

АНАЛИЗ КИНЕТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУБГАРМОНИЧЕСКОГО СМЕСИТЕЛЯ СВЧ-РАДИОСИГНАЛОВ НА БАЗЕ РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ

К.В. Черкасов
С.А. Мешков
М.О. Макеев
В.Д. Шашурин
Н.В. Федоркова

cherkasov@bmstu.ru
meschkow@bmstu.ru
m.makeev@bmstu.ru
schashurin@bmstu.ru
nvf@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Исследован диодный субгармонический смеситель частот СВЧ-диапазона на второй гармонике гетеродина. В качестве нелинейного элемента применен AlGaAs резонансно-туннельный диод. Показано, что, используя резонансно-туннельный диод, можно повысить показатели назначения — мощность односторонней компрессии, точку пересечения продуктов интермодуляции 3-го порядка, верхнюю границу рабочего диапазона частот — по сравнению со смесителем частот на базе двух диодов с барьером Шоттки. Исследованы вероятностные характеристики и кинетика электрических параметров смесителя в результате действия технологических и эксплуатационных факторов для получения оценки гамма-процентного ресурса. В качестве технологических факторов рассмотрены конструкторско-технологические погрешности на этапах производства диода и смесителя, а также деградиационные процессы в элементах конструкции диода, в качестве дестабилизирующего фактора эксплуатации — высокая температура. Необратимые изменения электрических характеристик смесителя приведены как результат деградиационных процессов, протекающих в многослойной полупроводниковой гетероструктуре диода, вследствие чего меняются форма его вольт-амперной характеристики и параметры смесителя. Построена кинетика вольт-амперной характеристики диода и электрических

Ключевые слова

Субгармонические смесители частот радиосигналов, надежность, обеспечение качества, резонансно-туннельный диод, постепенный отказ

характеристик смесителя с учетом их технологического разброса. Получена оценка гамма-процентного ресурса смесителя для заданных условий эксплуатации. Даны рекомендации по повышению надежности смесителя посредством конструкторско-технологической оптимизации параметров конструкции диода и смесителя

Поступила 23.10.2024

Принята 14.01.2025

© Автор(ы), 2025

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (проект № 22-19-00455, <https://rscf.ru/project/22-19-00455>)

Введение. Необходимость совершенствования технических характеристик радиоприемной аппаратуры обусловлена растущими требованиями, предъявляемыми к ее качеству. Перспективным направлением развития радиоприемных устройств является повышение рабочих частот, что требует улучшения характеристик основных функциональных узлов, в частности, смесителей частот радиосигналов. Задачу повышения рабочих частот смесителей можно решить с помощью гетероструктурных полупроводниковых элементов, используя их для управления наиболее значимыми параметрами полупроводников, в частности, шириной запрещенной зоны, эффективной массой носителей заряда, подвижностью носителей заряда и рядом других. В настоящей работе рассмотрен нанoeлектронный AlGaAs резонансно-туннельный диод (РТД) [1].

Принцип работы РТД основан на квантовом размерном эффекте резонансного туннелирования электронов, что позволяет значительно повысить рабочие частоты по сравнению с традиционной полупроводниковой элементной базой. Преимущества РТД при его применении в радиоприемной аппаратуре приведены в [2–9]. В настоящем исследовании наиболее важным представляется свойство варибельности формы вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода, заключающееся в возможности целенаправленного выбора оптимальной формы ВАХ, при которой достигаются наилучшие условия нелинейного преобразования радиотехнического сигнала в смесителе. Результатом такого эффекта является повышение характеристик смесителя, в частности, расширение динамического диапазона обрабатываемых сигналов по односторонней компрессии и интермодуляционным искажениям сигнала 3-го порядка [10]. К преимуществам РТД относится и технологичность, заключающаяся в простоте технологии технологических методов его производства с использованием отработанных технологий микроэлектроники. Таким образом, РТД представляет собой перспективную элементную базу для использования в качестве нелинейных элементов смесителей частот.

