

УДК 621.372.2

В.Г. Нечаев, А.С. Загородний, А.М. Заболоцкий

Пассивная компенсация температурной нестабильности сверхвысокочастотных диодных детекторов мощности

Отображены результаты исследования температурного влияния на характеристики низкобарьерных диодов ZB-28 и диодных детекторов мощности СВЧ-сигналов на их основе. Предложен способ компенсации температурной нестабильности детектора мощности, реализованный за счет включения в схему диодного детектора дополнительного опорного диода. Представлены основные результаты экспериментальных исследований разработанного детектора с пассивной температурной компенсацией.

Ключевые слова: диодный детектор мощности, низкобарьерный диод, температурные испытания, отклонение выходного напряжения, температурная стабильность.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-20-26

Развитие техники крайне высоких и сверхвысоких частот (КВЧ и СВЧ) напрямую связано со значительным ростом требований, предъявляемых к контрольно-измерительной аппаратуре микроволнового диапазона, в частности, к устройствам, предназначенным для преобразования сигналов.

В работе рассматривается способ пассивной компенсации температурных погрешностей на характеристики детектора мощности, выполненного на основе низкобарьерного диода.

Температурное влияние на параметры СВЧ-диодов

Выпрямительные диоды широко используются в качестве детекторов для измерения мощности СВЧ-сигналов в заданном диапазоне частот или на определенной рабочей частоте. Данный тип детекторов позволяет выделять огибающую высокочастотных сигналов за счет преобразования сигналов переменного тока в сигналы постоянного тока, возникающего из-за нелинейной вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода и фильтрующих свойств самого детектора [1].

Основным недостатком данного типа диодов является недостаточная чувствительность для различных вариантов использования, так как при измерении мощности малых уровней значительное влияние оказывают колебания температуры. Данное явление обусловлено свойствами полупроводников: с увеличением температуры удельное сопротивление полупроводника сильно уменьшается и при достаточно высоких температурах становится крайне малым [2].

Для описания функционирования диодов используется аналитическая формула для ВАХ, учитывающая омическое сопротивление диода:

$$I(U) = S \cdot A \cdot T \cdot e^{-q\psi/kT} \cdot e^{\left(\frac{q(U - I_s R_j)}{n \cdot k \cdot T}\right)}, \quad (1)$$

где S – площадь перехода, м^2 ; A – постоянная Ричардсона, для GaAs $8,4 \cdot 10^4 \text{ A}/(\text{K}^2 \cdot \text{м}^2)$; k – постоянная Больцмана, $\text{Дж} \cdot \text{K}^{-1}$; T – температура, K ; q – заряд электрона, Кл ; ψ – ширина запрещенной зоны полупроводника, эВ ; I_s – ток насыщения, A ; R_j – сопро-

тивление перехода, Ом ; n – коэффициент идеальности.

На рис. 1 представлены характеристики германиевого и кремниевого диодов, иллюстрирующие зависимость ВАХ от температуры [3].

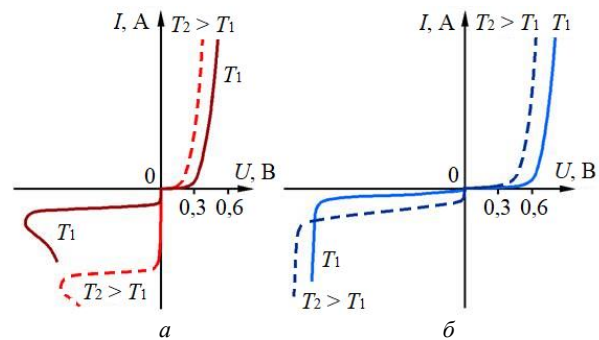


Рис. 1. Влияние температуры на ВАХ германиевого (а) и кремниевого (б) диодов

Из выражения (1) следует, что ток, протекающий через диод, пропорционален температуре.

При создании детекторов СВЧ-сигналов часто применяются диоды Шоттки на основе арсенида галлия (GaAs), выпрямительные свойства которых основаны на использовании выпрямляющего электрического перехода между металлом и полупроводником [3]. Основным недостатком использования диодов Шоттки является низкая чувствительность для сигналов малых уровней мощности. Это обусловлено большой высотой потенциального барьера, слабо зависящей от выбора металла для формирования перехода металл-полупроводник.

