

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СУБГАРМОНИЧЕСКОГО СМЕСИТЕЛЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ РАДИОСИГНАЛОВ НА БАЗЕ РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА

© 2022 г. К. В. Черкасов^{а, *}, С. А. Мешков^а, М. О. Макеев^а, В. Д. Шашурин^а, Б. В. Хлопов^а

^аМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
2-я Бауманская ул., 5, Москва, 105005 Российская Федерация

*E-mail: kvche@mail.ru

Поступила в редакцию 14.05.2022 г.

После доработки 14.05.2022 г.

Принята к публикации 30.07.2022 г.

Представлены результаты решения задачи повышения надежности субгармонического смесителя СВЧ-радиосигналов на второй гармонике гетеродина на базе резонансно-туннельного диода в заданных условиях эксплуатации путем конструкторско-технологической оптимизации электрических характеристик смесителя. Оптимальное сочетание электрических характеристик смесителя и обеспечивающие его параметры конструкции определены посредством разработанного авторами программного комплекса. В результате оптимизации гамма-процентная наработка до отказа увеличена в 1.49 раза.

DOI: 10.31857/S003384942212004X

ВВЕДЕНИЕ

Нелинейные преобразователи частоты (ПЧ) радиосигналов являются ключевыми элементами радиотехнических систем, так как с их помощью осуществляются основные радиотехнические преобразования. Одним из путей улучшения электрических характеристик ПЧ-радиосигналов является использование наноэлектронных приборов, к которым относятся резонансно-туннельные диоды (РТД) на основе AlGaAs/GaAs многослойных гетероструктур с поперечным токопереносом [1] в качестве нелинейных элементов (НЭ). Применение РТД в данной роли позволяет расширить рабочий диапазон частот и повысить помехоустойчивость ПЧ-радиосигналов [2–11]. Производство РТД возможно с использованием отработанных технологий микроэлектроники.

При проектировании ПЧ радиосигналов помимо обеспечения заданного уровня электрических характеристик прибора одной из приоритетных является задача обеспечения надежности в заданных условиях эксплуатации. В [12] изложена методология проектирования микро и нано-приборов и предложен вариант решения данной задачи, при котором в процесс проектирования прибора вводится этап конструкторско-технологической (КТ) оптимизации.

Цель данной работы – определить номинальные значения параметров конструкции прибора и его электрических характеристик, максимизирующих заданную целевую функцию, без изменения технологических допусков на параметры конструкции и определяемых конструктором допусков на электрические характеристики оптимизируемого прибора.

Приведены результаты КТ-оптимизации электрических характеристик субгармонического смесителя (СГС) на второй гармонике гетеродина на базе РТД в заданных условиях эксплуатации с целью обеспечения его надежности.

1. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ

Объектом исследования является однодиодный СГС диапазона 10...11 ГГц с РТД в качестве нелинейного элемента. Резонансно-туннельная структура (РТС) диода состоит из двух AlAs-барьеров и располагающейся между ними GaAs-квантовой ямы. Смеситель состоит из делителя мощности; диодной секции, в которой располагается нелинейный элемент (НЭ), и полосно-пропускающего фильтра. В качестве электрических характеристик оптимизируемого СГС РТД рассматривали коэффициент передачи (КП) промежуточной частоты и верхние границы динамиче-

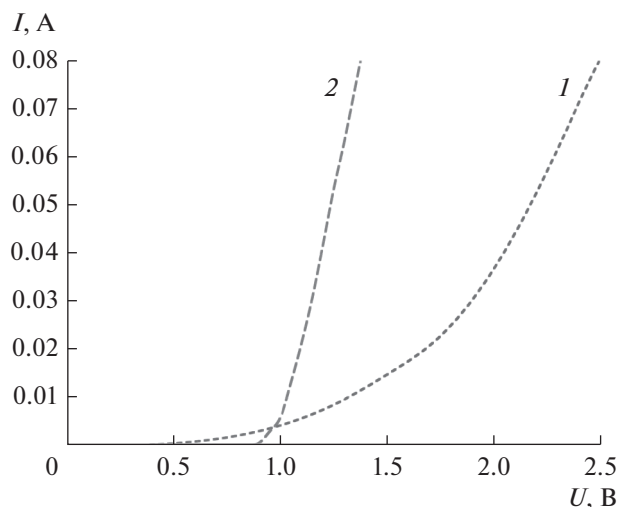


Рис. 1. Начальный участок ВАХ РТД (1) и ДБШ (2).

