

УДК

# Разработка прецизионных средств измерений СВЧ мощности

А.И. Матвеев, А.В. Пивак, И.П. Чирков

ВНИИФТРИ

**Аннотация:** в данной работе проведен анализ метрологических задач, решаемых при разработке первичного эталона единицы мощности электромагнитных колебаний и высокоточных СВЧ ваттметров. Определены основные недостатки тепловых преобразователей мощности, предложены и опробованы методы уменьшения их влияния на погрешности средств измерений.

**Ключевые слова:** СВЧ ваттметр, преобразователь мощности, СВЧ термистор, МЭМС термопара.

## 1. Введение

Мощность электромагнитных колебаний является основным параметром, характеризующим интенсивность электромагнитного излучения на сверхвысоких частотах. С учетом многомиллионной стоимости ошибок вследствие недостоверности контроля энергетических параметров приемо-передающих модулей и систем на этапах их разработки и производства обеспечение единства измерений мощности СВЧ становится насущной задачей, сопровождаемой, зачастую, ужесточением требований к точности измерений

При разработке, испытаниях и настройке радиотехнических устройств и систем применяют большой парк средств измерений, имеющих нормируемые характеристики, выраженные в единицах мощности или отношении мощностей: ваттметры, генераторы сигналов, анализаторы спектра, сигналов, цепей. Точность измерений мощности в метрологических лабораториях ограничивается погрешностью СВЧ ваттметров, системой средств и методов воспроизведения и передачи единицы мощности СВЧ. В статье представлены результаты исследований и разработок ФГУП «ВНИИФТРИ» по данной теме в том числе для решения задач импортозамещения.

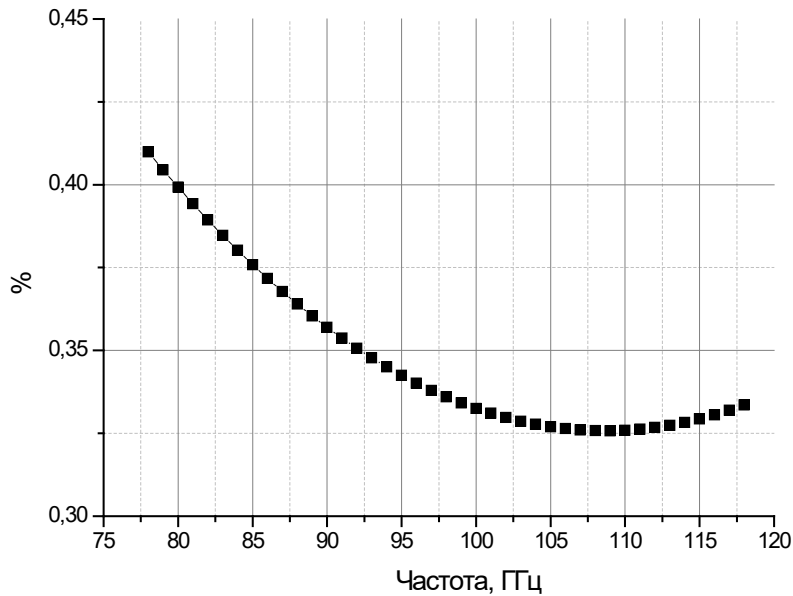
## 2. Прослеживаемость измерений мощности СВЧ

Мощность электромагнитных колебаний, распространяющихся в закрытых линиях передачи определяется как интеграл вектора Пойтинга в плоскости, перпендикулярной линии передачи. Воспроизведение единицы мощности электромагнитных колебаний с преобразованием её в тепловой вид энергии на сегодняшний день остается наиболее точным методом, применяемым во всех национальных метрологических лабораториях.

Принцип построения первичных эталонов ГЭТ 26 и ГЭТ 167 основан на преобразовании электромагнитной энергии в тепловой вид энергии, которая методом замещения сравнивается с мощностью постоянного тока. Для реализации этого принципа в составе первичного эталона применяются разработанные калориметрические преобразователи мощности, исследование которых осуществляется в специально разработанных и исследованных микрокалориметрах.

Выполненные за последние десять лет работы по модернизации ГЭТ 167 [1] позволили увеличить его верхнюю частоту вдвое, а в 2025 году планируется выполнить его аттестацию до 178,4 ГГц.