Одним из вариантов решения этой проблемы является применение других видов нелинейных элементов со свойствами, схожими с диодами Шоттки. Таким вариантом является переход к диодам на основе планарно-легированных структур (ПЛС) [4], которые в настоящее время широко используются зарубежными компаниями (Avago Technologies, Keysight Technologies, Aeroflex/Metelics).

К основным свойствам данной структуры следует отнести зависимость высоты потенциального барьера от толщин легирования эпитаксиальных

слоёв, а также положения дельта-слоя внутри слоя с собственной проводимостью, что позволяет создавать низкобарьерные диоды [5]. Особенностью использования низкобарьерных диодов по сравнению с другими выпрямляющими диодами является необходимость учета и описания обратной ветви ВАХ вследствие высокого обратного тока в рабочем диапазоне обратного напряжения.

Для исследования температурного влияния в настоящей работе было проведено моделирование низкобарьерного GaAs диода ZB-28 на основе планарно-легированных структур производства АО «НПФ «Микран», предназначенного для работы в составе гибридно-интегральных СВЧ-модулей с общей герметизацией. Данный диод характеризуется широкими динамическим и частотным диапазонами, высоким быстродействием и эффективной работой в режиме без смещения [6]. Параметры ZB-28 представлены в таблице.

Параметры ZB-28 при $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$

Обозначение	Наименование	Ед. изм.	Значение
R_s	Последовательное сопротивление	Ом	30
C_p	Ёмкость корпуса	фФ	35
C_j	Ёмкость перехода	фФ	24
L_p	Индуктивность выводов	нГн	0.3
R_v	Выходное сопротивление	кОм	1.8
G	Чувствительность по напряжению ($f = 10\text{ ГГц}$, согласован на 50 Ом)	мВ/мВт	550
TSS	Тангенциальная чувствительность ($f = 10\text{ ГГц}$, согласован на 50 Ом)	дБм	-60

Для моделирования температурного влияния потребовалось разработать модель детекторного диода ZB-28, отражающую основные статистические и динамические характеристики. Имеется публикация [7], в которой описан процесс разработки модели детекторного диода ZB-28. Отличительной особенностью модели в настоящей работе является использование расширенного списка SPICE-параметров для описания влияния температуры.

Моделирование диода ZB-28 основано на применении SPICE-параметров, полученных путём экстракции из статистических характеристик диодов. SPICE-модель полупроводникового диода состоит из трех составляющих:

1. Эквивалентная схема диода.
2. Перечень параметров модели диода.
3. Совокупность основных уравнений, отражающих зависимости элементов эквивалентной схемы и ряда параметров модели от напряжений, токов, температуры и т.д.

В качестве исходных данных выступает выборка из десяти идентичных диодов ZB-28. Для данных диодов были экспериментально измерены вольт-амперные характеристики для прямой и обратной ветвей в широком диапазоне температур от -60 до $+85\text{ }^\circ\text{C}$. Далее в пределах выборки было произведе-

но усреднение ВАХ для каждой из температур. Результат представлен на рис. 2, 3.

