АНДРЕЙ ЗАГОРОДНИЙ, к. т. н., andreyzag@micran.ru,
АЛЕКСАНДР ЧЕРЕПАНОВ, cherepanov.av@micran.ru

ДЕТЕКТОРЫ МОЩНОСТИ СИГНАЛОВ СВЧ КОМПАНИИ «МИКРАН»

Статья посвящена обзору детекторов мощности СВЧ-сигналов производства АО «НПФ «Микран» серий Д5 и Д42. В работе приведены основные характеристики детекторов и их сравнение с зарубежными аналогами. Представлены краткие замечания по применению, включая особенности работы с импульсно-модулированными сигналами.

Детекторы мощности СВЧ-сигналов предназначены для выделения огибающей высокочастотных сигналов и применяются для измерения уровня мощности в заданном диапазоне частот или на определенной рабочей частоте. Известны устройства для измерения мощности, принцип действия которых основан на применении различных методов преобразования энергии СВЧ-сигналов, таких как калориметрический, болометрический, термоэлектрический, ферромагнитный, с использованием эффекта Холла [1]. Недостатками этих методов являются ограниченный динамический диапазон, громоздкость и сложность реализации большинства из них в микрополосковом исполнении. По сравнению с перечисленными методами, диодные детекторы обладают меньшим временем отклика, позволяют обеспечить большой диапазон измерений по мощности и широкий диапазон рабочих частот.

Упрощенная схема амплитудного детектора (рис. 1) содержит резистор R1 (около 50 Ом) для согласования входного импеданса детектора, диод VD и конденсатор Ср. При подключении внешней нагрузки конденсатор детектора совместно с импедансом нагрузки образуют фильтр низких частот, необходимый для выделения низкочастотного продетектированного напряжения.

В компании «Микран» организован полный цикл производства от изготовления диодов до полной сборки детекторов, их настройки и сервисного обслуживания. На рис. 2 изображены детекторные головки Д5А-50 производства компании «Микран» [2].

В рамках активно развивающегося направления разработки и производства монолитных интегральных схем (МИС) СВЧ- и КВЧ-диапазонов в «Микране» на собственной производственной линии изготавливаются низкобарьерные диоды ZB-28 на основе планарно-легированных структур на подложке из арсенида галлия [3, 4]. По основным параметрам диоды схожи с HSCH-9161 фирмы Keysight Technologies [5], однако обладают меньшей полной емкостью.

Рис. 3 иллюстрирует вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов ZB-28 и HSCH-9161. Основные типовые электрические параметры диодов ZB-28 приведены в табл. 1.

Граничная частота диодов определяется выражением $f_{ГР} = 1/(2\pi R_S C_j)$ и для ZB-28 превышает 200 ГГц. Детекторные головки подразделяются на Д5А-20 и Д5А-50 с верхними рабочими частотами 20 ГГц и 50 ГГц соответственно. В зависимости от включения диода детектируемое напряжение может быть отрицательным (детекторы Д5А) или положительным (Д5Б).

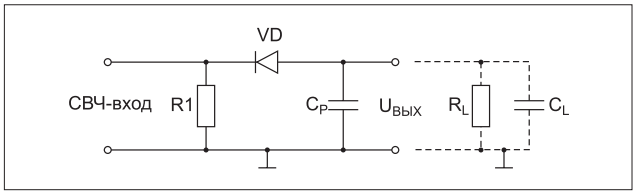

Рис. 1. Упрощенная схема амплитудного детектора

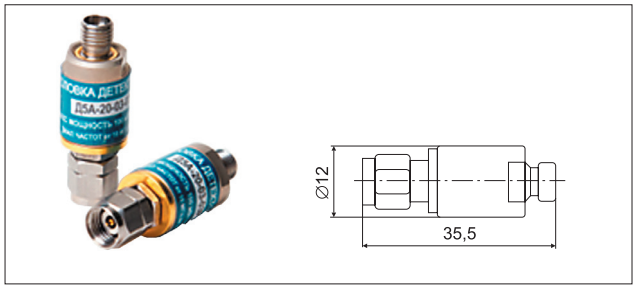

Рис. 2. Внешний вид и габаритные размеры детекторных головок Д5А-50 производства компании «Микран»