Наиболее значимые показатели качества радиоприемного устройства — это показатели назначения (электрические характеристики) и надежность, которые взаимосвязаны, поскольку параметры работоспособного устройства всегда удовлетворяют требованиям, предъявляемым к показателям назначения. Отказы смесителя частот на основе РТД связаны преимущественно с необратимыми изменениями ВАХ полупроводникового элемента в процессе производства и эксплуатации, в результате которых параметры смесителя выходят за пределы установленных разработчиком допусков [11, 12]. При проектировании смесителей частот на основе РТД задачи обеспечения требуемых показателей назначения и надежности в заданных условиях эксплуатации могут быть решены путем синтеза параметров конструкции РТД и смесителя, обеспечивающих оптимальную форму ВАХ диода для конкретного прибора в заданных условиях производства и эксплуатации.

Цель настоящей работы — исследование вероятностных характеристик и кинетики электрических параметров смесителя частот в результате действия технологических и эксплуатационных факторов для получения оценки гамма-процентного ресурса.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Объектом исследования является субгармонический смеситель (СГС) частот радиосигналов на второй гармонике гетеродина диапазона 10...11 ГГц с РТД в качестве нелинейного элемента. Данный тип смесителей получил распространение в миллиметровом диапазоне длин волн. Традиционно в качестве нелинейного элемента СГС используется антипараллельная пара диодов с барьером Шоттки (ДБШ). Применение РТД позволяет упростить конструкцию смесителя, так как ВАХ РТД антисимметрична и один РТД заменяет пару ДБШ.

В качестве нелинейного элемента исследуемого смесителя рассматривают РТД со следующими параметрами симметричной резонансно-туннельной структуры: GaAs-спейсеры толщиной 2,26 нм, AlAs-барьеры толщиной 1,13 нм и GaAs-яма толщиной 3,96 нм, которые располагаются в следующем порядке: спейсер–барьер–яма–барьер–спейсер; омические контакты изготовлены на основе композиции AuGeNi. Начальный участок ВАХ РТД приведен на рис. 1.

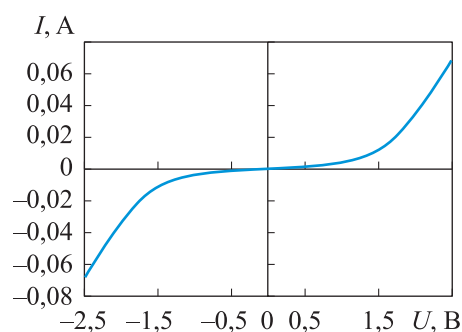


Рис. 1. Начальный участок ВАХ РТД

В качестве показателей назначения исследуемого смесителя выбраны коэффициент передачи промежуточной частоты (разность частоты сигнала и удвоенной частоты гетеродина), мощность однодецибельной компрессии и точка пересечения IP (Intercept Point) продуктов интермодуляции 3-го порядка IP3.

Общая методика проектирования смесителей частот радиосигналов на основе РТД в целях получения максимальных показателей надежности приведена в [10]. Исходными данными для методики служат электрические характеристики прибора, их статистические распределения, являющиеся результатом случайного варьирования факторов технологии производства, а также функции изменения электрических параметров во времени (кинетики) под действием факторов эксплуатации, для получения которых необходима информация о технологических разбросах и кинетике ВАХ нелинейного элемента.

Оценка надежности приборов экспериментальными методами является затратной, поэтому представляется актуальным применение расчетных методов. Для решения данной задачи разработана комплексная математическая модель смесителя, включающая в себя модуль моделирования ВАХ РТД на основе комбинации квантово-механических и классических механизмов токопереноса и модуль моделирования показателей назначения смесителя, базирующийся на САПР AWR Microwave Office. Комплексный характер математической модели смесителя частот заключается также в комбинации стохастической и детерминированной моделей, дающей возможность учета технологических факторов производства и построения вероятностных распределений показателей назначения [13]. Эта модель реализована в специализированном программном комплексе [14], который используется в настоящей работе для прогнозирования показателей назначения и надежности смесителей частот.