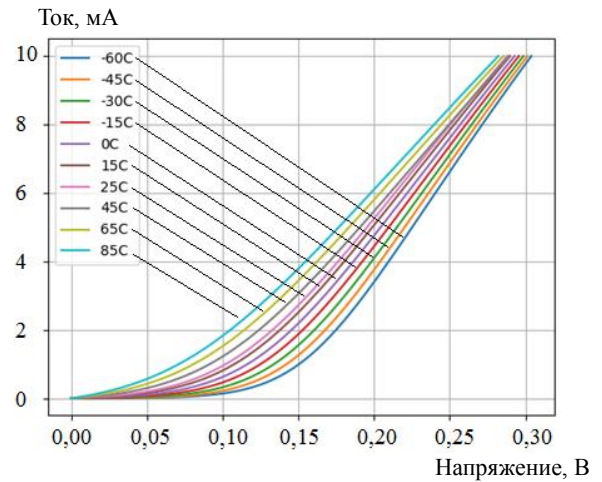


Рис. 2. Прямая ветвь ВАХ диода ZB-28

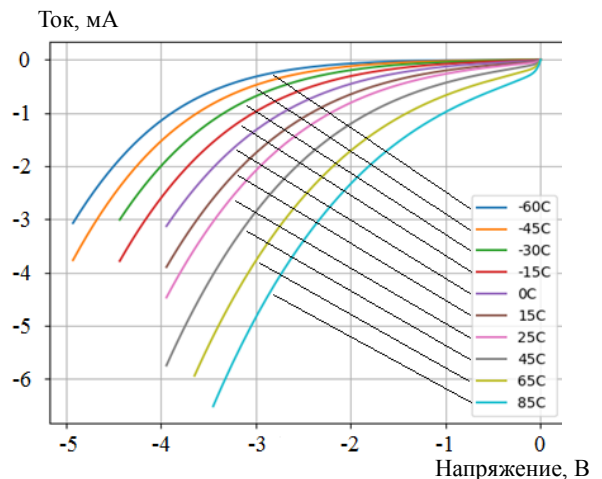


Рис. 3. Обратная ветвь ВАХ диода ZB-28

Модель ZB-28 представляет собой встречно-параллельное соединение двух диодов, как показано на рис. 4. Использование данной модели обусловлено спецификой низкобарьерных диодов, а именно необходимостью описывать обратную ветвь ВАХ вследствие высокого обратного тока в рабочем диапазоне обратного напряжения [8]. На рис. 4 VD_1 характеризует работу диода при прямом смещении, а VD_2 – при обратном.

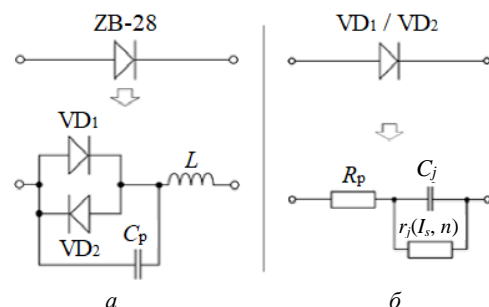


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема [7]: а – эквивалентная схема диода; б – эквивалентная схема диода с учётом схемы замещения выпрямляющего диода

Модель диода на основе SPICE-параметров характеризуется совокупностью параметров, которые с некоторой точностью описывают физический процесс, протекающий внутри полупроводникового элемента. Параметр R_s характеризует последовательное сопротивление диода. В модели за зависимость R_s от температуры отвечают два коэффициента – линейный (T_{rs1}) и квадратичный (T_{rs2}). В реальности же эта зависимость может иметь более сложную форму. Всего насчитывается более ста различных SPICE-параметров, но в данном исследовании использовалось тринадцать.

Для создания модели диода ZB-28 была использована САПР Advanced Design System (рис. 5). Из справочной информации [6] взяты емкость перехода C_j и последовательное сопротивление R_s . На основе экспериментальных значений ВАХ был определен ток насыщения I_s . С помощью инструмента оптимизации были определены и адаптированы остальные данные для модели диода со встречно-параллельным соединением. Полученные в результате моделирования ВАХ диода приведены на рис. 6, 7.

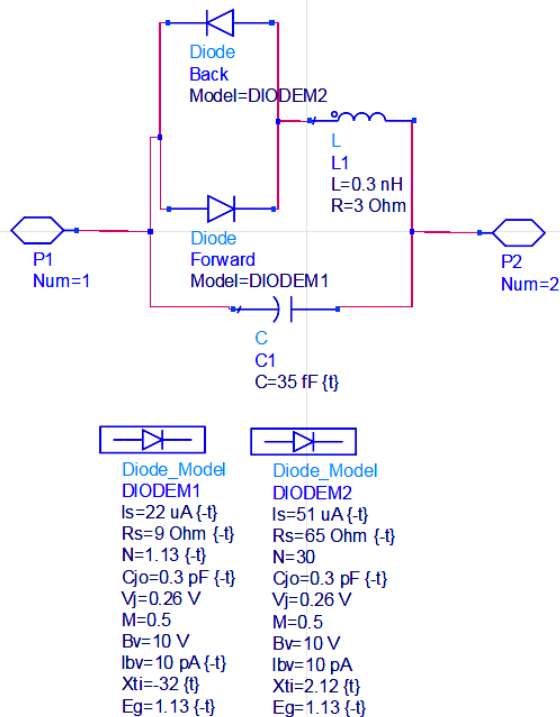


Рис. 5. Модель диода ZB-28, реализованная в САПР Advanced Design System

За счёт использования полученных SPICE-параметров, определена зависимость сопротивления перехода диода ZB-28 от температуры (рис. 8).

