

Конструкторско-технологическое проектирование микроэлектронных нелинейных преобразователей СВЧ радиосигналов на основе многослойных полупроводниковых наноразмерных резонансно-туннельных гетероструктур

© С.А. Мешков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Нелинейные преобразователи радиосигналов являются ключевыми элементами радиотехнических систем. Перспективным направлением повышения качества нелинейных преобразователей радиосигналов является использование нелинейных элементов, функционирующих на основе квантоворазмерных принципов токопереноса. Решается задача обеспечения надежности нелинейных преобразователей радиосигналов СВЧ устройств на основе наноразмерных многослойных полупроводниковых резонансно-туннельных гетероструктур. Рассматривается надежность индивидуальная и в партии изделий. Задача решается на примере смесителя радиосигналов на базе резонансно-туннельного диода. Использование описанной методологии проектирования позволит повысить надежность и серийнопригодность нелинейных преобразователей СВЧ радиосигналов.

Ключевые слова: нелинейные преобразователи радиосигналов, надежность, резонансно-туннельные многослойные полупроводниковые наноразмерные гетероструктуры.

Основные радиотехнические преобразования осуществляются при помощи нелинейных цепей и элементов. Поэтому качественные характеристики нелинейных преобразователей радиосигналов, такие как граничные частоты и рабочая полоса, динамический диапазон, допустимая мощность и др., определяют показатели назначения большинства радиотехнических систем.

Одним из путей улучшения качества радиоэлектронных средств (РЭС) является применение элементной базы на основе многослойных полупроводниковых гетероструктур [1]. Перспективно использование полупроводниковых приборов гетероструктурной электроники, функционирующих на основе квантоворазмерных эффектов. Среди них привлекает внимание резонансно-туннельный диод (РТД) на базе многослойных наноразмерных полупроводниковых гетероструктур A_3B_5 с поперечным токопереносом. Изменяя параметры слоев гетероструктуры (толщину, химический состав), можно управлять формой вольтамперной характеристики (ВАХ) и создавать диод с оптимальной для

конкретного вида нелинейного преобразования формой ВАХ. Примеры ВАХ исследованных нами макетов РТД представлены на рис. 1. Тут же для сравнения дана ВАХ типичного диода с барьером Шотки (ДБШ). Набор возможных нелинейных преобразований с применением РТД очень широк: генерация радиосигналов, частотная модуляция, смешивание радиосигналов, амплитудное детектирование, выпрямление, генерация сетки частотных меток и др. С практической точки зрения важны два обстоятельства:

- РТД функционирует в нужном для технических приложений диапазоне температур и других внешних воздействий;
- технология и оборудование для производства РТД давно существуют в рамках технологий микроэлектроники.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана в ходе поисковой научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы проведены исследования смесителей радиосигналов на основе РТД [2–8]. Установлено, что важным преимуществом смесителей на базе РТД по сравнению с ДБШ является расширение динамического диапазона. Это достигается благодаря увеличению верхней границы динамического диапазона (точка 1 дБ компрессии (P_{-1}), точка пересечения продуктов интермодуляции третьего порядка ($IP3$)) и снижению как шумов преобразования, так и собственных шумов диода.

Применение смесителя на основе РТД позволяет повысить чувствительность и помехоустойчивость приемника. Использование РТД в качестве нелинейного элемента смесителя радиосигналов целесообразно, в первую очередь, в составе субгармонического смесителя.

В качестве исходной концепции исследований, проводимых в МГТУ им. Н.Э. Баумана, по проектированию нелинейных преобразователей