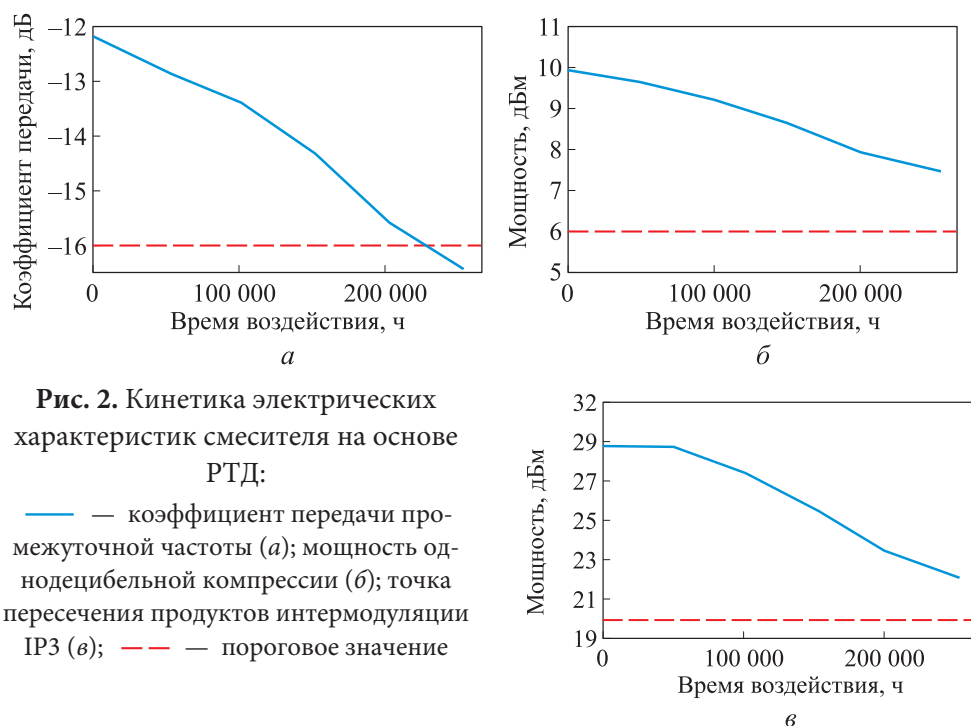
Результаты. Перед проведением анализа надежности смесителя на РТД целесообразно сравнить его электрические характеристики с характеристиками аналогичного СГС, в качестве нелинейного элемента которого используется пара антипараллельно включенных ДБШ. Оба типа нелинейных элементов обеспечивают антисимметричную форму ВАХ (симметричную в первой и третьей четвертях координатной плоскости относительно начала координат), однако ВАХ ДБШ имеет экспоненциальную форму, в то время как ВАХ используемого РТД более пологая и может быть аппроксимирована полиномом 3–5 порядка.

За отказ смесителя принимается состояние, в котором любой из трех показателей назначения выходит за допустимые пределы: коэффициент

передачи промежуточной частоты меньше -16 дБ, значение мощности односторонней компрессии меньше 6 дБм, точка пересечения продуктов интермодуляции IP3 меньше 20 дБм на частоте 10,9 ГГц.

Сравнение электрических характеристик смесителя на РТД с характеристиками аналогичного СГС с парой встречно включенных ДБШ показало, что применение РТД ведет к незначительному уменьшению (на 2 дБ) коэффициента передачи промежуточной частоты, но при этом увеличиваются верхняя граница динамического диапазона по односторонней компрессии (на 7 дБм) и значение IP3 (на 16,5 дБм). Динамический диапазон — критический параметр любого радиоприемника. Полученный результат свидетельствует о перспективности применения РТД в качестве нелинейного элемента диодных смесителей частот и позволяет перейти к анализу кинетики в заданных условиях эксплуатации электрических характеристик рассматриваемого смесителя с РТД в качестве нелинейного элемента.

Кинетика электрических характеристик исследуемого смесителя на основе РТД моделируется при температуре эксплуатации $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ с использованием разработанного авторами специализированного программного комплекса. Полученная кинетика ВАХ РТД передается в модель смесителя в виде ряда полиномиальных зависимостей тока от напряжения в различные моменты времени. Результаты моделирования электрических характеристик приведены на рис. 2.