Проанализировав полученные данные из рис. 8, можно определить, что при низких значениях температуры происходит повышение сопротивления перехода, что, в свою очередь, приводит к существенному отклонению выходного напряжения детектора. Влияние этого сопротивления на выходное напряжение детектора, описываемое выражением

$$U_{out} = U_{rec} \cdot \frac{R_l}{R_l + R_j}, \quad (2)$$

где U_{rec} – выпрямленное напряжение; R_l – нагрузочное сопротивление детектора, приводит к существенному отклонению выходного напряжения детектора от выпрямленного напряжения.

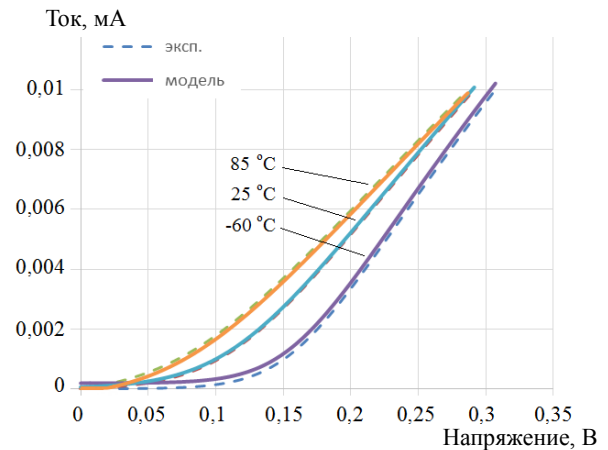


Рис. 6. Сравнение прямой ветви ВАХ модели ZB-28 и экспериментальной ВАХ диода

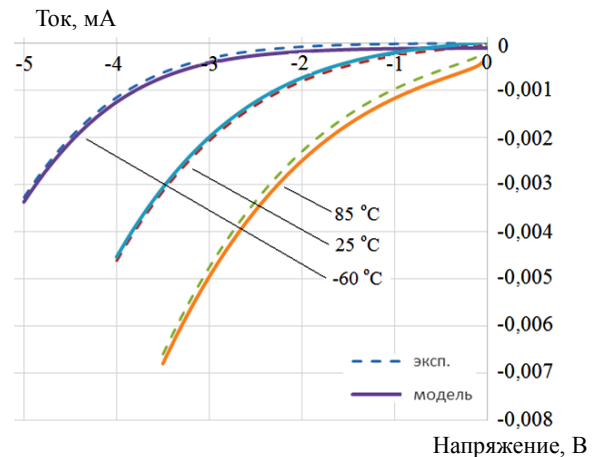


Рис. 7. Сравнение обратной ветви ВАХ модели ZB-28 и экспериментальной ВАХ диода

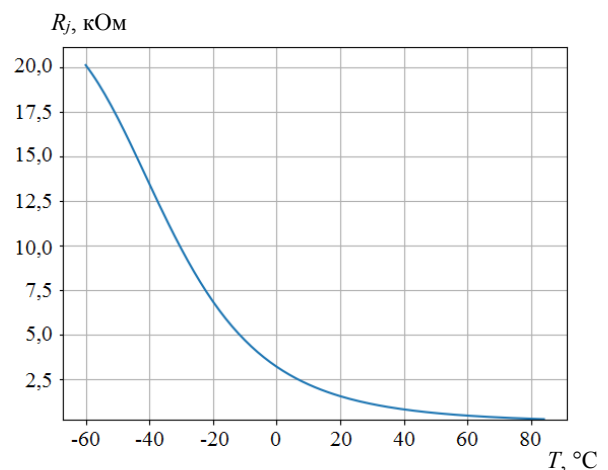


Рис. 8. Зависимость сопротивления перехода от температуры

Представленные выражения и рисунки свидетельствуют об отклонении зависимости падения

напряжения на диоде за счет изменения его температуры и сопротивления перехода.

Способ пассивной температурной компенсации

Схема амплитудного диодного детектора, представленная на рис. 9, содержит резистор $R_{согл}$ для согласования входного импеданса детектора, диод VD_1 и конденсатор C_p . При подключении внешней нагрузки конденсатор детектора совместно с импедансом нагрузки образуют фильтр низких частот (ФНЧ), необходимый для выделения низкочастотного выходного напряжения.