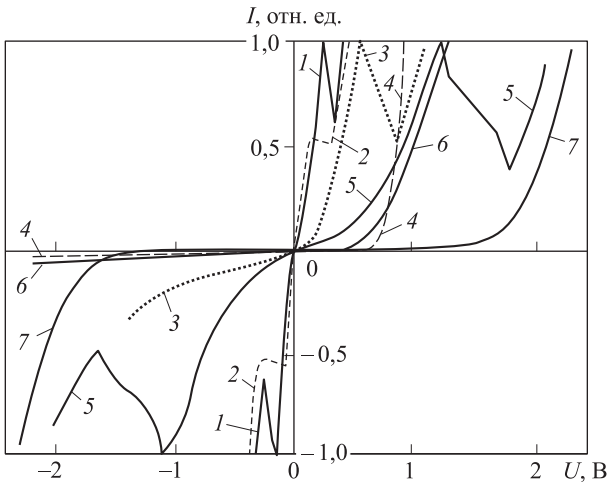


Рис. 1. ВАХ РТД (кривые 1, 2, 3, 5, 6, 7) и ДБШ (кривая 4)

СВЧ радиосигналов на основе наноразмерных многослойных полупроводниковых резонансно-туннельных гетероструктур принято положение о том, что целью проектирования устройства является обеспечение максимальной надежности без изменения технологического процесса его производства.

Традиционно проблема обеспечения надежности таких устройств решается либо путем совершенствования технологического процесса производства, либо защиты от внешних воздействий при эксплуатации. Первый путь сопряжен со значительными материальными затратами, поскольку требует применения более совершенного, а значит, дорогого технологического оборудования для формирования микро- и наноструктур. Второй путь приводит к необходимости увеличения массы и габаритов аппаратуры. Предлагаемый в проекте подход к обеспечению надежности устройств на основе наноразмерных многослойных полупроводниковых резонансно-туннельных гетероструктур не требует ни перестройки существующих технологий производства микро- и наноэлектронных приборов, ни изменения конструкции аппаратуры. Вводятся изменения в параметры гетероструктуры и топологии устройства, не меняющие его массо-габаритных характеристик.

Проблема обеспечения надежности нелинейных преобразователей радиосигналов СВЧ устройств на основе наноразмерных многослойных полупроводниковых резонансно-туннельных гетероструктур рассматривается с двух точек зрения: обеспечения надежности в партии изделий, т. е. групповой надежности, и обеспечение индивидуальной надежности отдельного устройства.

Индивидуальная надежность обеспечивается путем введения в технологический процесс операций термообработки и селекции кристаллов и не требует замены или модификации дорогостоящего оборудования для изготовления гетероструктур и приборов на их основе. Задача обеспечения групповой надежности, т. е. для всей партии устройств, сводится к ее максимизации в заданных условиях без изменения конструкции и технологического процесса производства устройства за счет оптимального выбора номинальных параметров конструкции прибора и гетероструктуры, делающих ее менее чувствительной к процессам деградации.

Для нелинейных преобразователей радиосигналов (смесители, выпрямители, генераторы сетки частот и др.) СВЧ устройств на основе наноразмерных многослойных полупроводниковых резонансно-туннельных гетероструктур проблема обеспечения надежности особенно актуальна, во-первых, ввиду чувствительности параметров гетероструктуры к процессам деградации при малости толщин слоев (до нескольких атомарных слоев), а во-вторых, из-за чувствительности показателей

назначения самого нелинейного преобразователя к форме ВАХ нелинейного элемента, зависящей от параметров гетероструктуры. Дegrаdация гетероструктуры может быть вызвана как технологическими факторами (дефекты кристаллической решетки, отклонения толщин слоев, отклонения элементного состава слоев и др.), так и эксплуатационными факторами (температура, ионизирующие излучения и т. д.), вызывающими ускоренную диффузию элементов, составляющих гетероструктуру. Поскольку в таких приборах электрические параметры (показатели качества назначения) определяются квантовомеханическими явлениями, происходящими в наноразмерных элементах гетероструктуры, любые изменения в гетероструктуре приводят к изменению ВАХ нелинейного элемента и, как следствие, показателей назначения нелинейного преобразователя. На форму ВАХ нелинейного элемента влияют также приконтактные области, прилегающие к гетероструктуре и подверженные деградации в процессе изготовления и эксплуатации. Изменение показателей назначения в процессе эксплуатации приводит к постепенному отказу устройства.