В результате анализа полученной кинетики установлено, что значение коэффициента передачи промежуточной частоты приближается к пороговому значению быстрее других рассматриваемых характеристик, следовательно, отказ по данному параметру происходит раньше и является причиной отказа смесителя в целом.

Приведенные зависимости позволяют оценить индивидуальную наработку исследуемого смесителя с номинальными параметрами. Для получения оценки гамма-процентного ресурса смесителя помимо кинетики показателей назначения необходимы их статистические распределения в различные моменты времени. Для получения статистических распределений проведен компьютерный статистический эксперимент, в результате которого получены распределения рассматриваемых электрических характеристик выборки из 100 приборов. Технологические разбросы параметров конструкции смесителя и РТД взяты на основе данных производителя и находятся в пределах типичных для технологий микроэлектроники значений [15–17]. Полученные распределения электрических характеристик смесителя и их кинетика (рис. 3) позволили оценить гамма-процентный ресурс прибора, который при $\gamma = 0,99$ и температуре 125 °С составляет 20 лет.

Обсуждение полученных результатов. Результаты сравнения электрических характеристик СГС на основе РТД с характеристиками аналога на основе ДБШ согласуются с выводами, полученными в [18–20] для различных типов смесителей с РТД, в том числе СГС, имеющим более простую конструкцию и лучшие значения ширины динамического диапазона. Его применение целесообразно в случае, когда исходя из условий применения незначительное уменьшение коэффициента передачи промежуточной частоты не влияет на работоспособность приемника в целом, в то время как верхняя граница динамического диапазона играет существенную роль в сохранении работоспособности. Показано [10, 14], что за счет оптимизации номинальных значений параметров конструкции смесителя и нелинейного элемента можно осуществить целенаправленный выбор конструкторско-технологического исполнения прибора, имеющего лучшие электрические характеристики, чем аналог на традиционной элементной базе.

Кинетика электрических характеристик СГС в условиях действия температурного фактора вызвана необратимыми деградационными процессами, протекающими в структуре РТД [11–13]. Основным механизмом деградации электрофизических параметров РТД при повышенной температуре является рост удельного контактного сопротивления омических контактов

диода [21–24], приводящий к дрейфу ВАХ. Механизм постепенного отказа смесителя вследствие уменьшения коэффициента передачи промежуточной частоты согласуется с тезисом о высокой чувствительности данного параметра к форме ВАХ РТД, что отмечено в [1–6, 18–20]. Таким образом, полученные результаты дают исходные данные для дальнейшей оптимизации в целях улучшения электрических характеристик и повышения надежности СГС.

