

УДК

Особенности разработки отечественной СВЧ ЭКБ на примере ваттметров

А.И. Матвеев¹, А.В. Пивак^{1,2}, И.П. Чирков¹

¹ФГУП «ВНИИФТРИ»

²ООО «Планар»

Аннотация: в статье приведены практические результаты, полученные в ходе разработки необходимой для производства средств измерений СВЧ ЭКБ. Показано, что получаемые в процессе разработки и изготовления результаты промежуточного контроля параметров микроэлектронной структуры даже при стандартизованных технологических процессах позволяют с одной стороны оценить целесообразность дальнейших операций, а с другой дать обратную связь разработчикам для уточнения моделей. На основе полученных в рамках единичных работ технологий выделены критические для СВЧ структур элементы и операции, требующие учета особенностей распространения электромагнитной волны или измерений в СВЧ диапазоне. Показаны достигнутые характеристики ваттметров с первичными преобразователями на кристаллах отечественно производства.

Ключевые слова: СВЧ мощность, технологии изготовления, СВЧ ЭКБ, первичные преобразователи

1. Введение

Отечественные предприятия радиоэлектронной промышленности выпускают широкую номенклатуру СВЧ ЭКБ. На сегодняшний день отлажен выпуск устройств сантиметрового диапазона частот, и ведутся работы по разработке технологий миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Однако, огромный парк средств измерений для настройки и испытаний изготавливаемых устройств остается в большей части иностранного производства и в настоящее время ограничен как к поставке, так и к проведению своевременных сервисных работ. В настоящей статье будут рассмотрены технический и технологический аспекты разработки отечественного коаксиального СВЧ ваттметра.

Создание конкурентоспособного СВЧ ваттметра возможно при использовании высококлассных первичных преобразователей – ключевые элементы средств измерений, которые содержат большое количество запатентованных идей, технологий и отдельно не поставляется. Тут стоит отметить, что для средств измерений мощности СВЧ, ввиду критерия универсальности, необходимо выполнение следующих требований:

- широкополосность, так как одно средство измерений может применяться для контроля разной номенклатуры выпускаемой продукции;
- физичность и «прозрачность» основных выполняемых функций или преобразований для построения математической модели, выявления функций влияния на результат измерений;
- ограничение на физические дефекты в виде резонансов, элементов подстройки, разброс характеристик в партии или на пластине.

Соблюдение перечисленных требований оборачиваются существенными технологическими ограничениями, требующими повышения уровня необходимых технологий. Покажем это на примере первичного преобразователя ваттметра СВЧ.

В нашей стране работы по исследованию и разработке средств измерений мощности СВЧ начались в 1950-ых и к середине 1980-ых благодаря выдающимся разработчикам (М.И. Билько, А.К. Томашевский, Е.А. Баймуратов) промышленность

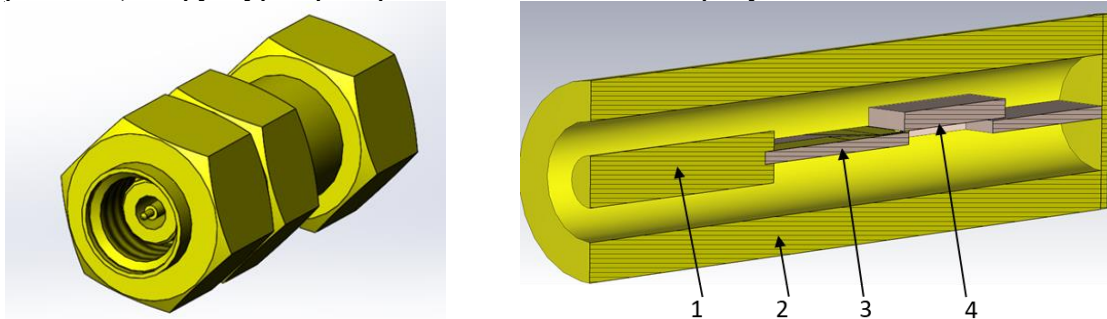
начала выпуск серийных средств измерений (ваттметры МЗ-...). К сожалению, по известным причинам, уже в 2000-ых этот задел потерял конкурентоспособность, а выпущенные тогда средства измерений выработали ресурс. Исходя из этого, актуальной научно-технической задачей является как разработка самих ваттметров, так и создание технологической базы для этой проблематики. В данной работе показаны первичные результаты разработки отечественной ЭКБ СВЧ для ваттметров, как пример для реализации новых решений при создании парка средств измерений Российского производства с глубоким уровнем локализации.