Методической базой для решения поставленной задачи является исследование физических процессов деградации РТД под действием внешних факторов. Для изучения физических процессов деградации гетероструктур и установления их количественных параметров проводятся лабораторные исследования образцов A_3B_5 наноразмерных многослойных полупроводниковых резонансно-туннельных гетероструктур с применением современных методов сканирующей электронной микроскопии, Оже-спектроскопии, ИК-эллипсометрии [9, 10].

Задача обеспечения надежности тесно связана с задачей достижения точности и серийнопригодности нелинейных преобразователей радиосигналов СВЧ устройств на основе наноразмерных многослойных полупроводниковых резонансно-туннельных гетероструктур. Интегральные технологии, используемые для производства микро- и нанoeлектронных устройств, дают высокую корреляцию конструкционных параметров устройства в пределах общей подложки, что не позволяет использовать допуск в качестве инструмента обеспечения заданной точности показателей назначения. Допуск становится групповой характеристикой и зависит от точности технологического процесса. Поэтому существующие методы обеспечения точности радиотехнических устройств (методы полной, неполной, групповой взаимозаменяемости), использующие конструкторский допуск в качестве инструмента обеспечения точности и предполагающие возможность независимого варьирования допусков на параметры топологии и гетероструктуры, оказываются неработоспособными. Для обеспечения точности радиотехнических устройств, изготавливаемых с применением интегральных технологий, должны использоваться параметры, допускающие неза-

висимое варьирование и не зависящие от технологического процесса. Такими параметрами являются номинальные размеры элементов гетероструктуры и топологии прибора. В результате оптимального выбора указанных параметров, с одной стороны, увеличивается вероятность попадания показателей назначения устройства в заданные разработчиком допуски, а с другой — снижается чувствительность гетероструктуры к технологическим погрешностям и процессам деградации.

Таким образом, решается комплексная задача обеспечения и оптимальной увязки основных показателей качества нелинейных преобразователей радиосигналов СВЧ устройств на основе наноразмерных многослойных полупроводниковых резонансно-туннельных гетероструктур — показателей назначения, их точности, технологичности и надежности. Схема обеспечения основных показателей качества радиотехнических устройств на основе наноразмерных многослойных полупроводниковых резонансно-туннельных гетероструктур показана на рис. 2.

Задача обеспечения надежности партии нелинейных преобразователей радиосигналов СВЧ устройств на базе наноразмерных многослойных полупроводниковых резонансно-туннельных гетероструктур ставится следующим образом. Целевая функция: $P_{\Phi}^{nCP}(t, \bar{Y}, \bar{\sigma}, \bar{\Delta})$ — вероятность выполнения заданных функций партией СВЧ устройств, где $\bar{Y} = q(\bar{X})$, \bar{X} — вектор параметров конструкции радиотехнического СВЧ устройства и наноразмерной полупроводниковой резонансно-туннель-