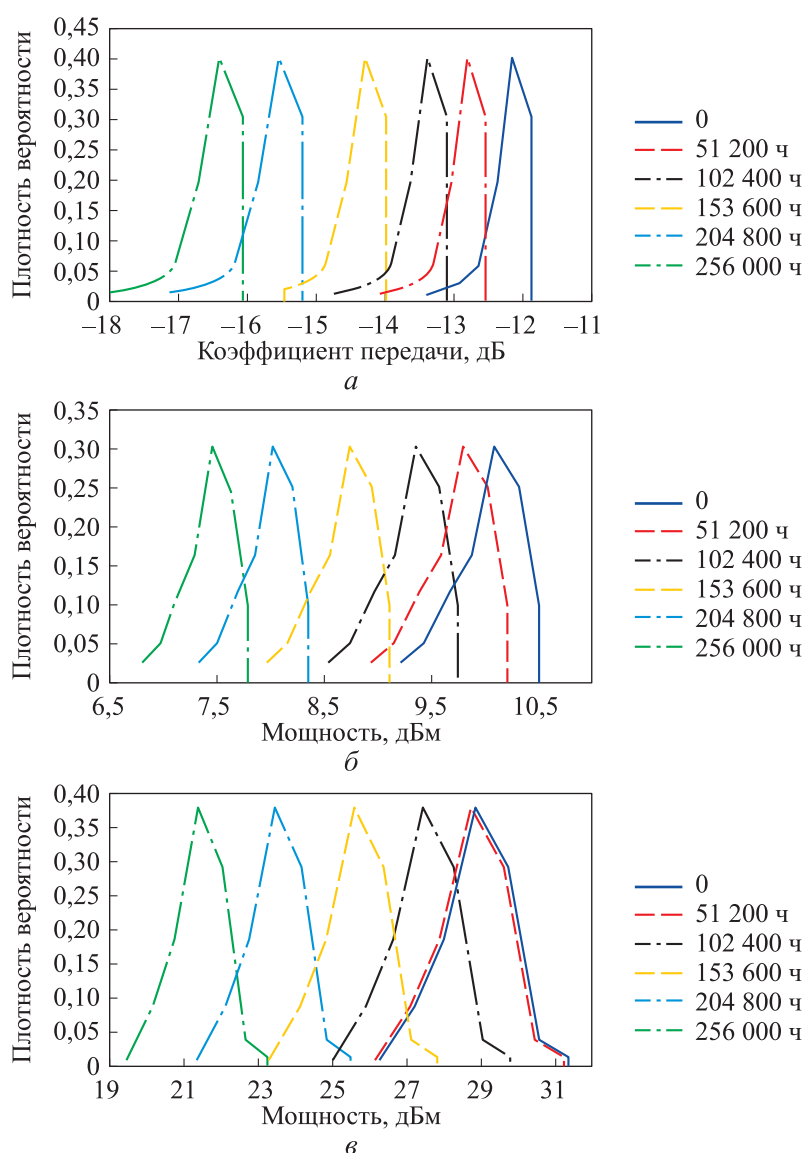


Рис. 3. Кинетика статистических распределений коэффициента передачи промежуточной частоты (а), мощности однодецибельной компрессии (б) и точки IP3 (в)

Заключение. Проведенное исследование показало, что отказ СГС на второй гармонике гетеродина на основе РТД происходит из-за постепенного уменьшения коэффициента передачи промежуточной частоты смесителя, вызванного деградацией ВАХ нелинейного элемента в результате необратимых процессов, протекающих в его гетероструктуре. Повышение гамма-процентного ресурса рассматриваемого прибора в условиях действия дестабилизирующих факторов эксплуатации возможно посредством конструкторско-технологической оптимизации параметров его конструкции и электрических характеристик по описанной в [10, 14] методике.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Mizuta H., Tanoue T. The physics and applications of resonant tunnelling diodes. Cambridge, Cambridge University Press, 2010.
- [2] Nagatsuma T., Fujita M., Kaku A., et al. Terahertz wireless communications using resonant tunneling diodes as transmitters and receivers. *Procs. of Int. Conf. on Telecommunications and Remote Sensing*, 2014, vol. 1, pp. 41–46.
DOI: <https://doi.org/10.5220/0005421000410046>
- [3] Maekawa T., Kanaya H., Suzuki S., et al. Oscillation up to 1.92 THz in resonant tunneling diode by reduced conduction loss. *Appl. Phys. Express*, 2016, vol. 9, no. 2, art. 024101. DOI: <https://doi.org/10.7567/APEX.9.024101>
- [4] Diebold S., Tsuruda K., Kim J.-Y., et al. A terahertz monolithic integrated resonant tunneling diode oscillator and mixer circuit. *Procs. SPIE*, 2016, vol. 9856, art. 98560U.
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2225209>
- [5] Wang J., Al-Khalidi A., Zhang C., et al. Resonant tunneling diode as high speed optical/electronic transmitter. *10th UCMMT*, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1109/UCMMT.2017.8068497>
- [6] Srivastava A. Microfabricated terahertz vacuum electron devices: technology, capabilities and performance overview. *EJAET*, 2015, vol. 2, no. 8, pp. 54–64.
- [7] Vasilyev F., Isaev V., Korobkov M. The influence of the PCB design and the process of their manufacturing on the possibility of a defect-free production. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2021, vol. 97, no. 3, pp. 91–96. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2021.03.18>
- [8] Khayrnasov K.Z. Modeling and thermal analysis of heat sink layers of multilayer board. *Amazonia Investiga*, 2019, vol. 8, no. 23, pp. 664–670.
- [9] Sokolsky M.L., Sokolsky A.M. Electrochemical migration: stages and prevention. *Amazonia Investiga*, 2019, vol. 8, no. 22, pp. 757–765.
- [10] Мешков С.А. Методология учета технологических и эксплуатационных факторов при проектировании микро- и наноприборов. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*, 2019, т. 62, № 10, с. 921–928.
DOI: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2019-62-10-921-928>