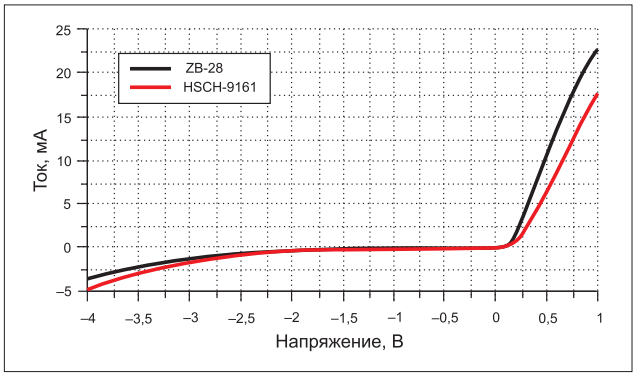

Рис. 3. Графики ВАХ диодов ZB-28 и HSCH-9161

Таблица 1. Типовые электрические параметры диодов ZB-28

Параметр		Значение
Полная емкость, фФ	C_T	35
Емкость перехода, фФ	C_J	24
Последовательное сопротивление потерь, Ом	R_S	30
Видеосопротивление, кОм (при нулевом смещении на диоде)	R_V	1,8
Вольт-ваттная чувствительность, мВ/мВт	β_U	550
Тангенциальная чувствительность, дБм	T_{SS}	-60

Последние два параметра таблицы 1 обеспечиваются при включении диодов ZB-28 в схему детектора (рис. 1) с активной нагрузкой 30 кОм.

На рис. 4 представлены типовые зависимости выходного напряжения детекторов Д5А-20 и Д5А-50 от частоты при входной мощности 1 мВт (0 дБм).

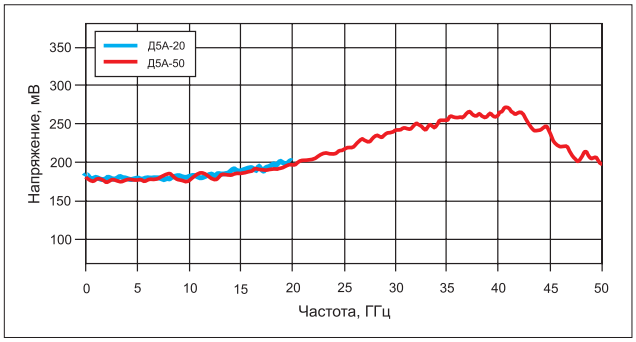

Рис. 4. График зависимости выходного напряжения от частоты при входной мощности 1 мВт (0 дБм)

Известно, что вольт-амперные характеристики диодов зависят от температуры, поэтому характеристики диодных детекторов также подвержены температурным изменениям. На рис. 5 изображены графики частотных характеристик детекторов Д5 (до 20 ГГц) при различных температурах.

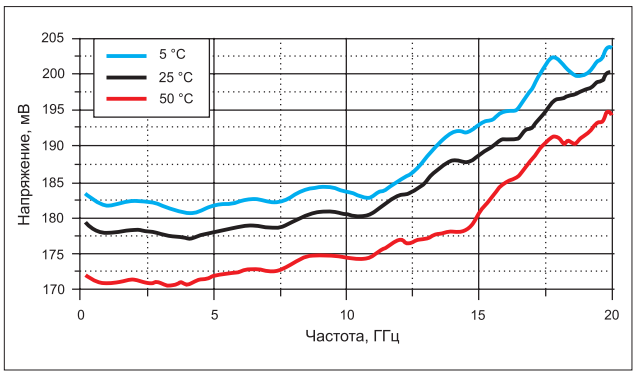

Рис. 5. Графики частотных характеристик детекторов Д5 (до 20 ГГц) при различных температурах