В ходе работ получены аналитические модели тепловых процессов в микрокалориметре, позволившие рассчитать оптимальные характеристики тепловых развязок, подтвердить теоретические выводы на практике. С учетом уточненных методов определения поправки (рис. 1), связанной с тепловыделением в теле тепловой развязки, эта систематическая составляющая уменьшена в 2 раза [2], а при этом чувствительность микрокалориметра сохранилась на уровне 1,2 мВ/мВт.



**Рисунок 1.** Пределы составляющей неисключенной систематической погрешности из-за потерь в тепловой развязке.

Разработанные калориметрические преобразователи мощности на основе монокристаллического кремния показали [3] превосходные характеристики:

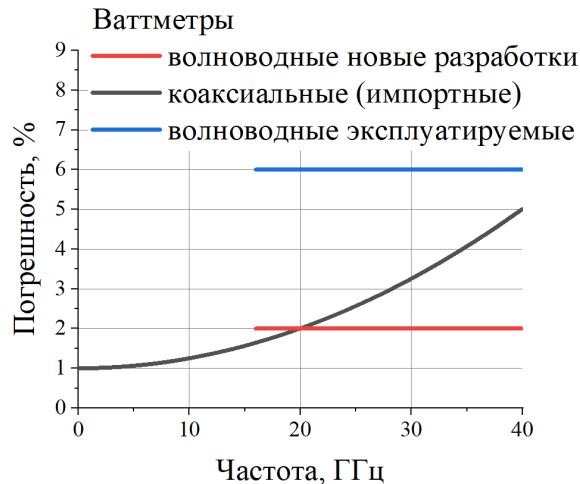
- КСВН не более 1,2;
- изменение коэффициента эффективности не более 1 % в рабочей полосе частот;
- нелинейность для отобранных преобразователей не более 0,1 %;
- время измерений в микрокалориметре на одной частоте 15 минут, а на компарирующей установке не более 7 секунд.

Измерения зависимости коэффициента эффективности в микрокалориметре при двух уровнях мощности обеспечило возможность воспроизведения не только единицы мощности, но и шкалы отношения мощностей в диапазоне от 0 до 10 дБ.

После измерений в микрокалориметре коэффициента эффективности единица мощности может передаваться рабочим эталонам и средствам измерений при помощи компарирующей установки, которая состоит из компараторов на каждое сечение волноводного тракта в автоматизированном режиме.

### 3. Тепловые СВЧ ваттметры

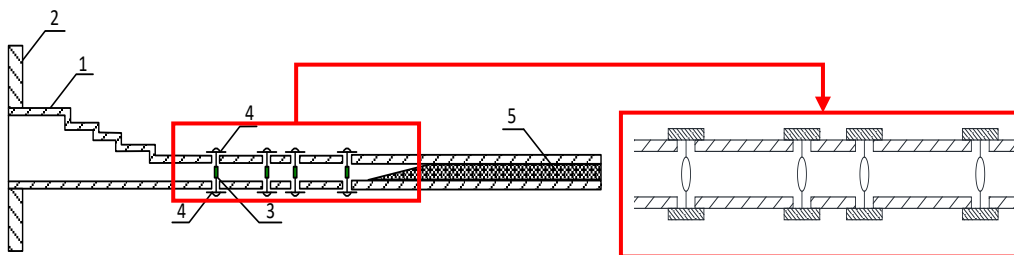
**Термистор.** Точные измерения мощности ВЧ и СВЧ колебаний выполняют ваттметрами в диапазоне частот от 30 МГц до 178 ГГц с разделением на поддиапазоны частот применяемых линий передачи. В диапазоне частот до 20 ГГц применяется в основном коаксиальные ваттметры, а на частотах выше – волноводные, что связано с увеличением потерь и коэффициентов отражения в коаксиальных линиях (рис 2).



