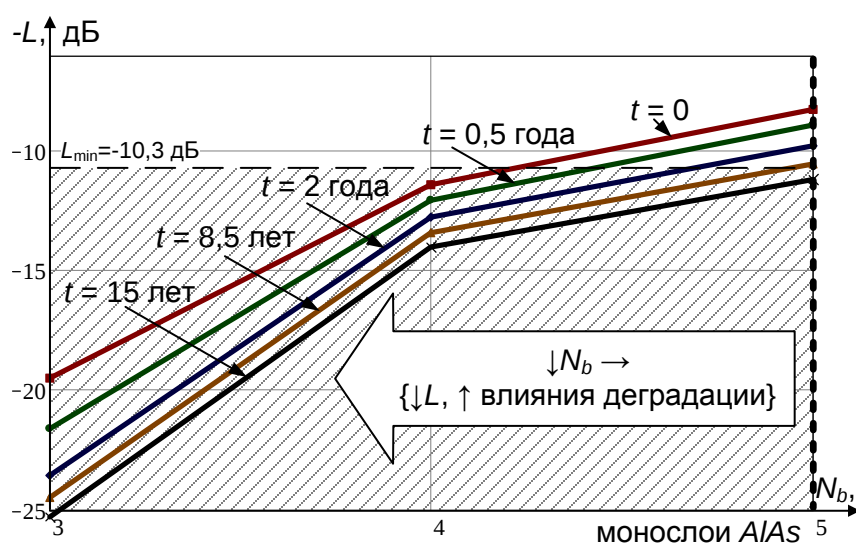


Рис. 5. Влияние толщины N_b барьеров слоистой наноструктуры «modA-[N_b]» на потери преобразования балансного смесителя на основе РТД

Коэффициент чувствительности потерь преобразования L балансного См РТД СВЧ к толщине барьеров симметричной слоистой гетероструктуры N_b рассчитаем по формуле (1):

$$S_L = \frac{L_{new} - L_{исх}}{N_{b,new} - N_{b,исх}} \cdot \frac{N_{b,исх}}{L_{исх}} \quad (1)$$

где L_{new} и $L_{исх}$ – потери преобразования См РТД СВЧ на базе гетероструктуры «modA-[N_b -1] и «А», соответственно. Численные значения коэффициента чувствительности приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Коэффициент чувствительности (%) потерь преобразования S_L к уменьшению толщины барьеров N_b гетероструктуры на 1 монослой

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

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

Исследование чувствительности выходных электрических параметров балансного См РТД СВЧ к высоте барьеров симметричной слоистой гетероструктуры V_b

Для анализа влияния изменений высоты V_b симметричных барьеров на ВАХ рассматриваемой слоистой наноструктуры «А» при неизменных всех прочих параметрах ($E_f = 0,077$ эВ; $N_w = 9$ монослоев GaAs; $N_{b1} = N_{b2} = 5$ монослоев AlAs, $S = 900$ мкм²) моделировались структуры с высотой симметричных барьеров от 1 до 0,6 эВ (рис. 6 и рис. 7).