- [11] Makeev M.O., Sinyakin V.Yu., Meshkov S.A. Reliability prediction of resonant tunneling diodes and non-linear radio signal converters based on them under influence of temperature factor and ionizing radiations. *Adv. Astronaut. Sc.*, 2020, vol. 170, pp. 655–665.
- [12] Makeev M.O., Sinyakin V.Yu., Meshkov S.A. Reliability prediction of RFID passive tags power supply systems based on RTD under given operating conditions. *MATEC Web Conf.*, 2018, vol. 224, art. 02095.
DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822402095>
- [13] Makeev M.O., Meshkov S.A., Cherkasov K.V. Modeling of resonant-tunneling diodes I-V characteristics' kinetics under destabilizing factors' influence during operation. *RusAutoCon*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867795>
- [14] Cherkasov K.V., Meshkov S.A., Makeev M.O. The software package for modeling and optimizing the electrical characteristics of non-linear frequency converters of radio signals based on resonant tunneling diodes. *RusAutoCon*, 2020, pp. 664–669.
DOI: <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208210>
- [15] Henini M. Molecular beam epitaxy: from research to mass production. Amsterdam, Elsevier, 2012.
- [16] Mack C.A. Fundamental principles of optical lithography. London, John Wiley & Sons, 2007.
- [17] Mack C.A. Field guide to optical lithography. Washington, SPIE Press, 2006.
- [18] Алкеев Н.В. Расчет параметров субгармонического смесителя на резонансно-туннельном диоде. *Радиотехника и электроника*, 2003, т. 48, № 4, с. 508–514.
EDN: OOOEAV
- [19] Алкеев Н.В. Анализ шумовых и динамических свойств субгармонического смесителя на резонансно-туннельном диоде. *Радиотехника и электроника*, 2004, т. 49, № 10, с. 1258–1263. EDN: OWKAGR
- [20] Ветрова Н.А., Иванов Ю.А., 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. EDN: PIWTPZ
- [21] Arykov V.A., Anichenko E.V., Erofeev T.V., et al. 150 nm copper metalized GaAs pHEMT with Cu/Ge ohmic contacts. *5th European Microwave Integrated Circuits Conf.*, 2010, pp. 166–169.
- [22] Karbownik P., Barańska A., Szerling A., et al. Low resistance ohmic contacts to n-GaAs for application in GaAs/AlGaAs quantum cascade lasers. *Optica Applicata*, 2009, vol. 39, no. 4, pp. 655–661.
- [23] Shin Y.-C., Murakami M., Wilkie E.L., et al. Effects of interfacial microstructure on uniformity and thermal stability of AuNiGe ohmic contact to n-type GaAs. *J. Appl. Phys.*, 1987, vol. 62, no. 2, pp. 582–590. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.339860>
- [24] Stock J., Malindretos J., Indlekofer K.M., et al. A vertical resonant tunneling transistor for application in digital logic circuits. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 2001, vol. 48, no. 6, pp. 1028–1032. DOI: <https://doi.org/10.1109/16.925221>

Черкасов Кирилл Вячеславович — канд. техн. наук, ассистент кафедры «Технологии приборостроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Мешков Сергей Анатольевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии приборостроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Макеев Мстислав Олегович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии приборостроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Шашурин Василий Дмитриевич — д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Технологии приборостроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Федоркова Нина Валентиновна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии приборостроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Черкасов К.В., Мешков С.А., Макеев М.О. и др. Анализ кинетики электрических характеристик субгармонического смесителя СВЧ-радиосигналов на базе резонансно-туннельного диода под действием эксплуатационных факторов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2025, № 2 (151), с. 35–47.
EDN: SXYRPI