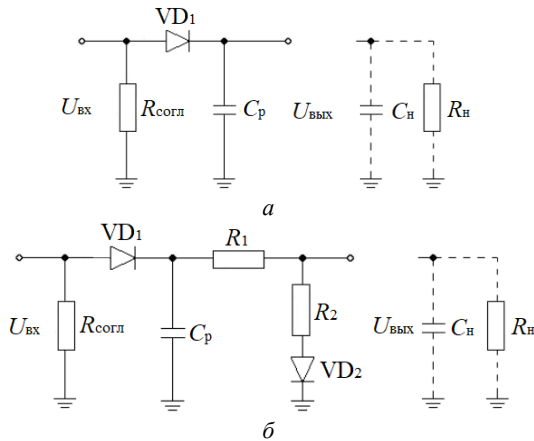


Рис. 9. Диодный детектор без схемы температурной компенсации (а) и с ней (б)

Отличительной особенностью схемы диодного детектора с температурной компенсацией является наличие опорного диода в схеме детектора. Идея данного метода заключается в компенсации изменения сопротивления диода путём включения в схему детектора идентичного опорного диода через переменный делитель [9]. Таким образом, при изменении температуры у обоих диодов аналогичным образом изменяются сопротивления переходов, за счёт чего компенсируется изменение выходного напряжения.

Недостатком данного метода температурной компенсации является ответвление части сигнала в цепь с опорным диодом. Так как в схеме на рис. 9, б для резистивного делителя используются одинаковые номиналы сопротивлений R_2, R_3 , то для этой схемы значение выходного напряжения детектора будет меньше приблизительно на 3 дБ по сравнению со схемой на рис. 9, а.

Значения сопротивлений и ёмкостей для схемы детектора были выбраны на основе уже существующих детекторов мощности серии Д5А СВЧ-сигналов производства АО «НПФ «Микран»: $R_{согл} = 50 \text{ Ом}$, $C_p = 30 \text{ пФ}$ [10]. Выбор номиналов резистивного делителя $R_2 = R_3 = 1 \text{ кОм}$ производился исходя из соображений обеспечения соизмеримого выходного сопротивления детектора мощности для схемы с опорным диодом и без него.

Используя инструменты моделирования ADS [11] и описанную ранее модель диода ZB-28, была получена модель диодного детектора Д5А с температурной компенсацией.

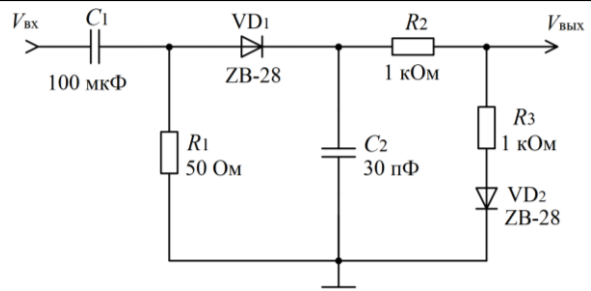


Рис. 10. Схема детектора Д5А на основе диода ZB-28 с дополнительным опорным диодом

Результаты моделирования температурного влияния на выходные показания детектора представлены на рис. 11.

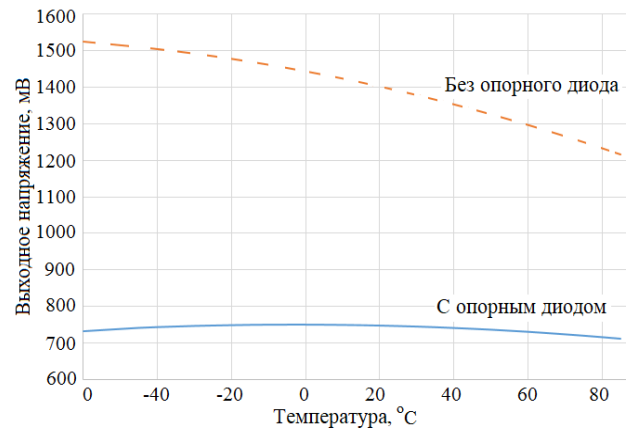


Рис. 11. Зависимость выходного напряжения от температуры на частоте 15 ГГц при $P_{вх} = 15 \text{ дБм}$

Из полученных зависимостей на рис. 11 можно рассчитать уход показаний детектора при отклонении температуры от значения $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Для интервала температур от -60 до $+25 \text{ }^\circ\text{C}$ уход показаний детектора при использовании схемы температурной компенсации уменьшился с 10 до 1,5%. Для интервала температур от 25 до $85 \text{ }^\circ\text{C}$ уход показаний уменьшился с 12 до 4%.