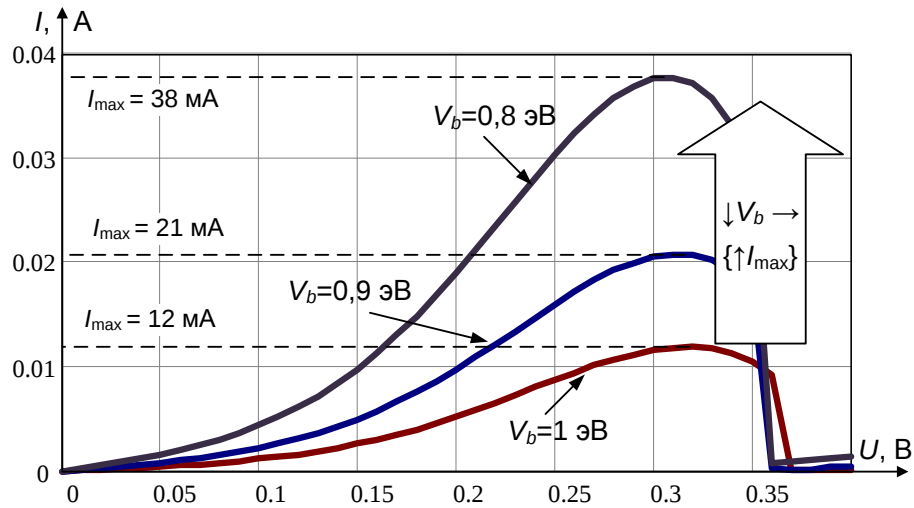


Рис. 6. Влияние высоты V_b симметричных барьеров структуры «modA-[V_b]] на ВАХ

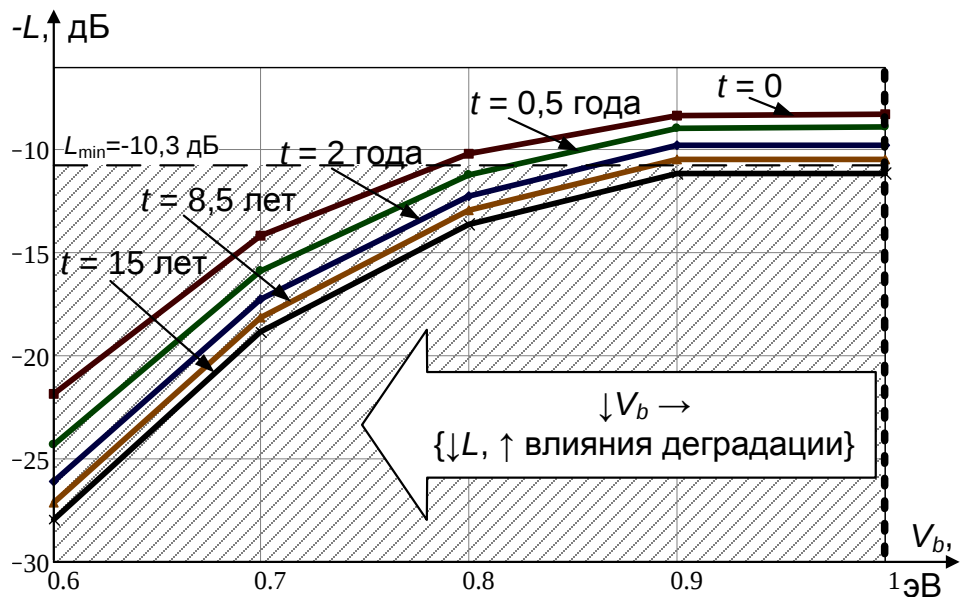


Рис. 7. Влияние высоты V_b барьеров РТД «modA-[V_b]] на потери преобразования балансного смесителя на основе РТД

Коэффициент чувствительности потерь преобразования L балансного См РТД СВЧ к высоте барьеров симметричной слоистой гетероструктуры V_b рассчитаем по формуле (2):

$$S_L = \frac{L_{new} - L_{исх}}{V_{b,new} - V_{b,исх}} \cdot \frac{V_{b,исх}}{L_{исх}} \quad (2)$$

где L_{new} и $L_{исх}$ ($V_{b,new}$ и $V_{b,исх}$) – потери преобразования См РТД СВЧ (высоты потенциальных барьеров РТД) на базе гетероструктуры «modA-[V_b -1] и «A»,

соответственно. Численные значения коэффициента чувствительности приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Коэффициент чувствительности (%) потерь преобразования S_L к уменьшению высоты барьеров V_b гетероструктуры на 0,1 эВ

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 с уменьшением толщины барьеров, уменьшение их высоты (повышение значений максимальных токов перед падающим участком) сопровождается сильным ухудшением потерь преобразования.

Исследование чувствительности выходных электрических параметров балансного См РТД СВЧ к толщине ямы симметричной слоистой гетероструктуры N_w

Для анализа влияния изменений толщины ямы на ВАХ рассматриваемой слоистой наноструктуры «А» при неизменных всех прочих параметрах ($E_f=0,077$ эВ; $V=0,9$ эВ; $N_{b1}=N_{b2}=5$ монослоев AlAs, $S=900$ мкм²) моделировались структуры с шириной ямы от 6 до 11 монослоев GaAs. Результаты моделирования приведены на рис. 8 - рис. 10.