**ANALYZING ELECTRICAL CHARACTERISTICS KINETICS
OF THE SUBHARMONIC SHF MIXER BASED
ON A RESONANT TUNNELL DIODE EXPOSED
TO THE OPERATIONAL FACTOR INFLUENCE**

K.V. Cherkasov
S.A. Meshkov
M.O. Makeev
V.D. Shashurin
N.V. Fedorkova

cherkasov@bmstu.ru
meschkow@bmstu.ru
m.makeev@bmstu.ru
schashurin@bmstu.ru
nvf@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper studies the SHF diode subharmonic frequency mixer on the local oscillator second harmonic. The AlGaAs resonant tunnel diode is applied as the nonlinear element. The paper shows that its use could

Keywords

SHF subharmonic mixer, reliability, quality assurance, resonant tunnel diode, gradual failure

increase the performance indicators, including the one-decibel compression power, intersection point of the 3rd order intermodulation products, and the operating frequency range upper boundary, compared to a frequency mixer based on the two Schottky barrier diodes. The paper studies probabilistic characteristics and kinetics of the mixer electrical parameters exposed to the technological and operational factors action to assess the gamma-percent resource. It considers design and technological errors at the diode and mixer production stages, as well as the degradation processes in the diode design elements, as the technological factors. Increased temperature is analyzed as the destabilizing factor in operation. Irreversible changes in the mixer electrical characteristics are presented as a result of the degradation processes in the diode multilayer semiconductor heterostructure, as it changes shape of the mixer current-voltage characteristic and parameters. The diode current-voltage characteristic kinetics and the mixer electrical characteristics are constructed taking into account their technological spread. The mixer gamma-percentage resource under the specified operating conditions is obtained. The paper provides recommendations for increasing the mixer reliability through design and technological optimization of the diode and mixer design parameters

Received 23.10.2024

Accepted 14.01.2025

© Author(s), 2025

The work was financially supported by the Russian Science Foundation (grant no. 22-19-00455, <https://rscf.ru/project/22-19-00455>)

REFERENCES

- [1] Mizuta H., Tanoue T. The physics and applications of resonant tunnelling diodes. Cambridge, Cambridge University Press, 2010.
- [2] Nagatsuma T., Fujita M., Kaku A., et al. Terahertz wireless communications using resonant tunneling diodes as transmitters and receivers. *Procs. of Int. Conf. on Telecommunications and Remote Sensing*, 2014, vol. 1, pp. 41–46. DOI: <https://doi.org/10.5220/0005421000410046>
- [3] Maekawa T., Kanaya H., Suzuki S., et al. Oscillation up to 1.92 THz in resonant tunneling diode by reduced conduction loss. *Appl. Phys. Express*, 2016, vol. 9, no. 2, art. 024101. DOI: <https://doi.org/10.7567/APEX.9.024101>
- [4] Diebold S., Tsuruda K., Kim J.-Y., et al. A terahertz monolithic integrated resonant tunneling diode oscillator and mixer circuit. *Procs. SPIE*, 2016, vol. 9856, art. 98560U. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2225209>