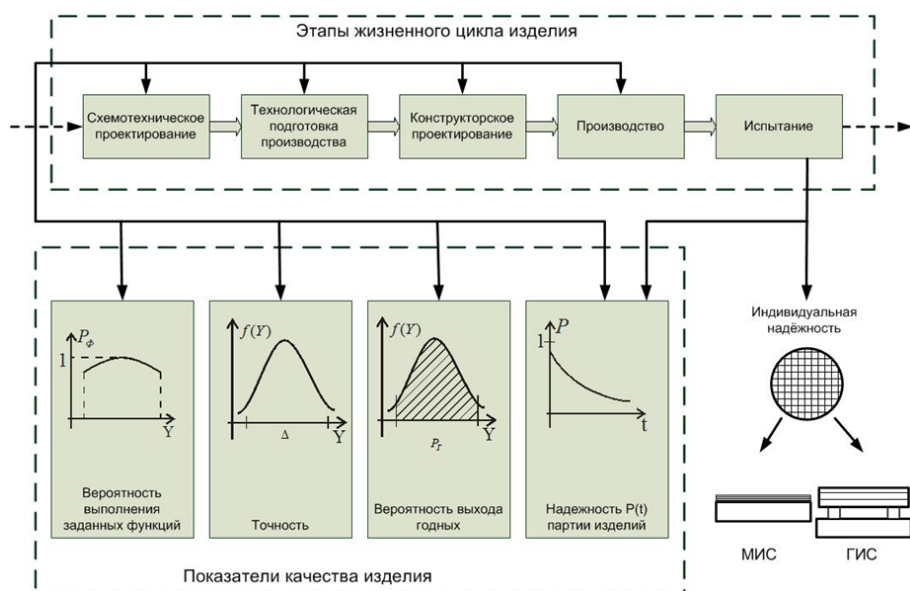


Рис. 2. Схема обеспечения основных показателей качества нелинейных преобразователей радиосигналов СВЧ устройств на основе наноразмерных многослойных полупроводниковых резонансно-туннельных гетероструктур

ной гетероструктуры; \bar{Y} — вектор электрических параметров (показатели качества назначения) устройства, t — время эксплуатации, $\bar{\sigma}$ — вектор разбросов (технологическая точность) параметров конструкции СВЧ устройства и полупроводниковой гетероструктуры; $\bar{\Delta}$ — вектор допустимых отклонений (допуски) на электрические параметры (показатели качества назначения) нелинейных преобразователей радиосигналов устройства.

$$P_{\Phi}^{пср} = \frac{\sum P_{\Gamma}^i P_{\Phi}^i}{P_{\Gamma}},$$

где P_{Γ} — вероятность выхода годных СВЧ устройств,

$$P_{\Gamma} = \int_{Y_{\min}}^{Y_{\max}} f(Y) dY,$$

где $f(Y)$ — совместная функция плотности вероятности электрических параметров (показатели качества назначения) СВЧ устройства; Y_{\min} , Y_{\max} — границы поля допуска $\bar{\Delta}$ на электрические параметры (показатели качества назначения) СВЧ устройства. Иллюстрация приведена на рис. 3, где Y_{NOM} — номинал электрического параметра (показателя качества назначения) устройства; P_{Φ}^i — вероятность выполнения заданных функций устройством с параметром Y^i (рис. 3), где P_{Φ}^{MIN} — минимально допустимая вероятность выполнения устройством заданных функций, P_{Γ}^i — вероятность попадания параметра Y^i в элементарный интервал ΔY^i (рис. 4).

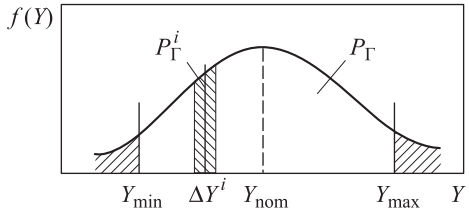
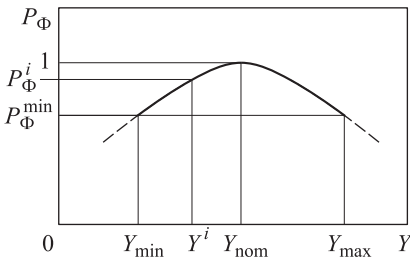


Рис. 3. Зависимость вероятности выполнения устройством заданных функций от величины отклонения электрического параметра (показателя качества назначения) от номинального значения

Рис. 4. Определение вероятности выхода годных СВЧ устройств

В том случае, если функция $P_{\Phi}(Y)$ не задана, в качестве целевой функции может выступать функция $P_{\Gamma}(t, \bar{Y}, \bar{\sigma}, \bar{\Delta})$.

Критерий оптимальности: $\max P_{\Phi}^{nCP}(t, \bar{Y}, \bar{\sigma}, \bar{\Delta})$ или $\max P_{\Gamma}(t, \bar{Y}, \bar{\sigma}, \bar{\Delta})$.

Управляемые параметры: номиналы \bar{X}

Ограничения: $\bar{\Delta} = \text{const}$, $\bar{\sigma} = \text{const}$, $\bar{X} \in O_k$, $\bar{X} \in O_T$, $P_{\Gamma}(t=0) \geq P_{\Gamma}^{MIN}$, где O_k, O_T — ограничения конструкторского и технологического характера.