Зависимость выходного напряжения от уровня мощности, называемая детекторной характеристикой, представлена на рис. 6 для разных сопротивлений нагрузки. Как правило, детекторы подключают к высокоомным нагрузкам, типовой считается 30 кОм. Подключение нагрузки с большим сопротивлением обеспечивает наилучший диапазон мощностей детектирования. Современные детекторы позволяют достичь динамического диапазона 80 дБ и более. Нижняя граница детектируемой мощности ограничена тангенциальной чувствительностью СВЧ-диода [6]. Для детекторов серии Д5 с диодами ZB-28 она составляет –60 дБм (1 нВт). Верхняя граница ограничена максимальной допустимой мощностью и составляет 25 дБм (316 мВт). Превышение мощности 28 дБм (630 мВт) приведет к деградации диода и, как следствие, к неисправности детектора. Таким образом, детекторы серии Д5 позволяют проводить измерения с динамическим диапазоном до 85 дБ. Однако на практике обычно используют меньший диапазон, так как измерения при мощностях менее –50 дБм (10 нВт) осложнены влиянием шумов детектора, а при больших мощностях нередко необходимо использовать усилители с перестраиваемыми коэффициентами усиления для достижения одинаковой точности на разных уровнях мощности.

При подключении малой нагрузки из-за шунтирования выходного сигнала происходит уменьшение выходного напряжения детектора, из-за чего динамический диапазон ухудшается (рис. 6). Однако уменьшение сопротивления нагрузки снижает постоянную времени выходной RC-цепи детектора, ускоряя тем самым время отклика детектора, что особенно важно при работе с импульсно-модулированными сигналами.

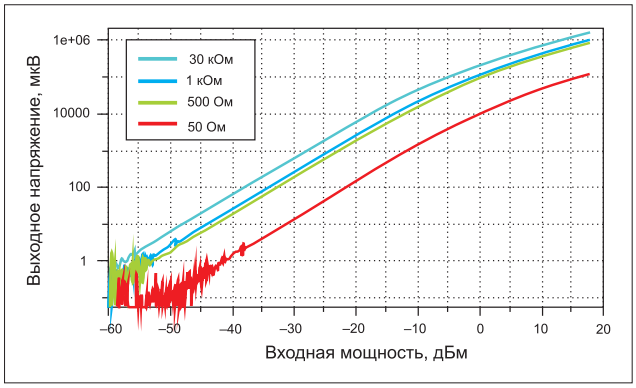

Рис. 6. Графики зависимостей выходного напряжения от входной мощности при различных сопротивлениях нагрузки

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПО НАПРЯЖЕНИЮ

Немаловажным параметром детекторов является чувствительность по напряжению СВЧ-диода, нередко называемая вольт-ваттной чувствительностью (ВВЧ). Она может быть определена как отношение приращения напряжения на нагрузке СВЧ-диода к вызвавшей это приращение мощности СВЧ-сигнала на входе диодной камеры в рабочем режиме [6]. На рис. 7 изображены графики зависимости вольт-ваттной чувствительности детекторов серии Д5 для трех значений сопротивления внешней нагрузки. При проектировании устройств с детекторами следует помнить, что производители, как правило, указывают значение ВВЧ в малосигнальном режиме, то есть при низких уровнях мощности.

Известно, что на уровнях входной мощности менее –20 дБм (10 мкВт) диодные детекторы работают в квадратичном режиме [7], где выходное напряжение линейно зависит от мощности входного сигнала СВЧ, то есть пропорционально квадрату входного напряжения. При увеличении мощности детектор переходит в квазилинейный и далее в линейный режим работы.