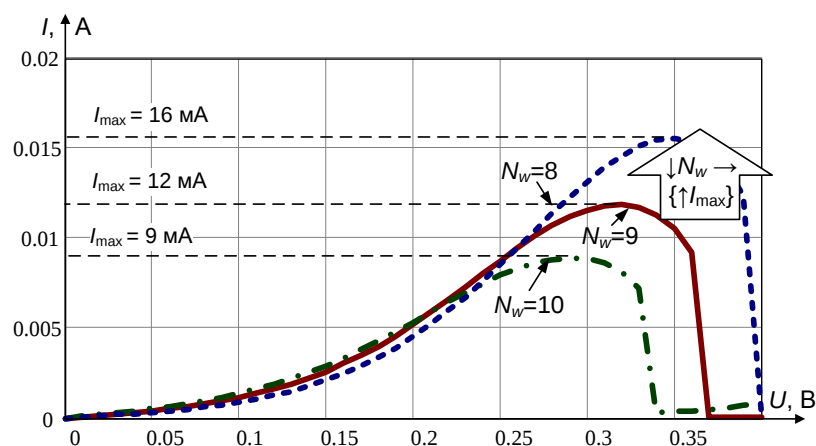


Рис. 8. Влияние толщины ямы N_w структуры «modA- $[N_w]$ » на ВАХ

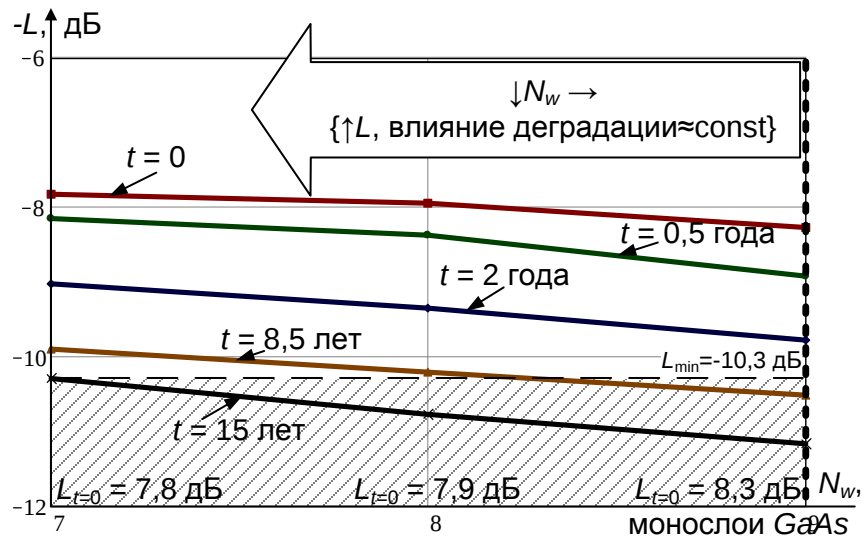


Рис. 9. Влияние толщины ямы N_w на потери преобразования балансного смесителя на основе РТД «modA-[N_w]»

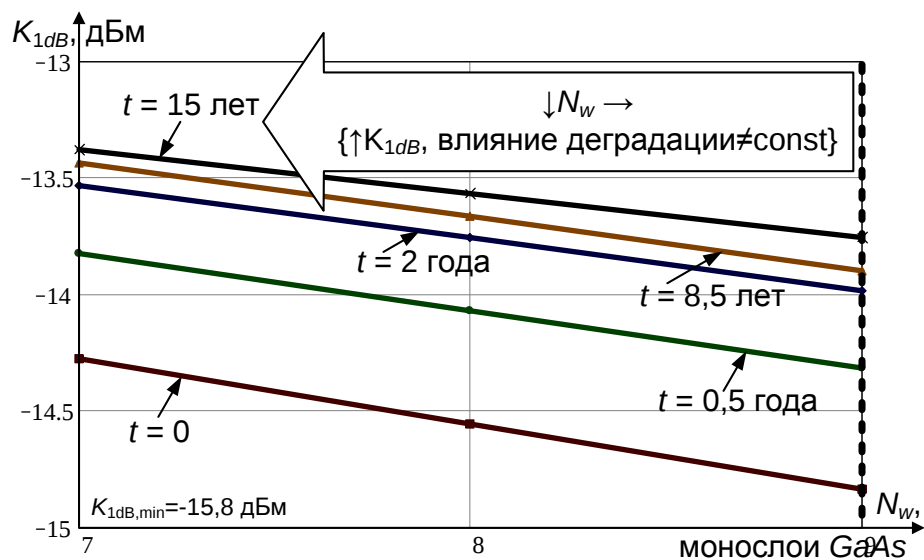


Рис. 10. Влияние толщины ямы N_w на коэффициент 1дБ - компрессии балансного смесителя на основе РТД «modA-[N_w]»

