ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2023, № 6, с. 18–22

ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.382.2

ВОЛНОВОДНЫЙ ДЕТЕКТОР МОЩНОСТИ ТРЕХМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С НИЗКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ОТРАЖЕНИЯ

© 2023 г. В. В. Паршин[a], А. А. Чиликов[b], А. М. Щитов[b], С. Ю. Корнишин[a], И. Н. Шевелёв[a], Е. А. Серов[a,*], С. А. Королёв[c]

[a]*Федеральный исследовательский центр "Институт прикладной физики Российской академии наук" Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46*

[b]*НФ АО НПФ "Технокс" Россия, 603152, Нижний Новгород, ул. Кащенко, 6*

[c]*Институт физики микроструктур Российской академии наук Россия, 603087, Нижегородская обл., Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, 7*

*****e-mail: serov@ipfran.ru*

Поступила в редакцию 23.01.2023 г.
После доработки 13.04.2023 г.
Принята к публикации 27.06.2023 г.

Представлен корпусной детектор мощности, выполненный в волноводе стандартного сечения 2.4×1.2 мм^2 для трехмиллиметрового диапазона длин волн с достаточно хорошим для этого типа устройств согласованием. В конструкции используются низкобарьерные диоды, изготовленные на структуре отечественного производства. Приводятся расчетные и экспериментальные характеристики детекторов, такие как частотная зависимость чувствительности и уровень коэффициента стоячей волны (КСВ). Показано, что средняя чувствительность детекторов по диапазону составляет более 1000 В/Вт, а КСВ имеет значение не более 3.

DOI: 10.31857/S0032816223060137, **EDN:** TNRKSA

1. ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые детекторы мощности широко используются как в радиоизмерительных аппаратурных комплексах, так и в качестве отдельных функциональных узлов. Они могут выступать в качестве чувствительных элементов в неохлаждаемых приемниках миллиметрового диапазона, преобразователей для систем регулировки мощности в генераторах сигналов, для анализа формы амплитудно-модулированных сигналов и т.д. [1]. Волноводные детекторы широко применяются в спектрометрах различного принципа действия, работающих в миллиметровом диапазоне длин волн (см., например, [2, 3]).

В настоящее время в Российской Федерации отсутствует регулярное производство волноводных детекторов мощности миллиметрового диапазона длин волн, хотя известны работы, в которых демонстрировались опытные образцы (см., например, [4]). Еще один пример – недавняя работа белорусских коллег [5], в которой продемонстрирован детектор двухмиллиметрового диапазона на основе диода Шоттки с чувствительностью не хуже 500 В/Вт и коэффициентом стоячей волны (КСВ) не более 3.

В то же время, ведущие мировые производители (например, Virginia Diodes [6]) не осуществляют поставки данной продукции в РФ, что обуславливает актуальность разработок, направленных на импортозамещение этих устройств.

Различные области применения детекторных устройств предъявляют к ним различные, зачастую противоречивые требования. Основная сложность разработки волноводных детекторов заключается в обеспечении одновременно высокой чувствительности, приемлемого уровня согласования и малой неравномерности частотной характеристики. При проектировании волноводных устройств КВЧ-диапазона следует учитывать множество факторов, среди которых частотная дисперсия волнового сопротивления волноведущих структур, а также влияние паразитных реактивностей элементов схемы и конструкции. Предложенная в работе [7] методика моделирования волноводных устройств позволяет существенно ускорить процесс проектирования. С использованием представленной методики спроектированы и изготовлены волноводные детекторы на диапазон 78–118 ГГц, работающие без постоянного смещения. Результаты исследования представлены в настоящей статье.