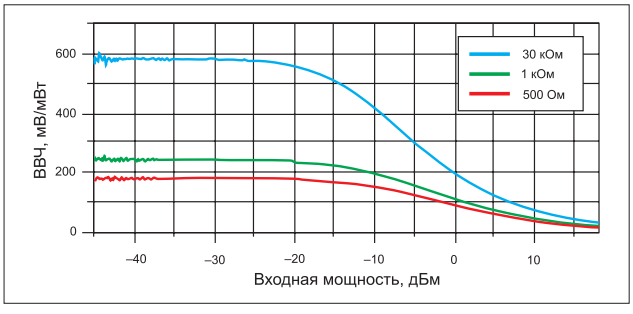

Рис. 7. Графики зависимости вольт-ваттной чувствительности детекторов серии Д5

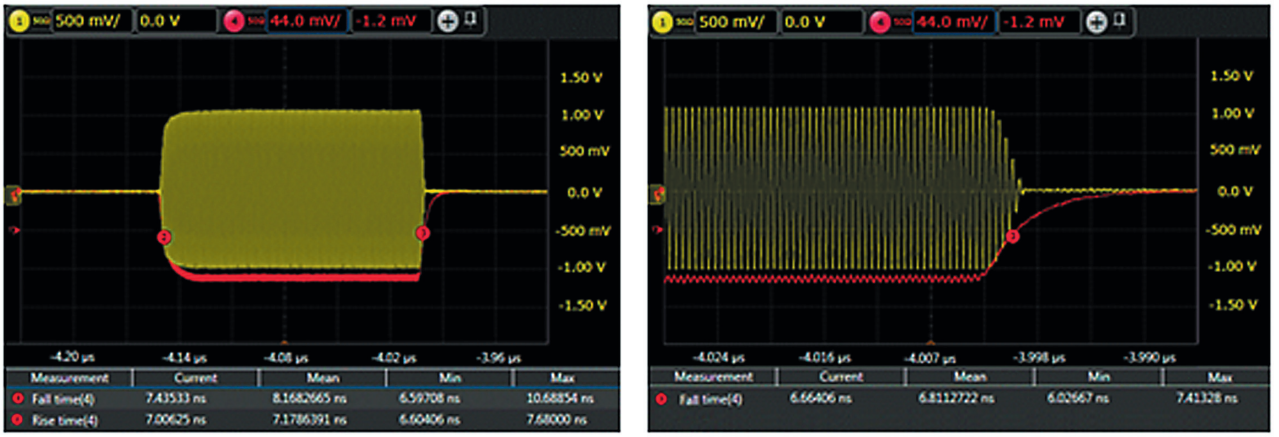

Рис. 8. Результаты измерений радиоимпульса на осциллографе DSOS204A Keysight Technologies с входным сопротивлением измерительного порта 50 Ом

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

Большинство вопросов клиентов по детекторным головкам серии Д5 связаны с измерениями модулированных сигналов и радиоимпульсов. Определяющую роль в этом случае играет время реакции детектора. Для характеризации времени реакции детектора на изменение уровня входной мощности обычно используют время нарастания и спада выходного напряжения по уровням от 10 до 90%. Для приближенного расчета времени нарастания (T_r) детекторов серии Д5 можно использовать формулу:

$$T_r = \frac{4,5 \cdot R_V \cdot R_L \cdot (C_L + C_P)}{R_V + R_L},$$

где: R_V = 1,8 кОм — видеосопротивление детекторного диода; R_L — сопротивление подключаемой нагрузки; C_L — емкость подключаемой нагрузки; C_P = 35 пФ — емкость детектора (рис. 1). Использование активной нагрузки 50 Ом обеспечивает время реакции не более 7,5 нс, с нагрузкой 1 МОм — 245 нс.

На рис. 8 показаны результаты измерений радиоимпульса на осциллографе DSOS204A фирмы Keysight Technologies с входным сопротивлением измерительного порта 50 Ом.

Видеополоса детектора в этом случае может быть определена как

$$ВП = \frac{0,4}{T_r} = \frac{0,4}{7,5\ \text{нс}} = 53,3\ \text{МГц}.$$

Подобное значение видеополосы свидетельствует о возможности применения детекторов в широком перечне радиотехнических задач.

В российских источниках термин «видеополоса» встречается крайне редко, однако в зарубежных публикациях и технической документации используется часто и имеет важное практическое значение. Авторы под термином «видеополоса детектора» понимают максимальную частоту модулирующего сигнала, при которой выполняются заявленные параметры детектора (рис. 9).