Для модернизации схемы и подключения опорного делителя была разработана плата микрополосковая в нескольких исполнениях в зависимости от номиналов резисторов делителя. Резисторы выполнены по тонкоплёночной технологии, номиналы резисторов 1000 Ом для варианта 1 и 2000 Ом для варианта 2. Экспериментальный образец был изготовлен на основе детектора Д5А, внутри которого дополнительно были размещены делитель напряжения и опорный диод.

После изготовления экспериментального образца были проведены испытания на устойчивость к воздействию повышенной и пониженной температуры. Во время испытаний измерялись частотные и динамические характеристики детектора мощности. Частотные характеристики представляют собой зависимость выходного напряжения детектора от частоты для различных уровней мощностей и температур. Динамические характеристики представляют собой зависимость выходного напряжения детектора от мощности на входе детектора для различных частот и температур.

Измерение частотных и динамических характеристик производилось в соответствии со схемой на рис. 12. В качестве генератора и измерителя использовался анализатор цепей скалярный P2M-18A, в качестве делителя мощности – ДМ2А-32-03Р, а также диодный детектор мощности с температурной компенсацией и диодный детектор мощности без температурной компенсации, находящиеся в термокамере. Температурные условия создавались с помощью камеры тепла и холода ВТХ-475Е [12].

Методика измерений заключается в установке в камере тепла и холода температуры в диапазоне от

–45 до +55 °С с шагом 5 °С. Далее, когда температура в камере установилась, осуществляется поддержание данной температуры в течение 5 мин. По истечении 5 мин начинается измерение частотных и динамических характеристик детекторов, и для камеры тепла и холода устанавливается новая целевая температура. После установки новой целевой температуры начинается следующее измерение.

Для более наглядного отображения результатов измерений приведены нормированные зависимости выходного напряжения от температуры при различном уровне входной мощности (рис. 13).

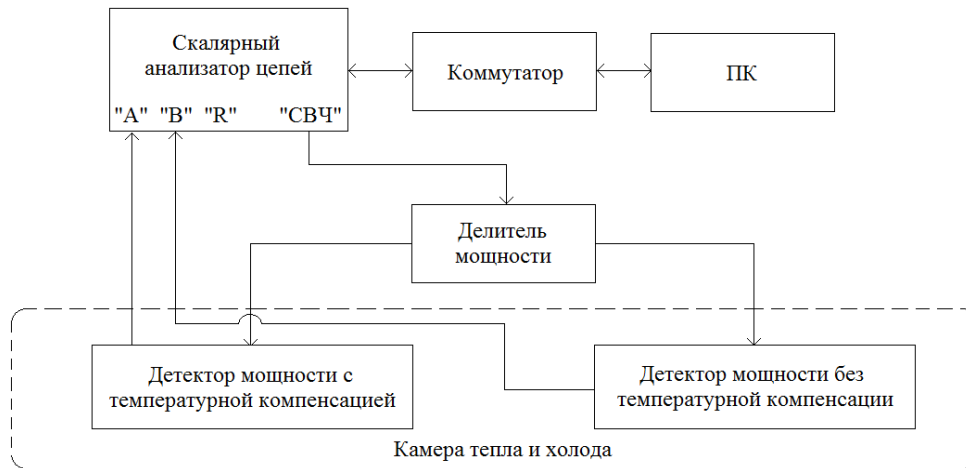


Рис. 12. Схема экспериментальной установки

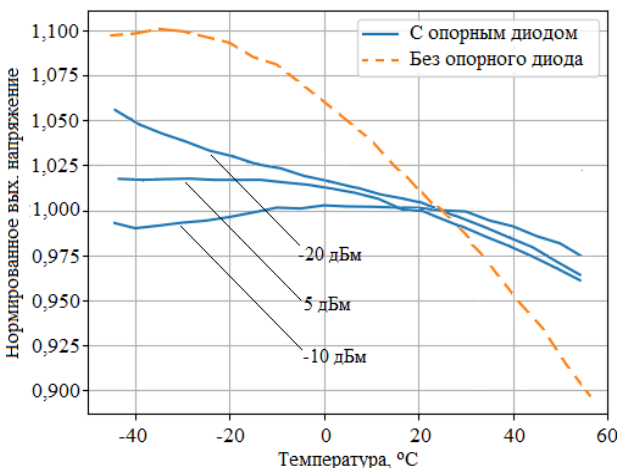


Рис. 13. Зависимость нормированного выходного напряжения от температуры для частоты 10 ГГц

Заключение

На основе аналитических выражений оценена степень влияния температуры на характеристики диодов, а именно то, что прямое падение напряжения при фиксированном токе и чувствительность диода зависят от изменения температуры.