ского диапазона по 1 дБ-компрессии и интермодуляции. На основании представленных разработчиком требований на них установлены следующие допуски: коэффициент передачи не менее -16 дБ; верхняя граница динамического диапазона по 1 дБ-компрессии не менее 6 дБм; положение точки IP3, по которому определяется верхняя граница динамического диапазона по интермодуляции, – не ниже 20 дБм.

Методология КТ-оптимизации подробно описана в [12], а ее практическая реализация в виде программного комплекса – в [13]. В качестве целевой функции был выбран гамма-процентный ресурс при $\gamma = 0.99$ $T_{\gamma=0.99}$.

Моделирование вольт-амперной характеристики (ВАХ) РТД и ее кинетики в заданных условиях эксплуатации выполнено с помощью специализированного модуля разработанного нами программного комплекса (рис. 1). Алгоритмы моделирования начального участка ВАХ РТД и воздействия эксплуатационных факторов на электрические характеристики диода описаны в [14]. Параметры AuGeNi-омических контактов РТД, отражающие восприимчивость РТД к воздействию эксплуатационных факторов, а также параметры деградационных процессов, протекающих в РТД в заданных условиях эксплуатации, определены в ходе экспериментальных исследований [15–21].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сравнение электрических характеристик СГС на основе РТД до оптимизации (параметры конструкции диода до и после оптимизации приведены ниже) с аналогом на основе диода с барьером Шоттки (ДБШ) показало, что КП промежуточной частоты СГС на основе РТД на 3 дБ ниже аналога на ДБШ. В то же время прибор на основе

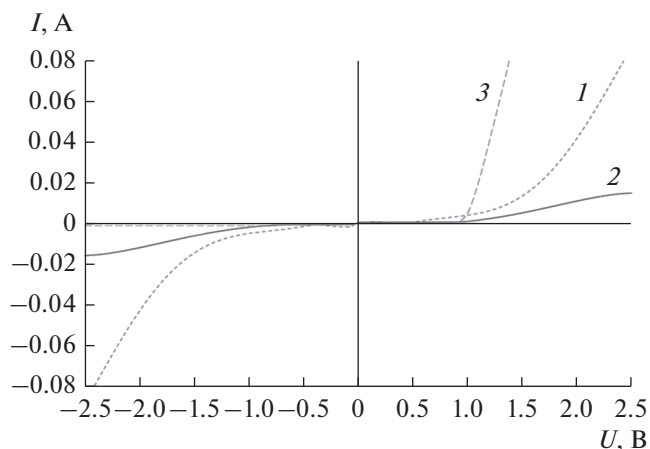


Рис. 2. Номинальная (1) и оптимальная (2) формы начального участка ВАХ НЭ оптимизируемого смесителя на основе РТД и начальный участок ВАХ ДБШ (3).

РТД обладает в 3.55 раз более широким динамическим диапазоном по 1 дБ-компрессии (верхняя граница динамического диапазона смесителя на основе РТД расположена на 7 дБм правее аналога на ДБШ) и в 2.26 раз более широким динамическим диапазоном по интермодуляции (точка IP3 СГС на основе РТД расположена на 16 дБм правее аналога на ДБШ).