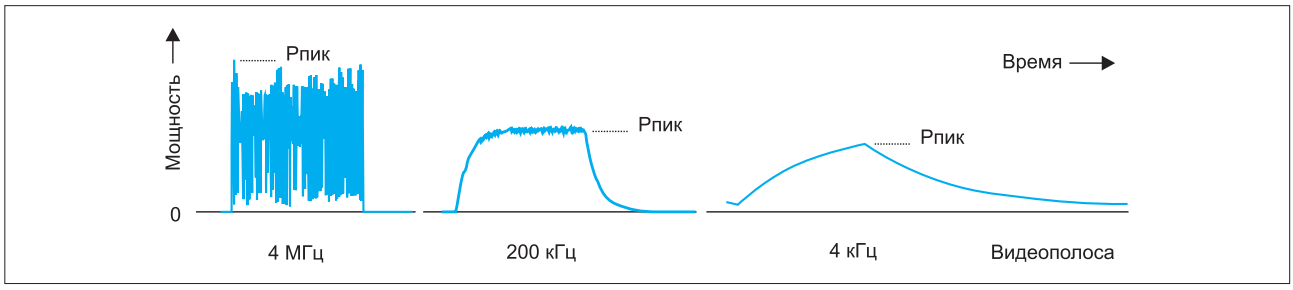

Рис. 9. Графическая иллюстрация термина «видеополоса детектора»

Таблица 2. Основные технические характеристики детекторов Д5А в сравнении с наиболее известными зарубежными аналогами

	Д5А-50 («Микран»)	DZR50024A (Herotek)	8474E (Keysight)	604A (KRYTAR)
Частотный диапазон, ГГц	0,01...50	0,01...50	0,01...50	0,01...50
Неравномерность АЧХ, дБ	±0,3 до 18 ГГц, ±0,6 до 26,5 ГГц, ±1 до 40 ГГц, ±2 до 50 ГГц	±0,3 до 18 ГГц, ±0,6 до 26 ГГц, ±0,8 до 40 ГГц, ±1 до 50 ГГц	±0,4 до 26,5 ГГц, ±0,6 до 40 ГГц, ±1 до 50 ГГц	±0,3 до 18 ГГц, ±0,6 до 26 ГГц, ±1 до 40 ГГц, ±3 до 50 ГГц
КСВН входа	1,2 до 18 ГГц, 1,25 до 26,5 ГГц, 2 до 40 ГГц, 2,5 до 50 ГГц	1,3 до 18 ГГц, 1,6 до 26 ГГц, 1,8 до 40 ГГц, 2 до 50 ГГц	1,2 до 26,5 ГГц, 1,6 до 40 ГГц, 2,8 до 50 ГГц	1,3 до 20 ГГц, 1,4 до 26 ГГц, 1,7 до 40 ГГц, 2,8 до 50 ГГц
Максимальная входная мощность, дБм	+25	+23	+23	+23
Вольт-ваттная чувствительность, мВ/мкВт	0,55	0,5	0,4	0,4

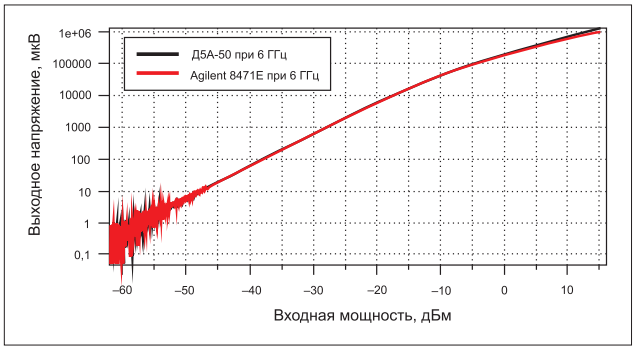

Рис. 10. Детекторные характеристики Д5А-50 и детектора 8471E Agilent (в настоящее время Keysight Technologies)