На основе проведенных температурных испытаний экспериментального образца диодного детектора можно утверждать, что детектор Д5А с температурной компенсацией в диапазоне мощности от –30 до 10 дБм во всём частотном диапазоне имеет более стабильные результирующие характеристики,

чем детектор без температурной компенсации. Удалось уменьшить влияние температуры более чем в 16 раз для отрицательных температур и в 4 раза для положительных.

Данные исследования свидетельствуют о необходимости разработки схем детекторов и измерительных устройств на основе представленных диодов, позволяющих обеспечивать компенсацию погрешностей измерений, вызванных температурными нестабильностями.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90196.

Литература

1. Загородний А.С. Детекторы мощности сигналов СВЧ компании «Микран» / А.С. Загородний, А.В. Черепанов // СВЧ-электроника. – 2016. – № 1. – С. 52–56.
2. Калашников С.Г. Электричество: учеб. пособие. – 6-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 624 с.
3. Пасынков В.В. Полупроводниковые приборы: учеб. для вузов / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин. – 4-е изд. – М.: Высшая школа, 1987. – 479 с.
4. Malik R.J. et al. Planar-doped barriers in GaAs by molecular beam epitaxy // Electron Lett. – 1980. – Vol. 16, No. 22. – P. 836–838.
5. Юнусов И.В. Разработка и исследование сверхвысокочастотных гетероструктурных GaAs низкобарьерных диодов и монолитных интегральных схем на их основе: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07. – Томск, 2017. – 151 с.
6. ZB-28. Zero Bias Diode: Preliminary Datasheet. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.micran.ru/>

upload/iblock/f54/xpl4gwobpu33ozv85k24w04dl48t00a5/ZB-28_V01.0002.pdf (дата обращения: 25.08.2023).

7. Загородный А.С. Моделирование диодов с использованием SPICE-параметров / А.С. Загородный, А.В. Дроздов, М.И. Иванова // Радиоэлектроника, электроника и энергетика: XIX Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: тез. докл.: в 4 т. – Т. 1. – М.: Изд. дом МЭИ, 2013. – 259 с.

8. Planar zero bias Schottky diode detector operating in the E-and W-band / M. Hrobak, M. Sterns, M. Schramm, W. Stein, L.P. Schmidt // Microwave Conference (EuMC). – IEEE. – 2013. – P. 179–182.

9. Нечаев В.Г. Температурная коррекция широкополосных детекторов мощности на основе низкобарьерных диодов / В.Г. Нечаев, А.И. Добриков, А.С. Загородный // Изв. высш. учеб. завед. России. Радиоэлектроника. – 2018. – № 3. – С. 79–84.

10. Каталог «Контрольно-измерительная аппаратура и элементы СВЧ-тракта» // АО «НПФ «Микран». – 2023. – 260 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.micran.ru/upload/uf/453/mtrnqdfioregh7r678571imt389yse2m/C_%D0%9A%D0%98%D0%90_RU_3.52_WEB.pdf (дата обращения: 20.06.2023).

11. Diode Detector Simulation using Agilent Technologies EEsof ADS Software, Application Note 1156 // Agilent Technologies, Inc. – 1999. – P. 1–4.

12. BTZ-475E Model Details [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://espec.com/na/products/model/btx-475> (дата обращения: 30.08.2023).

studies for the developed detector with passive temperature compensation are presented.

Keywords: diode power detector, low barrier diode, temperature testing, output voltage deviation, temperature stability.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-3-20-26

References

1. Zagorodny A.S., Cherepanov A.V. *Detektory moshchnosti signalov SVCh kompanii «Micran»* [Microwave signal power detectors of Micran company]. *SVCh-elektronika*, 2016, no. 1, pp. 52–56 (in Russ.).

2. Kalashnikov S.G. *Elektrichestvo* [Electricity]. Moscow, FIZMATLIT, 2003. 624 p. (in Russ.).

3. Pasyukov V. V., Chirkin L. K. *Poluprovodnikovyye pribory* [Semiconductor devices]. Moscow, Vysshaya shkola, 1987. 479 p. (in Russ.).