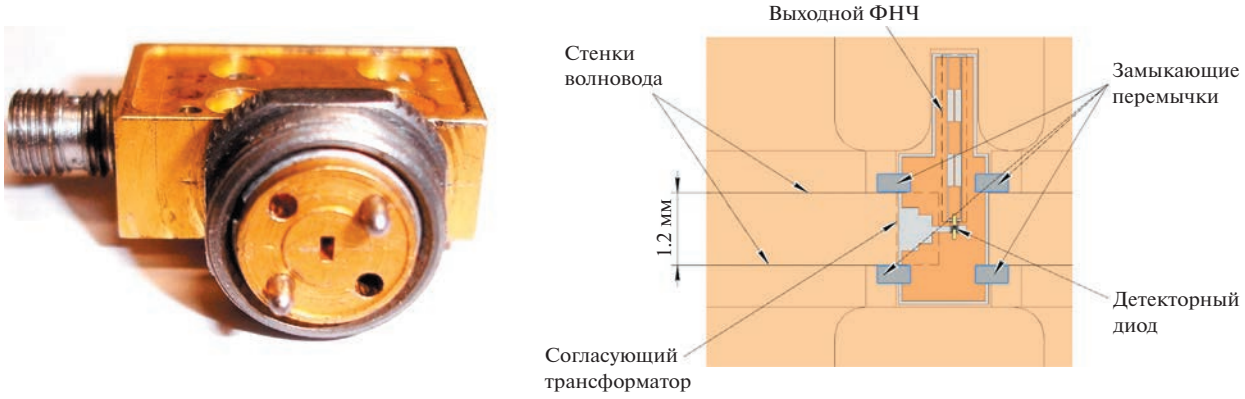

Рис. 1. Внешний вид и расположение элементов конструкции детектора. ФНЧ – фильтр нижних частот.

2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Известные модели волноводных детекторов ведущих отечественных и зарубежных фирм не гарантируют значения КСВ, что объясняется сложностью создания согласованных устройств без существенной потери чувствительности. В работе [7] приводятся результаты проектирования волноводных детекторов диапазонов 37–53 ГГц и 53–78 ГГц, где низкий уровень коэффициента отражения обеспечивается использованием схемы с согласующим резистором и трансформатором в виде ступенчатого перехода и достигается путем процедуры оптимизации конструкции в соответствии с приведенной методикой.

В отличие от спроектированных ранее [7] моделей низкочастотных детекторов, для трехмиллиметрового диапазона пришлось отказаться от дискретных компонентов для уменьшения паразитных параметров схемных элементов (рис. 1), что дало ряд преимуществ. Согласующий чип-резистор типоразмера 01005 (0.4×0.2 мм^2) заменен на напыленный резистивный слой, что позволило подобрать оптимальный номинал сопротивления.

За счет отказа от дискретного детекторного конденсатора в пользу топологического полосового фильтра была уменьшена инерционность схемы, поэтому детектор можно использовать не только для детектирования мощности непрерывного излучения, но и для анализа сигнала в полосе до нескольких гигагерц. Предложенные конструктивные решения позволили достичь низкой неравномерности амплитудно-частотной характеристики в рабочем диапазоне.

Детектор спроектирован в НФ АО НПФ “Техноякс”. Корпус детектора изготовлен в ИПФ РАН. В качестве нелинейного элемента используется детекторный диод, произведенный в АО НПП “Салют” на экспериментальной эпитаксиальной гетероструктуре RC-1722, изготовленной в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в Санкт-Петербурге. Ранее в работе [8] были продемонстрированы преимущества данного диода по сравнению с иностранным аналогом от компании Avago – детекторным диодом HSCH-9161.

Высота потенциального барьера, от которого зависит чувствительность детектора, определяется полупроводниковым материалом вида $In_xGa_{1-x}As$. Этот материал в зависимости от величины x имеет существенно разные электрофизические свойства (в том числе высоту барьера). Оптимальное соотношение компонентов, подобранное для уменьшения механических напряжений, следующее: $In_{0.53}Ga_{0.47}As$. Такое соотношение позволило вырастить диод на полуизолирующей подложке InP, которая обеспечивает необходимую жесткость конструкции. При этом ширина запрещенной зоны равна 0.75 эВ, а высота потенциального барьера лежит в пределах 0.15–0.2 эВ. Вольт-амперная характеристика приведена на рис. 2.

Диод имеет сильно легированный контактный слой InGaAs толщиной порядка 1.5 мкм и барьерный слой InGaAs толщиной 0.1 мкм с уровнем легирования около $5 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ДЕТЕКТОРОВ

На рис. 3, 4 приведены схемы измерительных стендов. Измерение вольт-ваттной чувствительности проводится при уровне подаваемой на детектор мощности 100 мкВт. Генератор с цепочкой умножителей предварительно калибруется по измерителю мощности, чтобы на каждой частотной точке был фиксированный уровень сигнала, который подается на детекторы. Для устранения влияния отраженного от детектора сигнала используется вентиль.