Коэффициент чувствительности потерь преобразования L балансного См РТД СВЧ к толщине ямы симметричной слоистой гетероструктуры N_w рассчитаем по формуле (3):

$$S_L = \frac{L_{new} - L_{исх}}{N_{w,new} - N_{w,исх}} \cdot \frac{N_{w,исх}}{L_{исх}}, \quad (3)$$

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

Коэффициент чувствительности коэффициента 1 дБ – компрессии K_{1dB} балансного См РТД СВЧ к толщине ямы симметричной слоистой гетероструктуры N_w рассчитаем по формуле (4):

$$S_{K_{1dB}} = \frac{K_{1dB,new} - K_{1dB,исх}}{N_{w,new} - N_{w,исх}} \cdot \frac{N_{w,исх}}{K_{1dB,исх}} \quad (4)$$

где $K_{1dB,new}$ и $K_{1dB,исх}$ – коэффициент 1 дБ – компрессии См РТД СВЧ на базе гетероструктур «modA-[N_w-1]» и «A», соответственно. Численные значения коэффициента чувствительности приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Коэффициенты чувствительности (%) потерь преобразования S_L и коэффициента 1 дБ-компрессии $S_{K_{1dB}}$ к уменьшению толщины ямы N_w ГС на 1 монослой GaAs

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

Таким образом, важный вывод, который позволило сделать численное моделирование балансного См РТД СВЧ следующий: уменьшение номинальной толщины барьеров и их высоты влечет за собой сильные ухудшения указанного балансного смесителя по номинальным потерям преобразования и увеличению скорости деградации Al из барьеров в прилежащие слои гетероструктуры (рис. 5 и). Уменьшение же номинальной толщины ямы при прочих неизменных параметрах рассмотренной гетероструктуры сопровождается улучшением номинальных значений потерь преобразования с сохранением скорости деградации гетероструктуры и расширением динамического диапазона по коэффициенту 1 дБ - компрессии (рис. 9 и). Таким образом, коэффициент чувствительности потерь преобразования и точки 1 дБ-компрессии к уменьшению толщины ямы гетероструктуры максимален на всей рассматриваемой наработке (15 лет), что позволило выбрать толщину ямы двухбарьерной симметричной GaAs - $Al_xGa_{1-x}As$ – гетероструктуры в качестве управляемого параметра для конструкторско-технологической оптимизации См РТД СВЧ по критерию его надежности. Таким образом, установлено, что возможность повышения надежности См РТД СВЧ лежит в оптимизации характеристик резонансно-туннельной структуры нанодиода.

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 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 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. Федорова, И.Б.Федоров, В.Д. Шашурин // Наноинженения в приборостроении. – 2011. – №1. – С. 34-43.

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

4 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.

5 Мокеров В.Г. Наногетероструктуры в сверхвысокочастотной полупроводниковой электронике. – М.: Техносфера, 2010. – 435 с.

**Processing variables detection for structural and engineering optimization
on reliability criterion of microwave radio signals mixers based
on resonant tunneling diodes .**

77-30569/228008

10, October 2011

Shashurin V.D., Vetrova N.A., Nazarov N.V.

Bauman Moscow State Technical University

shashurin@bmstu.ru

vetrova@bmstu.ru

To detect the factors defining phasing out of the next-generation microwave radio signals mixers based on resonant tunneling nanodiodes, researches of regularities of their formation are conducted. It was established that the possibility of increasing reliability of these radio signals mixers lies in optimization of characteristics of the resonant tunneling nanodiode structure.

Publications with keywords: [nanodevices](#), [radio signals mixers](#), [resonant tunneling diode](#), [reliability](#)

Publications with words: [nanodevices](#), [radio signals mixers](#), [resonant tunneling diode](#), [reliability](#)

Reference

1. I.P. Bushminskii, D.I. Kuznetsov, A.A. Romanov, et al., Reception systems of satellite television, Moscow, BMSTU Press, 2002, 320 p.
2. 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.
3. V.M. Bashkov, Iu.A. Ivanov, V.D. Shashurin, et al., Patent 2372691 (RF).
4. Khnykina S.V., Cand.Sci.Tech., Moscow, BMSTU, 2008, 133 p.
5. Mokerov V.G., Nanoheterostructures in superhigh-frequency semi-conductor electronics, Moscow, Tekhnosfera, 2010, 435 p.