4. Malik R.J., Aucoin T.R., Ross R.L., Board K., Wood C.E.C., Eastman L.F. Planar-doped barriers in GaAs by molecular beam epitaxy, *Electronics Letters*, 1980, vol. 16, no. 22, pp. 836–838.

5. Yunusov I.V. *Razrabotka i issledovanie sverkh-vysokochastotnykh geterostrukturykh GaAs nizkoba-r'ernykh diodov i monolitnykh integral'nykh skhem na ikh osnove. Diss. kand. tekhn. nauk*, [Development and research of ultrahigh frequency heterostructural GaAs low-barrier diodes and monolithic integrated circuits based on them. Dissertation for Candidate of sciences title]. Tomsk, 2017, 151 p. (in Russ.).

6. ZB-28. Zero Bias Diode: Preliminary Datasheet, pp. 1–2. Available at: http://micran.com/sites/micran_eng/data/UserFile/pdf/mmic/ZB-28.pdf, free (Accessed: June 25, 2023) (in Russ.).

7. Zagorodny A.S., Drozdov A.V., Ivanova M.I. *Modelirovanie diodov s ispol'zovani-em SPICE-parametrov* [Simulation of diodes using SPICE parameters]. *Radioelektronika, elektronika i energetika: devyatnadsataya mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. studentov i aspirantov, tezisy dokladov*, Moscow, 2013, vol. 4. 259 p. (in Russ.).

8. Hrobak M., Sterns M., Schramm M., Stein W., Schmidt L.P. Planar zero bias Schottky diode detector operating in the E-and W-band, *Microwave Conference (EuMC)*, IEEE, 2013, pp. 179–182.

9. Nechaev V.G., Dobrikov A.I., Zagorodny A.S. *Temperaturnaya korrektsiya shirokopolosnykh detektorov moshchnosti na osnove nizkobar'ernykh diodov* [Temperature correction of broadband power detectors based on low-barrier diodes] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika*, 2018, no. 3, pp. 79–84 (in Russ.).

10. Katalog «Kontrol'no-izmeritel'naya apparatura i elementy SVCh trakta», АО «НПФ «Микран», 2023, 260 p. Available at: https://www.micran.ru/upload/uf/453/mtrnqdfioregh7r678571imt389yse2m/C_%D0%9A%D0%98%D0%90_RU_3.52_WEB.pdf, free/ (Accessed: June 20, 2023) (in Russ.).

11. Diode Detector Simulation using Agilent Technologies EEsof ADS Software, Application Note 1156, Agilent Technologies, Inc., 1999, pp. 1–4.

12. BTZ-475E Model Details. Available at: <https://espec.com/na/products/model/btx-475>, free (Accessed: August 30, 2023).

Нечаев Владимир Геннадьевич

Аспирант каф. сверхвысоких частот и квантовой радиотехники (СВЧКР) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-999-495-65-28
Эл. почта: ne4aev.volodya@yandex.ru

Загородный Андрей Сергеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. СВЧКР ТУСУРА Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-923-414-99-26
Эл. почта: andreyzag@micran.ru

Заболоцкий Александр Михайлович

Д-р техн. наук, доцент, зав. каф. СВЧКР ТУСУРА Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-34-39
Эл. почта: zabolotsky_am@mail.ru

Nechaev V.G., Zagorodny A.S., Zabolotsky A.M.

Passive compensation of temperature instability of microwave diode power detectors

The article presents the results of a study of the temperature effect on the characteristics of low-barrier ZB-28 diodes with a cutoff frequency over 100 GHz and diode detectors of microwave signal power based on them. A method is proposed to compensate the temperature instability of detectors, implemented by including an additional reference diode in the diode detector circuit. The main results presented of experimental

Vladimir G. Nechaev

Postgraduate student, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-999-495-65-28
Email: nechaev.vg@micran.ru

Andrey S. Zagorodny

Candidate of Sciences in Engineering, Associate Professor,
Department of Microwave and Quantum Radio Engineering,
TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-414-99-26
Email: andreyzag@micran.ru

Aleksandr M. Zabolotsky

Doctor of Sciences in Engineering, Associate Professor,
Senior Researcher, Department of Microwave and Quantum
Radio Engineering, TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 41-34-39
Email: zabolotsky_am@mail.ru

Нечаев Владимир Геннадьевич, 89994956528

ФИО и номер ответственного автора