Измерение КСВ проводится с помощью волноводного направленного ответвителя. С генератора SMF100A подается максимальный уровень +17 дБм (50 мВт), чтобы чувствительности изме-

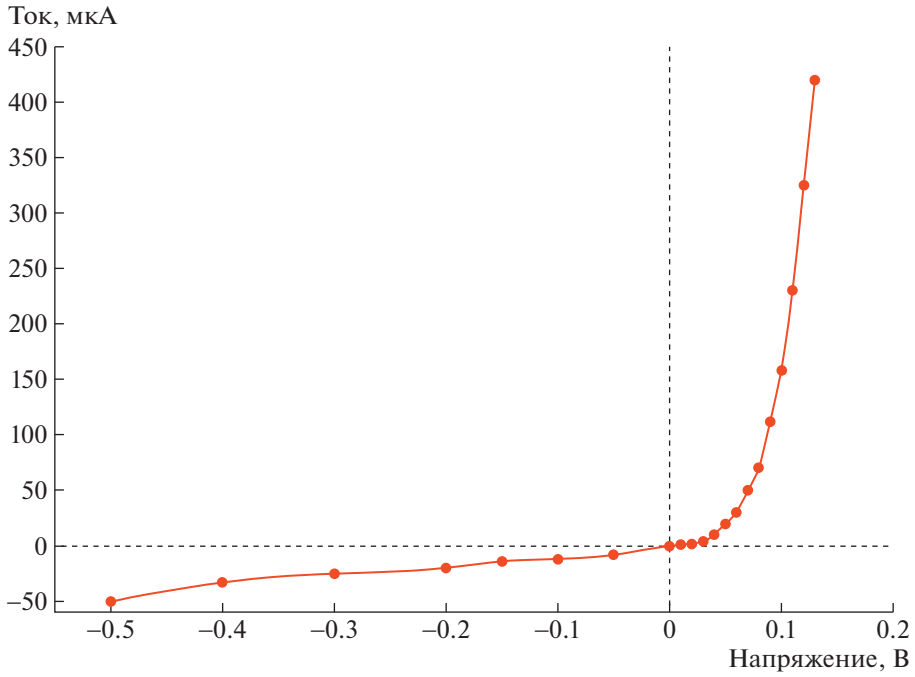

Рис. 2. Вольт-амперная характеристика разработанного диода.

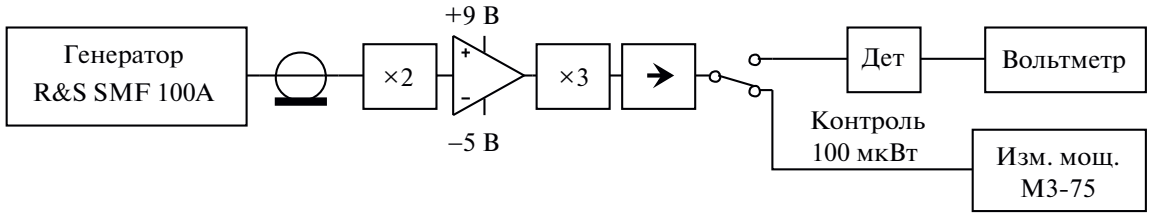

Рис. 3. Схема стенда для измерения вольт-ваттной чувствительности: ×2 – удвоитель частоты с выходным диапазоном 25–40 ГГц, ×3 – утроитель частоты с выходным диапазоном 75–120 ГГц, Дет – волноводный детектор (измеряемый объект), Изм. мощ. – измеритель мощности М3-75 с выносным блоком с сечением волновода 2.4 × 1.2 мм^2.

рителя мощности хватило для регистрации малого уровня отраженного сигнала в случае хорошего согласования детектора.

Изначально в каждой частотной точке измеряется уровень сигнала ($P_{кз}$), отраженного от короткозамкнутой нагрузки. Затем к направленному ответвителю подключается детектор и измеряется уровень отраженного сигнала ($P_{дет}$).

Коэффициент отражения (КО) можно представить как отношение мощности отраженной волны к падающей. В нашем случае имеем два вида измерений мощности: при подключении короткозамкнутой нагрузки и при подключении де-

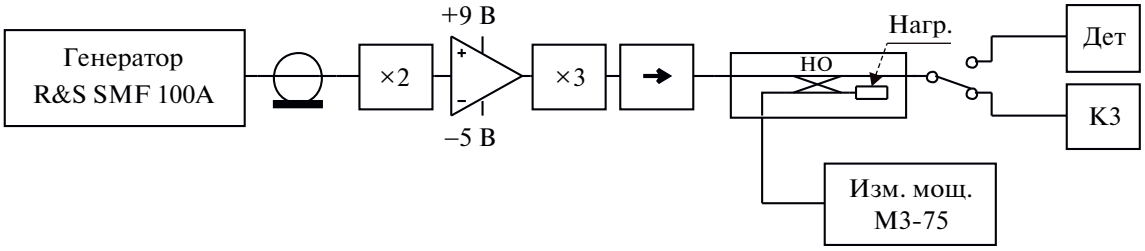

Рис. 4. Схема стенда для измерения КСВ (обозначения те же, что и на рис. 3, НО – направленный ответвитель).