**Рисунок 2.** Типовые погрешности коаксиальных волноводных ваттметров

ФГУП «ВНИИФТРИ» разработаны чувствительные к мощности СВЧ колебаний элементы в виде термисторов на основе оксидов переходных металлов, у которых не полностью заполнена 3d-электронная оболочка, из-за чего обмен электронами между соседними ионами затрудняется, и электропроводность вещества становится малой. Если температура увеличивается, то электроны приобретают дополнительную тепловую энергию, процесс обмена электронами становится интенсивнее и поэтому резко увеличивается подвижность носителей заряда и снижается сопротивление. Оксидные терморезисторы имеют малые габариты, а значит, малую тепловую инерцию.

Предложено техническое решение для волноводных преобразователей СВЧ мощности на основе комбинации секции термисторных чувствительных элементов и согласованной нагрузки (рис. 3), что обеспечивает значительное снижение модуля коэффициента отражения до 0,07 без применения дополнительных устройств согласования.



1 – Волноводный канал; 2 – фланцевый соединитель; 3 – СВЧ термистор; 4 – электрическая ёмкость; 5 – согласованная нагрузка

**Рисунок 3.** Схема многозондового ваттметра оконечного типа

Разработаны термисторные мосты, реализующие измерения мощности постоянного тока с рабочими сопротивлениями термисторов от 100 до 2000 Ом. Сопротивления термисторов изменяется в автоматическом режиме. В совокупности это позволило разработать серию новых термисторных СВЧ ваттметров с многозондовыми преобразователями М3-122 и М1-37. Они могут применяться и для передачи единицы мощности от первичного эталона рабочим эталонам.

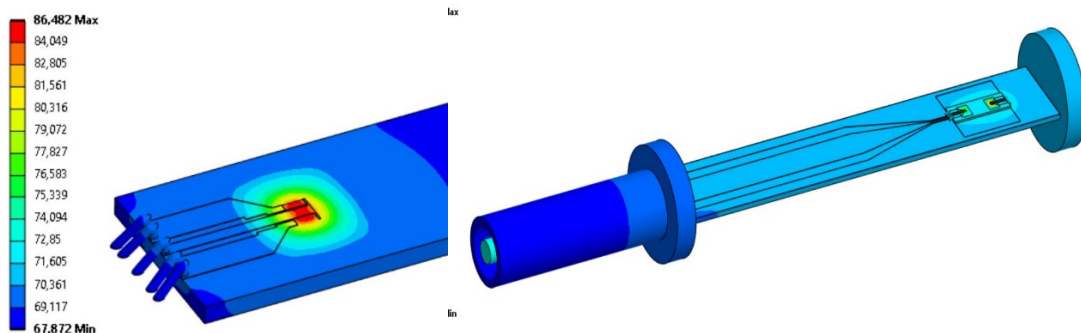
**Болометр.** Успехи при разработке калориметрических преобразователей предложено перенести на разработку серийных волноводных ваттметров в миллиметровом диапазоне длин волн. Выполнено электромагнитное моделирование

вариантов изготовления серийных преобразователей мощности и экспериментальное макетирований выбранных вариантов. В ходе изготовления макетов разработана технологическая маршрутная карта получения кремниевых чипов с низкоомными контактами. Уменьшение площади контактных площадок на чипах, связанное с уменьшением геометрических размеров волноводов в диапазоне частот 110-170 ГГц, привело к значительному росту тепловых шумов сопротивления болометров. Уменьшить влияние контактов удалось за счет оригинальной конструкции болометра с увеличенной площадью контактных площадок.

Разработанная система дискретного замещения, связанная с применением цифровых методов регулирования мощности замещения, позволила обеспечить низкий уровень шума и высокую точность.

**Термопара косвенного подогрева.** Перспективной в настоящее время является разработка коаксиальных ваттметров на основе МЭМС. Компактные размеры преобразователей и высокая чувствительность к изменению температуры теоретически позволяют создавать сверхширокополосные преобразователи мощности с диапазоном рабочих частот от 0 Гц до сотен ГГц. В настоящее время разработана конструкция макета преобразователя на основе копланарной линии передачи, совмещающей СВЧ нагрузку и МЭМС преобразователь в едином кристалле.