- [5] Wang J., Al-Khalidi A., Zhang C., et al. Resonant tunneling diode as high speed optical/electronic transmitter. *10th UCMMT*, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1109/UCMMT.2017.8068497>
- [6] Srivastava A. Microfabricated terahertz vacuum electron devices: technology, capabilities and performance overview. *EJAET*, 2015, vol. 2, no. 8, pp. 54–64.
- [7] Vasilyev F., Isaev V., Korobkov M. The influence of the PCB design and the process of their manufacturing on the possibility of a defect-free production. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2021, vol. 97, no. 3, pp. 91–96. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2021.03.18>
- [8] Khayrnasov K.Z. Modeling and thermal analysis of heat sink layers of multilayer board. *Amazonia Investiga*, 2019, vol. 8, no. 23, pp. 664–670.
- [9] Sokolsky M.L., Sokolsky A.M. Electrochemical migration: stages and prevention. *Amazonia Investiga*, 2019, vol. 8, no. 22, pp. 757–765.
- [10] Meshkov S.A. Methodology for consideration of technological and operational factors in design of micro- and nanodevices. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pribo-rostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2019, vol. 62, no. 10, pp. 921–928 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2019-62-10-921-928>
- [11] Makeev M.O., Sinyakin V.Yu., Meshkov S.A. Reliability prediction of resonant tunneling diodes and non-linear radio signal converters based on them under influence of temperature factor and ionizing radiations. *Adv. Astronaut. Sc.*, 2020, vol. 170, pp. 655–665.
- [12] Makeev M.O., Sinyakin V.Yu., Meshkov S.A. Reliability prediction of RFID passive tags power supply systems based on RTD under given operating conditions. *MATEC Web Conf.*, 2018, vol. 224, art. 02095.
DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822402095>
- [13] Makeev M.O., Meshkov S.A., Cherkasov K.V. Modeling of resonant-tunneling diodes I-V characteristics' kinetics under destabilizing factors' influence during operation. *RusAutoCon*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867795>
- [14] Cherkasov K.V., Meshkov S.A., Makeev M.O. The software package for modeling and optimizing the electrical characteristics of non-linear frequency converters of radio signals based on resonant tunneling diodes. *RusAutoCon*, 2020, pp. 664–669.
DOI: <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208210>
- [15] Henini M. Molecular beam epitaxy: from research to mass production. Amsterdam, Elsevier, 2012.
- [16] Mack C.A. Fundamental principles of optical lithography. London, John Wiley & Sons, 2007.
- [17] Mack C.A. Field guide to optical lithography. Washington, SPIE Press, 2006.
- [18] Alkeev N.V. Calculation of the parameters of a subharmonic mixer on a resonant tunneling diode. *Radiotekhnika i elektronika*, 2003, vol. 48, no. 4, pp. 508–514 (in Russ.). EDN: OOOQEA
- [19] Alkeev N.V. Analysis of the noise and dynamic properties of a subharmonic mixer based on a resonant tunnel diode. *J. Commun. Technol. Electron.*, 2004, vol. 49, no. 10, pp. 1178–1183. EDN: XMGXFP

- [20] Vetrova N.A., Ivanov Yu.A., Meshkov S.A., et al. Prospects of development of non-linear radio signal converters based on resonant-tunneling nanodiodes. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2012, no. 4 (89), pp. 100–113 (in Russ.). EDN: PIWTPZ
- [21] Arykov V.A., Anichenko E.V., Erofeev T.V., et al. 150 nm copper metalized GaAs pHEMT with Cu/Ge ohmic contacts. *5th European Microwave Integrated Circuits Conf.*, 2010, pp. 166–169.
- [22] Karbownik P., Barańska A., Szerling A., et al. Low resistance ohmic contacts to n-GaAs for application in GaAs/AlGaAs quantum cascade lasers. *Optica Applicata*, 2009, vol. 39, no. 4, pp. 655–661.
- [23] Shin Y.-C., Murakami M., Wilkie E.L., et al. Effects of interfacial microstructure on uniformity and thermal stability of AuNiGe ohmic contact to n-type GaAs. *J. Appl. Phys.*, 1987, vol. 62, no. 2, pp. 582–590. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.339860>
- [24] Stock J., Malindretos J., Indlekofer K.M., et al. A vertical resonant tunneling transistor for application in digital logic circuits. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 2001, vol. 48, no. 6, pp. 1028–1032. DOI: <https://doi.org/10.1109/16.925221>

Cherkasov K.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant, Department of Instrument Production Techniques, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Meshkov S.A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Instrument Production Techniques, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Makeev M.O. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Instrument Production Techniques, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Shashurin V.D. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Instrument Production Techniques, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Fedorkova N.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Instrument Production Techniques, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Cherkasov K.V., Meshkov S.A., Makeev M.O., et al. Analyzing electrical characteristics kinetics of the subharmonic SHF mixer based on a resonant tunnel diode exposed to the operational factor influence. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2025, no. 2 (151), pp. 35–47 (in Russ.). EDN: SXYRPI