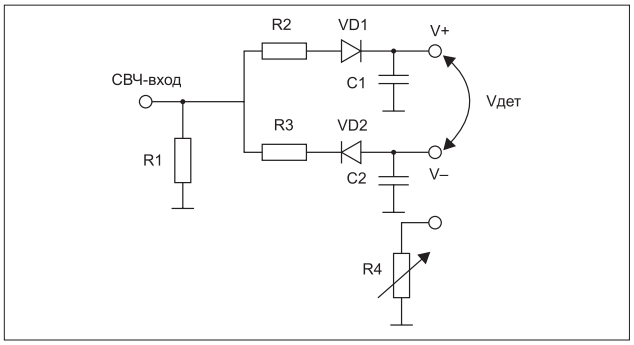

Рис. 11. Упрощенная схема двухдиодного детектора Д42

СРАВНЕНИЕ С АНАЛОГАМИ

В табл. 2 представлены основные технические характеристики детекторов Д5А в сравнении с наиболее известными зарубежными аналогами [8–10].

На рис. 10 представлены результаты измерений детекторных характеристик Д5А-50 и детектора 8471E Agilent (в настоящее время Keysight Technologies) с выходной нагрузкой 30 кОм.

Благодаря развитию технологий и организации производства полупроводниковых компонентов, компании «Микран» удалось создать детекторы, которые по большинству технических характеристик не уступают аналогам, а по отдельным параметрам превосходят их.

ДЕТЕКТОРЫ Д42

На эквивалентной схеме на рис. 1 диод в зависимости от включения будет выполнять детектирование положительных или отрицательных полуволн входного СВЧ-сигнала. Для детектирования обеих полуволн необходимо включить в схему второй диод и конденсатор. В этом случае выходное напряжение и чувствительность по напряжению будут в два раза больше по сравнению с однодиодным детектором (рис. 11).

По аналогии с рис. 1 сопротивление R1 выполняет функцию согласования импедансов. На частотах свыше 10 ГГц значимым оказывается влияние эквивалентных емкостей диодов, через которые происходит шунтирование части входного сигнала. Включение резисторов R2 и R3 позволяет существенно уменьшить этот эффект, при этом чувствительность по напряжению уменьшается незначительно [11].

Детекторы Д42 включают в себя термистор (R4 на рис. 11), который расположен в непосредственной близости к диодам. Включение термистора в цепь внешнего делителя напряжения позволяет отслеживать изменение температуры и выполнять температурную коррекцию показаний детекторов. На рис. 12 показан детектор Д42–18 с входным коаксиальным соединителем типа N (вилка). Аналогичные детекторы с различными коаксиальными соединителями (тип 3,5 мм (вилка), тип 2,4 мм (вилка)) входят в состав скалярных анализаторов це-

Рис. 12. Внешний вид детектора Д42–18 с входным коаксиальным соединителем типа N (вилка)

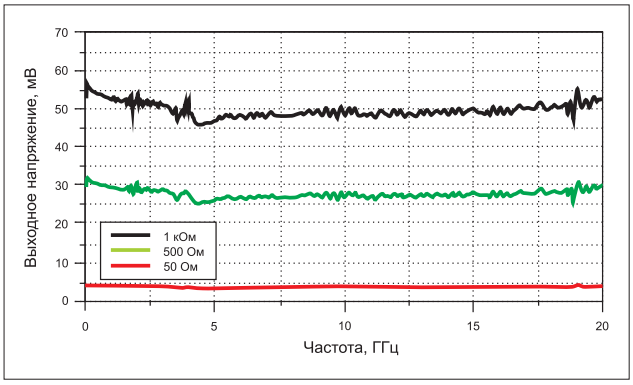

Рис. 13. Графики частотных характеристик детекторов Д42–20

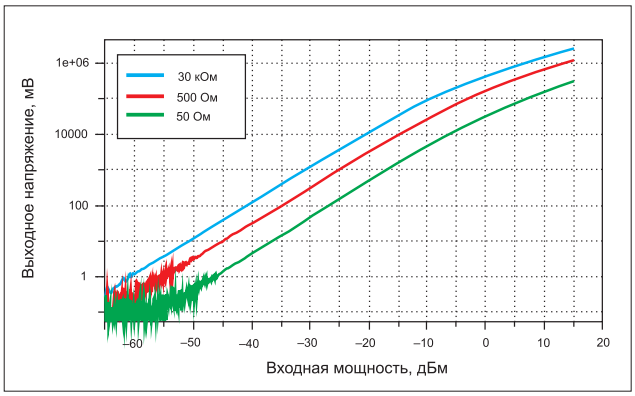

Рис. 14. Графики зависимостей выходного напряжения от входной мощности детекторов Д42–20

пей компании «Микран» серии Р2М с частотными диапазонами до 4 ГГц, 20 ГГц и 40 ГГц.