В результате решения задачи оптимизации получают новые значения номиналов \bar{X} и Y_{OPT} , которым соответствуют $*P_{\Phi}^{nCP}$ или $*P_{\Gamma}^{CP}$ на рис. 5, где представлена графическая интерпретация решаемой задачи.

Поставленная задача является комплексной, поскольку позволяет при $t=0$ максимизировать вероятность выхода годных устройств, т. е. решить задачу обеспечения точности и серийнопригодности (технологичности), а при учете процесса деградации наноразмерной резонансно-туннельной многослойной полупроводниковой гетероструктуры устройства — задачу обеспечения надежности при условии соответствия заданным требованиям показателей качества назначения устройства.

Решение поставленной задачи основывается на теории технологической оптимизации параметров конструкций и технологических про-

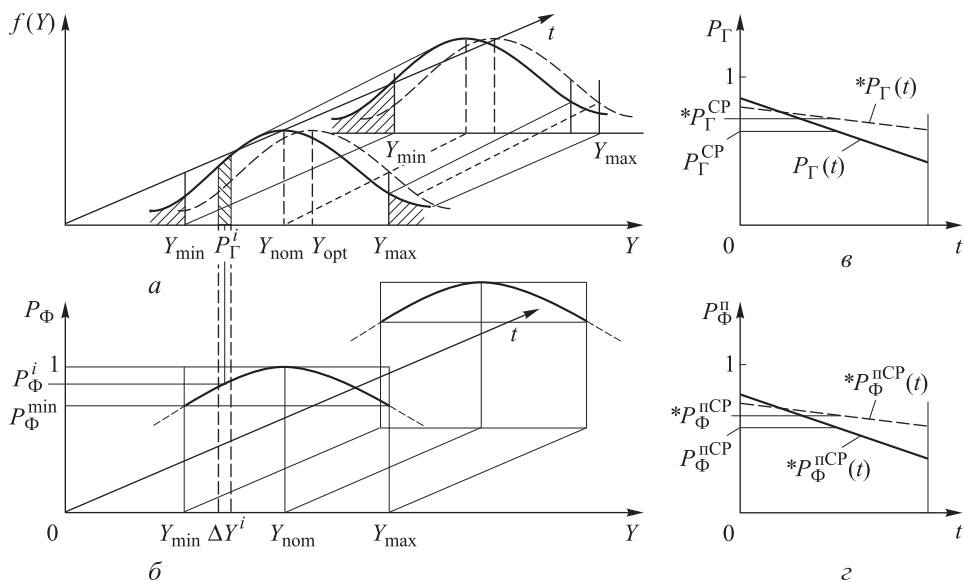


Рис. 5. Графическое представление задачи оптимизации:

a — зависимость функции плотности вероятности электрических параметров устройства от времени; *б* — зависимость функции вероятности выполнения устройством заданных функций от времени; *в* — зависимость вероятности выхода годных устройств от времени; *г* — зависимость вероятности выполнения устройством заданных функций от времени

цессов производства микроэлектронных СВЧ устройств, развитой в работах И.П. Бушминского [11], А.Г. Гудкова и др. [12–18]. В части решения задачи анализа вероятности выполнения устройством заданных функций работа опирается на [19].

Исследования надежности смесителей радиосигналов в партии базируются на изучении физических процессов деградации нелинейного элемента, а также конструкторско-технологических погрешностей полупроводниковой гетероструктуры, топологии РТД, топологии подложки, размерных, электромагнитных и диэлектрических параметров подложки. Для построения модели деградации РТД используется программно-расчетный комплекс dif2RTD. Комплекс позволяет:

- строить ВАХ AlGaAs РТД на основании данных о его конструкции (толщина и степень легирования приконтактных слоев, толщины и материалы слоев барьеров и ямы);
- исследовать влияние деградационных процессов в AlGaAs РТД на его ВАХ.

Программно-расчетный комплекс учитывает:

- влияние термического отжига гетероструктуры при ее изготовлении на концентрацию дефектов;
- электромиграцию и возникновение дефектов при протекании электрического тока;
- деградацию омических контактов при эксплуатации;
- деградацию РТС при эксплуатации в результате термической диффузии;
- деградацию РТС при изготовлении в результате термической диффузии.