Конструкторско-технологическую оптимизацию проводили с целью повышения надежности СГС в условиях воздействия температурного фактора. Критериями годности являются установленные разработчиком допуски на рассматриваемые электрические характеристики. Анализ надежности СГС показал, что основным механизмом отказа СГС является постепенный отказ, возникающий в результате падения коэффициента передачи промежуточной частоты ниже порогового значения из-за необратимых деградационных процессов, протекающих в РТД в заданных условиях эксплуатации. Кинетика других рассматриваемых электрических характеристик СГС имеет аналогичный характер, однако КП промежуточной частоты достигает порогового значения быстрее. В результате анализа надежности установлено, что наиболее опасной с точки зрения возникновения отказов является частота сигнала 10.90 ГГц, так как на ней КП промежуточной частоты наиболее близок к пороговому значению.

В результате проведенной КТ-оптимизации СГС определено сочетание параметров конструкции РТД, обеспечивающих оптимальную для данного прибора форму ВАХ (рис. 2), и параметров пассивных элементов СГС. Синтезированное сочетание параметров конструкции смесителя позволяет при воздействии температуры 125°C увеличить $T_{\gamma=0.99}$ в 1.49 раза (рис. 3). Гамма-процентный ресурс СГС определен в результате ана-

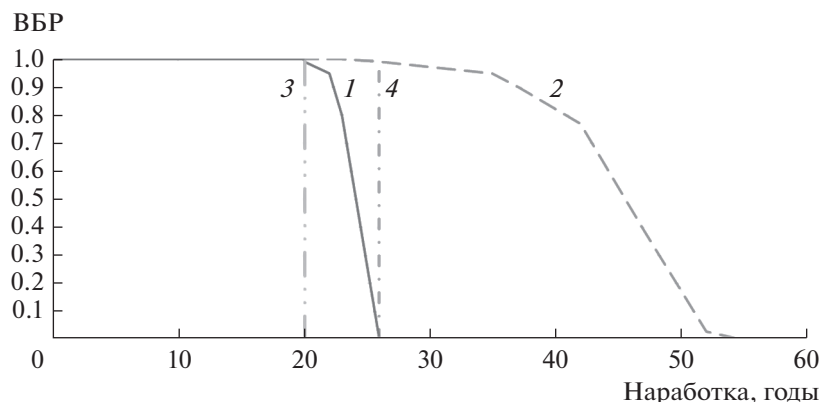


Рис. 3. Зависимость ВБР субгармонического смесителя на основе РТД от времени при температуре эксплуатации 125°C: 1 – ВБР до оптимизации; 2 – ВБР после оптимизации; 3 – $T_{\gamma=0.99}$ до оптимизации; 4 – $T_{\gamma=0.99}$ после оптимизации.

лиза зависимости вероятности безотказной работы (ВБР) смоделированной выборки из 100 СГС от наработки в условиях воздействия температуры 125°C. Указанная вероятность выборки серии в момент времени t определяется как отношение числа отказавших приборов к размеру выборки. Отказ прибора фиксируется при выходе хотя бы одной из рассматриваемых электрических характеристик за пределы установленных допусков. Гамма-процентный ресурс при $\gamma = 0.99$ определяется как наработка, при которой ВБР составляет 0.99.

Оптимальная форма ВАХ РТД достигается посредством увеличения ширины симметричных барьеров двухбарьерной AlAs/GaAs РТС в шесть раз по сравнению с исходной (с 1.13 до 6.79 нм), увеличения ширины ямы на 71% (с 3.96 до 6.79 нм) и увеличения диаметра мезы на 13% (с 37 до 42 мкм) без изменения химического состава слоев РТС. Параметры пассивных элементов СГС были оптимизированы под новую форму ВАХ НЭ в процессе КТ-оптимизации. В результате оптимизации номинальные значения электрических характеристик СГС изменились следующим образом: КП промежуточной частоты на частоте сигнала 10.90 ГГц увеличен на 2.39 дБ (с –12.32 до –9.93 дБ), динамический диапазон по 1 дБ-компрессии расширен на 1 дБ (с 9.80 до 10.80 дБм), по интермодуляции – на 1.40 дБ (точка IP3 смещена с 28.75 на 30.15 дБм) СГСм. В результате КТ-оптимизации удалось приблизить значение КП промежуточной частоты СГСм на основе РТД к значению аналога на основе ДБШ (9.93 дБ у СГСм на основе РТД и 9.82 дБ у аналога на основе ДБШ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате КТ-оптимизации широкополосного СГС посредством разработанного программного комплекса гамма-процентный ресурс $T_{\gamma=0.99}$ в за-