На рис. 13 представлены частотные характеристики детекторов Д42–20, на рис. 14 — зависимости выходного напряжения от мощности.

В табл. 3 приведены основные характеристики детекторов серий Д5 и Д42 [12].

Детекторы серии Д42 поставляются с индивидуальным текстовым файлом детекторной характеристики, в котором выходное напряжение сопоставляется с входной мощностью. Столбцы напряжений и соответствующих уровней мощности представлены для всех частот рабочего диапазона с шагом 100 МГц.

ПРИМЕНЕНИЕ ДЕТЕКТОРОВ

Детекторы мощности широко используются в различных радиотехнических системах, могут выступать как отдельные измерительные блоки для контроля мощности источников сигналов, а также в составе различных устройств. Нередко детекторы применяются в качестве основных преобразова-

Таблица 3. Основные характеристики детекторов серий Д5 и Д42

	Д5А-20	Д5А-50	Д42-20	Д42-50
Частотный диапазон, ГГц	0,01–20	0,01–50	0,01–20	0,01–40
Неравномерность АЧХ, дБ	±0,6	±0,3 до 18 ГГц, ±0,6 до 26,5 ГГц, ±1 до 40 ГГц, ±2 до 50 ГГц	±0,5 до 12 ГГц, ±0,8 до 20 ГГц	±0,8 до 20 ГГц, ±2 до 40 ГГц
КСВН входа	1,25	1,2 до 18 ГГц, 1,25 до 26,5 ГГц, 2 до 40 ГГц, 2,5 до 50 ГГц	1,2	1,2 до 18 ГГц, 1,25 до 26,5 ГГц, 2 до 40 ГГц
Максимальная входная мощность, дБм	+25	+25	+23	+23

тельных элементов ваттметров СВЧ. Помимо этого, детекторы включают в системы контроля мощности генераторов и синтезаторов СВЧ. Благодаря широкой полосе рабочих частот, высокой чувствительности по напряжению и малому времени реакции, детекторы серии Д5 хорошо подходят для схем автоматической регулировки мощности (АРМ) (рис. 15).

Совместно с направленными ответвителями компании «Микран» [13] детекторы серии Д5 могут применяться в схемах АРМ с частотным диапазоном от 500 МГц до 50 ГГц.

МОНОЛИТНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

В компании «Микран» организовано производство бескорпусных монолитных интегральных схем различного назначения: коммутаторы, аттенюаторы, усилители, фазовращатели [14]. Интегральные схемы детекторов разделены на две категории: детекторы поглощаемой мощности и проходящей мощности. Последние предназначены для включения в разрыв микрополосковой линии и обеспечивают детектирование проходящей мощности с вносимыми потерями не более 2,1 дБ в диапазоне частот до 50 ГГц [15]. МИС детекторов поглощаемой мощности MD903 реализуют функции детекторов Д42 на одном кристалле и могут применяться в составных блоках СВЧ. Для задач радиометрии и других применений, где важно детектирование в квадратичном участке, подойдут МИС MD901, содержащие два каскада детектирования и обеспечивающие квадратичный участок детектирования в диапазоне мощностей от –50 дБм до 20 дБм (от 10 нВт до 100 мВт). Более подробная информация по МИС детекторов представлена на сайте [15] и в работах [16, 17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детекторы высокочастотных сигналов используются для построения измерительных комплексов, в лабораторных исследованиях, для радиометрии, в приборостроении, включая системы подстройки мощности. Детекторы мощности компании «Микран» по совокупности характеристик не уступают зарубежным аналогам и уже зарекомендовали себя на российском рынке.