Построенная при помощи программно-расчетного комплекса dif2RTD модель деградации AlGaAs РТД не связана с какими либо априорными (простейшими) формами зависимости изменения параметров устройства во времени, как это делается обычно при решении задачи анализа параметрической надежности [20, 21].

Для моделирования кинетики параметров смесителя радиосигналов при деградации РТД используется пакет Microwave Office.

Решение задачи обеспечения индивидуальной надежности нелинейных преобразователей радиосигналов СВЧ устройств на базе наноразмерных многослойных полупроводниковых резонансно-туннельных гетероструктур основывается на селекции полупроводниковых кристаллов [21, 22].

Определение индивидуальной надежности требует данные о скорости деградации параметров полупроводникового прибора, которая зависит от внесенных технологических погрешностей при изготовлении гетероструктуры и прибора. Получение таких данных возможно в рамках технологического эксперимента, основанного на искусственном «старении» полупроводникового кристалла за счет воздействия темпе-

ратурного фактора. Для этого разработана методика технологической операции термонагружения. Цель данной технологической операции — выявить полупроводниковые кристаллы с критически низкими значениями надежности и тем самым исключить отказ кристалла и радиотехнического устройства на начальном этапе его эксплуатации, а также определить индивидуальную скорость деградации его параметров. Структурно методика состоит из двух модулей — расчетного и экспериментального.

Расчетный модуль основывается на программно-расчетном комплексе dif2RTD и позволяет получить предварительную оценку надежности. Исходными данными для расчета являются параметры слоев гетероструктуры (толщины и состав слоев), их технологические отклонения, а также предельные значения выходных электрических параметров радиотехнического устройства. На выходе, исходя из физических закономерностей старения гетероструктуры, строится прогноз средней наработки устройства до отказа.

Экспериментальный модуль предусматривает технологические испытания. Их задача — непосредственная экспериментальная оценка индивидуальной надежности каждого конкретного полупроводникового кристалла в партии, их групповой надежности, а также выявление кристаллов с предельно низкими значениями надежности. В основу испытаний заложен принцип искусственного старения изделия за счет воздействия температурного фактора (ускоренные испытания). При этом режимы технологических испытаний уменьшают ресурс изделия не более чем на 10 %.

Решаемая в настоящей работе задача является логическим продолжением цикла работ по технологической оптимизации параметров конструкций и процессов производства микроэлектронных устройств СВЧ, проводимых в МГТУ им. Н.Э. Баумана с 70-х годов прошлого века. Основной задачей конструкторско-технологического проектирования СВЧ микросхемы тогда виделось достижение минимума технологической себестоимости годного изделия при условии соответствия показателей назначения устройства тактико-техническим требованиям. Решение этой задачи основывалось на учете при проектировании реальных статистических распределений параметров конструкции изделия, вызванных технологическими погрешностями. В настоящей работе вводится новый параметр — время эксплуатации устройства. Это позволяет наряду с обеспечением серийнопригодности решить задачу анализа и обеспечения надежности прибора. Решение этой задачи основывается на учете как технологических погрешностей, так и кинетики деградации параметров устройства, вызванной старением.

Принципиальным отличием настоящей работы от работ по технологической оптимизации параметров конструкций и процессов производства микроэлектронных устройств СВЧ, проведенных ранее, является

ся более широкий перечень управляемых параметров, варьируемых в процессе поиска оптимального решения. Методы и средства технологической оптимизации предполагают варьирование номиналов параметров топологии. Методы и средства конструкторско-технологического проектирования СВЧ нелинейных преобразователей радиосигналов, используемые в настоящей работе, основаны на одновременном варьировании номинальных параметров как топологии микросхемы, так и гетероструктуры нелинейного элемента, определяющей форму его ВАХ. Поскольку именно форма ВАХ нелинейного элемента оказывает наибольшее влияние на показатели назначения нелинейного преобразователя радиосигналов, возможность ее варьирования расширяет область поиска оптимального решения и повышает вероятность нахождения глобального экстремума целевой функции при заданных условиях.