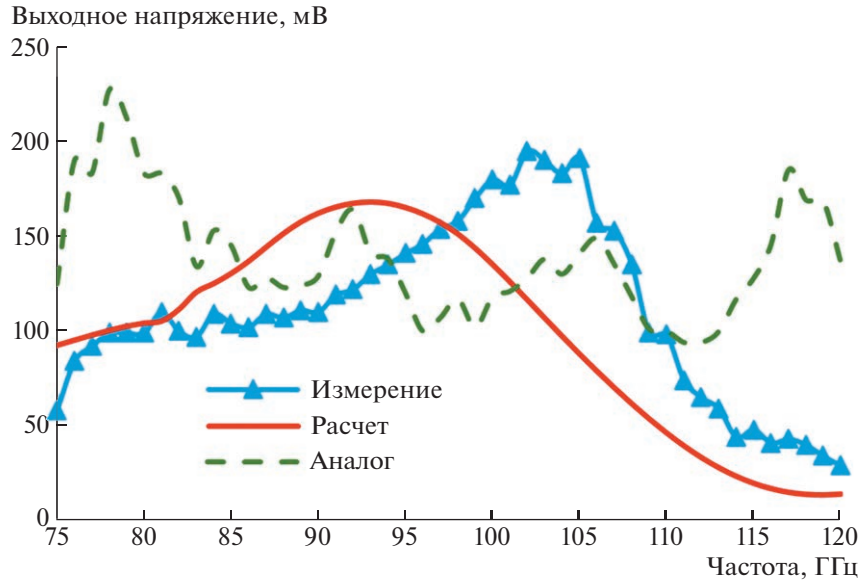

Рис. 5. Отклик детекторов в диапазоне частот при входной мощности 100 мкВт.

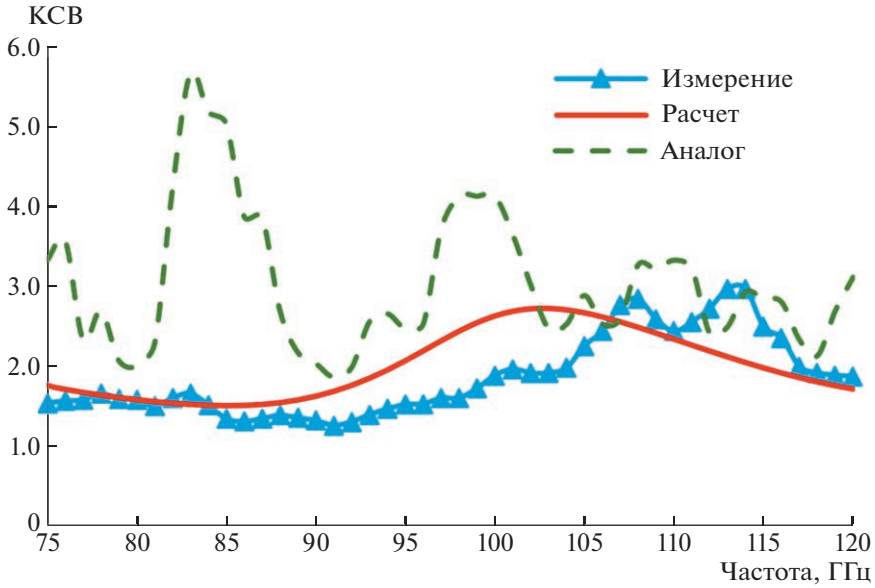

Рис. 6. Коэффициент стоячей воды детекторов.

тектора. Если считать коэффициент отражения короткозамкнутой нагрузки равным 1, а также считать, что КО слабо зависит от уровня падающей волны, что неоднократно подтверждалось экспериментально, то справедливо считать, что $КО_{дет}[дБ] = P_{дет}[дБм] - P_{кз}[дБм]$.