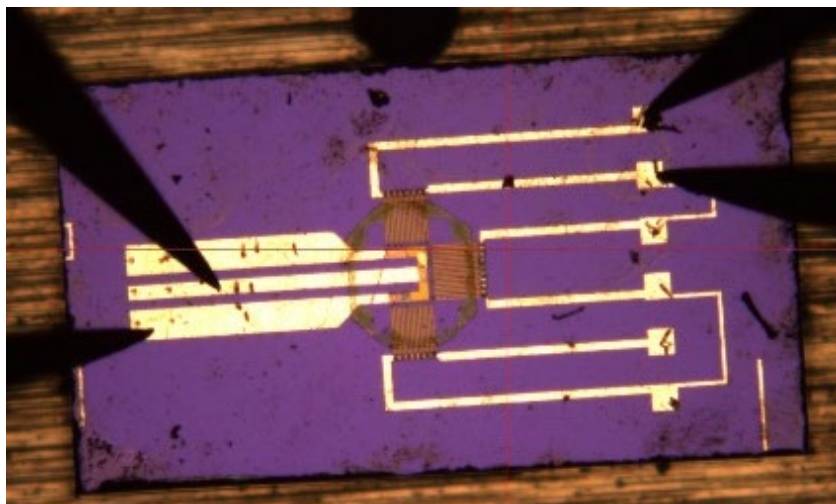
Моделирование тепловых процессов показало (рис. 4), что при толщине мембраны 10 мкм тепловое равновесие (разность между горячим и холодным спаем термопары) устанавливается через 50 мкс, при этом продолжительный нагрев увеличивает температуру чипа в целом. При выделении 100 мВт мощности в СВЧ резисторе ожидаемая разность температур составляет 12 °С.



**Рисунок 4.** Распределение температуры в модели кремниевого кристалла с МЭМС структурой и в модели коаксиального преобразователя мощности.

В конструкции кристалла предусмотрена симметричная схема СВЧ поглотителей и термопар. При этом к СВЧ разъему подключается только одна СВЧ нагрузка, а вторая служит для реализации опорного канала. Так как напряжение на выходе термопар опорного канала зависит только от температуры, то разность напряжений на выходе термопар опорного и рабочего канала прямо пропорциональна измеряемой СВЧ мощности.

Датчик температуры мембраны, детектирующий нагрев СВЧ резисторов, должен иметь высокую разрешающую способность в диапазоне рабочих температур. Наиболее подходящими являются термопары, термоЭДС которых пропорционально разности температур. При этом КМОП (комплементарная структура металл — оксид — полупроводник) технологии позволяют производить поликремнёвые термопары, обладающие значением коэффициента Зеенбека на порядок большим чем у термопар на основе пар металлов. Макет кристалла (рис. 5) с СВЧ структурой и термопарами имеет геометрические размеры 2×3 мм.



**Рисунок 5.** Макет МЭМС датчика СВЧ мощности

Разработанная конструкция преобразователей мощности имеет ряд особенностей, позволяющей достичь необходимых технических характеристик и при этом обеспечить их повторяемость при серийном производстве за счет применения стандартизованных, отработанных технологических КМОП процессов при изготовлении кристалла.

### **3. Заключение**

Формируется единая система метрологической прослеживаемости измерений мощности электромагнитных колебаний на основе теоретически обоснованной научно-методической базы по разработке эталонов, средств измерений и созданию на её основе методически соединенных первичного эталона и ваттметров. В перспективе ближайших лет на основе отечественных средств измерений сформируется парк прецизионных коаксиальных и волноводных ваттметров в диапазоне частот от 10 МГц до 178,4 ГГц.

#### **Список литературы**

1. Коудельный А.В., Малай И.М., Матвеев А.И., Перепелкин В.А., Чирков И.П.. Государственный первичный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот 37,5–118,1 ГГц ГЭТ 167-2021 // Измерительная техника. –2022. –№ 6. –С. 3-8
2. Коудельный А.В., Малай И.М., Матвеев А.И., Перепелкин В.А., Чирков И.П. Разработка комплекса аппаратуры для измерения мощности электромагнитных колебаний высшей точности в диапазоне частот от 78,33 до 118,10 ГГц // Альманах современной метрологии. 2021. № 2 (26). С. 25-36
3. В.А. Перепелкин, И.П. Чирков, А.И. Матвеев «Исследование волноводных прецизионных термоэлектрических преобразователей мощности миллиметрового диапазона длин волн»//«Альманах современной метрологии» № 2 (26) 2021, стр. 37–44