Полученные в ходе работы результаты позволяют прогнозировать увеличение ресурса смесителей СВЧ радиосигналов на 20–30% за счет выбора оптимальной формы ВАХ AlGaAs ПТД и параметров его гетероструктуры.

Описанный подход к конструкторско-технологическому проектированию можно распространить на широкий класс радиоэлектронных устройств на основе многослойных полупроводниковых гетероструктур. Методология конструкторско-технологического проектирования нелинейных преобразователей радиосигналов на основе многослойных полупроводниковых резонансно-туннельных гетероструктур базируется на двух основных блоках. Первый блок — моделирование параметров полупроводниковых приборов на основе многослойных полупроводниковых гетероструктур и радиоэлектронных устройств — представлен целым спектром программных систем, обзор которых выходит за рамки настоящей статьи. Второй блок — моделирование кинетики деградации параметров полупроводниковых приборов на основе многослойных полупроводниковых гетероструктур — разработан в меньшей степени. Однако методология конструкторско-технологического проектирования нелинейных преобразователей радиосигналов на основе многослойных полупроводниковых резонансно-туннельных гетероструктур открыта для пополнения новыми моделями деградации полупроводниковых приборов, что позволяет использовать описанный подход для проектирования широкого спектра радиоэлектронных устройств на основе приборов гетероструктурной электроники различного конструкторско-технологического исполнения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вьюгинов В.Н., Гудков А.Г., Добров В.А., Мешков С.А., Попов В.В. Гетероструктурная СВЧ электроника в России. *Электромагнитные волны и электронные системы*, 2012, № 1, с. 4–9.

- [2] Иванов Ю.А., Мешков С.А., Федоркова Н.В., Федоренко И.А. Улучшение параметров приемника СВЧ-диапазона применением резонансно-туннельного нанодиода в преобразователе частоты. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. Приборостроение*, 2010, спец. выпуск «Наноинженерия». Москва, Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, с. 128–137.
- [3] Иванов Ю.А., Мешков С.А., Шашурин В.Д., Федоркова Н.В., Федоренко И.А. Субгармонический смеситель с улучшенными интермодуляционными характеристиками на базе резонансно-туннельного диода. *Радиотехника и электроника*, 2010, т. 55, № 8, с. 982–988.
- [4] Иванов Ю.А., Мешков С.А., Федоркова Н.В., Федоров И.Б., Шашурин В.Д., Синякин В.Ю. Повышение показателей качества радиоэлектронных систем нового поколения за счет применения резонансно-туннельных нанодиодов. Часть 1. *Наноинженерия*, 2011, № 1, с. 34–44.
- [5] Иванов Ю.А., Мешков С.А., Федоркова Н.В., Федоров И.Б., Шашурин В.Д., Синякин В.Ю. Повышение показателей качества радиоэлектронных систем нового поколения за счет применения резонансно-туннельных нанодиодов. Часть 2. *Наноинженерия*, 2011, № 1, с. 34–44.
- [6] Федоренко И.А., Федоркова Н.В., Шашурин В.Д., Иванов Ю.А. Спектральные характеристики субгармонического смесителя радиосигналов на основе резонансно-туннельного диода. *Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»* (КрыМиКо'2011, 12–16 сентября 2011 г., Севастополь, Украина). Тезисы докладов, с. 181–182.
- [7] Иванов Ю.А., Мешков С.А., Шашурин В.Д., Федоркова Н.В. Улучшение параметров смесителей радиосигналов за счет применения резонансно-туннельных диодов. *Техника и приборы СВЧ*, 2011, № 2, с. 18–25.
- [8] Мешков С.А. и др. Перспективы разработки нелинейных преобразователей радиосигналов на базе резонансно-туннельных нанодиодов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2012, № 4 (89), с. 100–113.
- [9] Иванов Ю.А., Мешков С.А., Макеев М.О., Федоркова Н.В. Исследование термической деградации AuGeNi омических контактов резонансно-туннельных диодов на базе наноразмерных AlAs/GaAs гетероструктур. *Электронное научно-техническое издание «Наука и образование»*, 2012, № 9. Эл № ФС 77–48211. Государственная регистрация № 0421200025. ISSN 1994-0408.
- [10] Иванов Ю.А., Мешков С.А., Макеев М.О. Исследование деградационных явлений в наноразмерных AlAs/GaAs гетероструктурах методом ИК-спектроскопии. *Наноинженерия*, 2011, № 4, с. 44–48.
- [11] Бушминский И.П., Гудков А.Г., Дергачев В.Ф. и др. *Конструкторско-технологические основы проектирования полосковых микросхем*. Бушминский И.П., ред. Москва, Радио и связь, 1987, 272 с.
- [12] Гудков А.Г., Леушин В.Ю., Мешков С.А. Обеспечение показателей качества микросхем СВЧ методом вероятностного моделирования. *17-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: материалы конференции*. Севастополь, 10–14 сентября 2007 г.
- [13] Гудков А.Г. Комплексная технологическая оптимизация СВЧ устройств. *17-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: материалы конференции*. Севастополь, 10–14 сентября 2007 г.
- [14] Гудков А.Г. *Радиоаппаратура в условиях рынка. Комплексная технологическая оптимизация*. Москва, «САЙНС-ПРЕСС», 2008, 336 с.
- [15] Гудков А.Г., Ветрова Н.А., Хныкина С.В., Горлачева Е.Н. Прогнозирование качества и надежности ИС СВЧ на этапах разработки и производства. Часть 7. Стоимостные характеристики при проектировании и производстве электронных изделий. *Машиностроитель*, 2008, № 5, с. 44–51.