В статье представлены основные технические характеристики, способ расчета времени реакции, детекторные характеристики для разных вариантов внешних нагрузок. Это поможет подобрать необходимый детектор в зависимости от требований частных задач. Приведены краткие сведения по низкобарьерным диодам и монолитным интегральным схемам, производимым на собственной фабрике компании «Микран».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Билько М. И., Томашевский А. К., Шаров П. П. Измерение мощности на СВЧ. М.: «Советское радио». 1976.*
2. *http://www.micran.ru/productions/Accessory/detector/*
3. *http://www.micran.com/sites/micran_eng/data/UserFile/pdf/mmic/ZB-28.pdf*
4. *Юнусов И. В., Ющенко А. Ю., Плотникова А. М., Арыков В. С., Загородний А. С. Сверхвысокочастотные низкобарьерные детекторные диоды на основе p-n-перехода//Физика. 2012. № 9/2.*
5. *Keysight Technologies HSCH-9161 GaAs Detector Diode. Data Sheet.*
6. *ГОСТ 25529–1982 (СССР) «Диоды полупроводниковые. Термины, определения и буквенные обозначения параметров». М.: Изд-во стандартов. 1987.*
7. *Agilent Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements (Part 2). Application Note 1449–2.*
8. *http://krytar.com/products/detectors/zero-bias-schottky-detectors/*
9. *Keysight 8474E Planar-Doped Barrier Diode Detectors. Data Sheet.*
10. *http://www.herotek.com/datasheets/protoc.html#DETECTORS.*
11. *Patent US 5204613; Apr. 20, 1993. RF power sensor having improved linearity over greater dynamic range/Allen T. R., Cripps S. C.*
12. *http://www.micran.ru/sites/micran_ru/tmpl/micran_ru/inc/pdf/KIA_i_SVCh_rus_101.pdf*
13. *http://www.micran.ru/productions/Accessory/coupler/*
14. *http://www.micran.ru/productions/MIS/*
15. *http://www.micran.ru/productions/Diod/MD902/*
16. *Zagorodny A. S., Voronin N. N., Yunusov I. V., Gushchin V. A. Ultrawideband power detector GaAs MMIC's. Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, 15th International Conference of Young Specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM), Novosibirsk, 2014.*
17. *Zagorodny A. S., Yunusov I. V., Drozdov A. Y., Drobotun N. B., Voronin N. N.. 0.01–50 GHz Power Detector MMICs. Microwave Symposium (MMS), 2015 IEEE 15th Mediterranean. Lecce, Italy.*

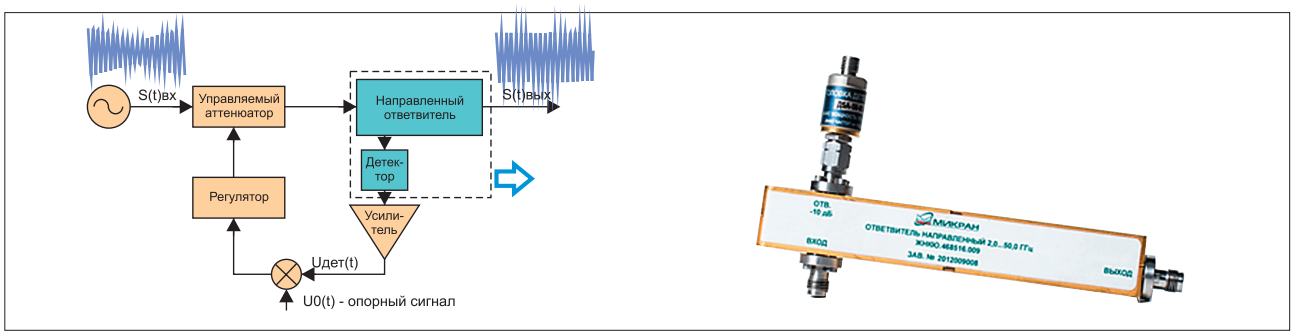

Рис. 15. Применение детекторов серии Д5 в схемах автоматической регулировки мощности