данных условиях эксплуатации увеличен в 1.49 раза. Полученный результат достигнут за счет определения оптимального сочетания параметров конструкции РТД и СГСм, обеспечивающих наилучшее с точки зрения надежности сочетание электрических характеристик смесителя. Достигнутый результат подтверждает возможность решения задачи обеспечения надежности ПЧ-радиосигналов на основе РТД в заданных условиях эксплуатации с помощью КТ-оптимизации электрических характеристик ПЧ без изменения технологии его изготовления.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-00615, <https://rscf.ru/project/22-29-00615/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mizuta H., Tanoue T. The Physics and Applications of Resonant Tunneling Diodes. Cambridge: Univ. Press, 2006. P. 133.
2. Asada M., Suzuki S. // Sensors. 2021. V. 21. № 4. P. 1384.
3. Sinyakin V.Yu., Makeev M.O., Meshkov S.A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 741. P. 012160.
4. Wang J., Al-Khalidi A., Zhang C. et al. // Proc. 10th UK-Europe-China Workshop on Millimeter Waves and Terahertz Technologies (UCMMT). Liverpool. 11–13 Sept. 2017. N.Y.: IEEE, 2017. Article No. 8068497.
5. Nagatsuma T., Fujita M., Kaku A. et al. // Proc. 3rd Int. Conf. Telecommunications and Remote Sensing (ICTRS). Luxembourg. 26–27 Jun. 2014. Setúbal: Scitepress, 2014. P. 41.
6. Hori T., Ozono T., Orihashi N., Asada M. // Appl. Phys. 2006. V. 99. № 6. P. 064508.

7. *Kanaya H., Shibayama H., Suzuki S., Asada M.* // Appl. Phys. Express. 2012. V. 5. № 12. P. 124101.
8. *Maekawa T., Kanaya H., Suzuki S., Asada M.* // Appl. Phys. Express. 2016. V. 9. № 2. P. 024101.
9. *Srivastava A.* // Europ. J. Advances in Engineering and Technology. 2015. V. 2. № 8. P. 54
10. *Nishida Y., Nishigami N., Diebold S. et al.* // Sci. Rep. 2019. V. 9. Article No. 18125.
11. *Diebold S., Tsuruda K., Kim J.-Y. et al.* // Proc. SPIE 2016. V. 9856. P. 98560U.
12. *Мешков С.А.* // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62. № 10. С. 921.
13. *Черкасов К.В., Мешков С.А., Макеев М.О., Шашурин В.Д.* // РЭ. 2022. Т. 67. № 6. С. 590.
14. *Макеев М.О., Черкасов К.В., Иванов Ю.А., Мешков С.А.* // Успехи совр. радиоэлектроники. 2019. № 3. С. 28.
15. *Макеев М.О., Иванов Ю.А., Мешков С.А.* // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50. № 1. С. 83.
16. *Makeev M.O., Meshkov S.A., Ivanov Y.A.* // Key Engineering Mater. 2017. V. 724. P. 48.
17. *Makeev M.O., Meshkov S.A., Sinyakin V.Yu.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 917. P. 092004.
18. *Makeev M.O., Sinyakin V.Yu., Meshkov S.A.* // Adv. Astronautical Sci. 2020. V. 170. P. 655.
19. *Vasilyev F., Isaev V., Korobkov M.* // Przegląd Elektrotechniczny. 2021. V. 97. № 3. P. 91.
20. *Khayrnasov K.Z.* // Amazonia Investiga. 2019. V. 8. № 23. P. 664.
21. *Sokolsky M., Sokolsky A.* // Amazonia Investiga. 2019. V. 8. № 22. P. 757.