- [16] Гудков А.Г., Ветрова Н.А., Хныкина С.В., Горлачева Е.Н. Прогнозирование качества и надежности ИС СВЧ на этапах разработки и производства. Часть 8. Неопределенности технологической оптимизации. *Машиностроитель*, 2008, № 8, с. 10–13.
- [17] Гудков А.Г., Ветрова Н.А., Хныкина С.В., Горлачева Е.Н. Прогнозирование качества и надежности ИС СВЧ на этапах разработки и производства. Часть 9. Комплексная технологическая оптимизация как фактор повышения эффективности проектирования электронных изделий. *Машиностроитель*, 2008, № 9, с. 16–20.
- [18] Мешков С.А., Хныкина С.В. Выбор информативных параметров для оценки деградации гетероструктуры резонансно-туннельного нанодиода и смесителя на его основе. *Информационно-измерительные и управляющие системы*, 2007, т. 5, № 1, с. 43–53.
- [19] Ермолаев Ю.П., Ермолаев А.Ю. Метод оценки вероятности функционирования РЭА. Устройства, элементы и методы комплексной микроминиатюризации РЭА. *Межвуз. сб.* Казань, КАИ, 1984, с. 34–41.
- [20] Проников А.С. *Параметрическая надежность машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, 560 с.
- [21] Гудков А.Г., Мешков С.А., Хныкина С.В. Оптимальное проектирование гетероструктуры для смесителей радиосигналов на основе РТД. *Успехи современной радиоэлектроники*, 2010, № 1, с. 20–26.
- [22] Гудков А.Г., Мешков С.А., Агасиева С.В. Оптимальное проектирование гетероструктуры для смесителей радиосигналов на основе резонансно-туннельных диодов. *Биомедицинская радиоэлектроника*, 2010, № 10, с. 61–67.

Статья поступила в редакцию 16.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Мешков С.А. Конструкторско-технологическое проектирование микроэлектронных нелинейных преобразователей СВЧ радиосигналов на основе многослойных полупроводниковых наноразмерных резонансно-туннельных гетероструктур. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/800.html>

Мешков Сергей Анатольевич окончил МВТУ им. Баумана в 1983 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии приборостроения». Области научных интересов: микросистемная техника, интегральные схемы СВЧ, надежность электронных приборов и устройств. Автор более 50 статей и докладов. e-mail: Meschkow@bmsu.ru