На рис. 5, 6 приведены расчетные и измеренные зависимости отклика детектора и его КСВ от частоты. Для сравнения приведены характеристики аналога разработанного детектора, где сигнал на детекторный диод поступает по плавному экспоненциальному переходу в щелевой линии. Представленный в данной работе детектор обладает меньшим по сравнению с аналогом КСВ практически во всём рабочем диапазоне. Аналог, с которым проводилось сравнение, – это модель КДВ-118 производства ННИПИ “Кварц”. В настоящий момент выпуск таких детекторов прекращен.

Важной характеристикой детектора является уровень его шума, определяющий нижнюю границу динамического диапазона детектора.

Для измерения уровня шума использовался малошумящий трансимпедансный усилитель с калиброванной зависимостью коэффициента шума от подключенного ко входу сопротивления резистора. Измеренное значение среднеквадратического шумового напряжения составило 16 нВ/Гц$^{1/2}$, что находится в хорошем согласии со значением, полученным из формулы для теплового шума резистора с сопротивлением, равным дифференциальному сопротивлению исследуемого диода при нулевом напряжении смещения. Используя измеренное значение шумового напряжения и полагая, что средняя вольт-ваттная чувствительность детектора превышает 1000 В/Вт, можно вычислить мощность, эквивалентную шуму детектора, принимающую значение менее 16 пВт/Гц$^{1/2}$.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен корпусной детектор мощности для трехмиллиметрового диапазона длин волн. В детекторе используются низкобарьерные диоды, изготовленные на структуре отечественного производства. Высота потенциального барьера, от которого зависит чувствительность детектора, определяется полупроводниковым материалом вида $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ и лежит в пределах 0.15–0.2 эВ.

Использование предложенной ранее методики моделирования и оптимизации конструкции, а также реализованные конструктивные решения позволили достичь хорошей чувствительности и низкой неравномерности амплитудно-частотной характеристики в рабочем диапазоне частот. Показано, что средняя чувствительность по диапазону более 1000 В/Ватт, а КСВ не более 3, что в совокупности характеристик превосходит известные аналоги. Мощность, эквивалентная шуму детектора, сравнима с аналогами и составляет в среднем менее 16 пВт/Гц$^{1/2}$.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Ю.И. Чеченину за оказанное содействие по части детекторных диодов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 18-72-10113), https://rscf.ru/project/18-72-10113/. В работе использовалась УНУ 3589084 “ЦКП-7”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Щитов А.М., Шишков Г.И., Михайловский В.Л., Бляшко Ю.Р., Березин В.В., Бирюков В.В.* Диодные преобразователи частоты для радиоизмерительной аппаратуры СВЧ- и КВЧ-диапазонов / Под ред. А. М. Щитова. Нижний Новгород: НГТУ. им. Р. Е. Алексеева, 2016.
2. *Koshelev M.A., Leonov I.I., Serov E.A., Chernova A.I., Balashov A.A., Bubnov G.M., Andriyanov A.F., Shkaev A.P., Parshin V.V., Krupnov A.F., Tretyakov M.Yu.* // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2018. V. 8. P. 773. https://doi.org/10.1109/TTHZ.2018.2875450
3. *Голубятников Г.Ю., Белов С.П., Леонов И.И., Андриянов А.Ф., Зинченко И.И., Лапинов А.В., Марков В.Н., Шкаев А.П., Гварнери А.* // Известия вузов. Радиофизика 2013. Т. 56. № 8–9. С. 666.
4. *Волков П.В., Востоков Н.В., Горюнов А.В., Кукин Л.М., Паршин В.В., Серов Е.А., Шашкин В.И.* // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 5. С. 56. https://doi.org/10.21883/PJTF.2019.05.47401.17613
5. *Захаров И.А., Карманова О.А., Гусинский А.В., Касперович М.М., Булавко Д.Г., Кузюков А.Н., Лисов Д.А., Шевалдина Ю.В.* // Доклады БГУИР. 2022. Т. 20. № 8. https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-8-67-74
6. https://www.vadiodes.com/.
7. *Чиликов А.А., Щитов А.М.* // Проектирование и технология электронных средств. 2020. № 4. С. 44.
8. *Чиликов А.А., Щитов А.М., Чеченин Ю.И., Малеев Н.А.* // Материалы XXI координационного научно-технического семинара по СВЧ-технике, Нижний Новгород. АО НПП “Салют”. 2021. С. 65.