2. Первичный преобразователь мощности СВЧ

Основные вопросы принципов действия ваттметров СВЧ приведены в [1]. Ниже будут рассмотрены особенности технологии изготовления термоэлектрических преобразователей косвенного подогрева.

Принцип действия такого преобразователя основан на поглощении мощности СВЧ в нагрузке, нагрев которой приводит к выделению термо-ЭДС термопары. Основные элементы конструкции преобразователя должны обеспечивать подведение электромагнитной волны к согласованной нагрузке, сформировать тепловую развязку между холодным и горячим спаями термопары. Было принято решение, что формирование основных элементов преобразователей должно осуществляться по стандартизированной КМОП технологии.

Ключевым компонентом преобразователя выступает чувствительный элемент, представляющий собой кристалл с тонкопленочной топологией. Данная топология включает копланарную линию передачи с согласованной нагрузкой (выполненной в виде тонкопленочного резистора), а также термобатарей, предназначенную для преобразования тепловой энергии, преобразуемой в резисторе, в электрический сигнал (напряжение). Структура преобразователя показана на рисунке 1.



1 – центральный проводник; 2 – внешний проводник; 3 – коаксиально-копланарный переходом 4 – кремниевый кристалл с СВЧ резисторами и термопарами

Рисунок 1. Дизайн преобразователя с коаксиальным соединителем и основными элементами

В предлагаемой конструкции резистор располагается на тонкой теплоизолирующей мембране, которая, наряду с низкой теплопроводностью, должна характеризоваться достаточной механической прочностью в условиях повышенных температур и выдерживать циклические термические нагрузки. Одним из перспективных направлений реализации таких конструкции являются тонкие кремниевые мембраны (МЭМС) [2, 3]. Миниатюрные механические элементы таких устройств формируются в объеме кремния или иного материала подложки с использованием специализированных технологических процессов. Сформированные кремниевые структуры интегрируются с компонентами интегральных схем, что позволяет создать электромеханическую систему, функционирующую как единое устройство и обеспечивающую эффективное преобразование мощности

электромагнитных колебаний (ЭМК) в тепловую энергию.

Создание высокоэффективного преобразователя мощности предполагает прецизионное изготовление тонкопленочных резисторов и обеспечение высокой чувствительности термоэлектрического элемента. Ниже представлены технологические аспекты изготовления отдельных элементов.

2.1. Копланарная линия

Ввиду особенностей изготовления мембран – в качестве основы для кристалла выбран кремний. В силу широкополосности (от 0 до 40 ГГц) разрабатываемого преобразователя применен высокоомный кремний. В качестве несущей основы для монтажа коаксиально разъема, кристалла, шлейфы выбран близкий к кремнию по диэлектрической проницаемости нитрид алюминия. Важно правильно оценить требуемую толщину материала для исключения влияния паразитных типов распространения волн.

Изготовление копланарных линий на первый взгляд не вызывает вопросов у технологов и является отработанной типовой операцией на ряде производств. Но на практике напыляется система металлов с набором функциональных слоев и их толщин, влияющих на распространение СВЧ волны. Из применяемых можно выделить TiO-Ti-Au, Cu-Ni-Au, TiO-Ti-Ni-Au, Ti-Al и другие. Более доступна технология контактной фотолитографии с теоретическими погрешностями размеров $\pm 1,5$ мкм на слой, что на практике может приводить к размаху до 7 мкм. На рисунке 2 показаны дефекты металлизации по технологии контактной литографии.



Рисунок 2. Дефекты контактной фотолитографии (выбоины, несимметричность зазоров ± 4 мкм, несоответствие размеров ± 7 мкм).

Более точно изготовить топологию возможно с использованием проекционной фотолитографии с технологическим допуском менее 0,5 мкм, однако перечень производителей резко сокращается, вместе с перечнем доступных материалов: точность последующего напыления зависит от шероховатости поверхности, изгиба пластины и других эффектов. Для снижения потерь толщину напыляемого с точной геометрией проводника наращивают гальванически, что приводит к дополнительным искажениям геометрии.

В ходе работ установлено, что технологическое оборудование, применяемое для контроля размеров ширины и дины топологий либо не утверждено в качестве типа средств измерений, либо нормируемая точность ограничена единицами микрон и не позволяет подтвердить технологические нормы проекционной фотолитографии.

2.2. Согласованная нагрузка

Согласованная нагрузка – это в некотором смысле вершина «искусства», поскольку должна обеспечить согласование в широком диапазоне частот, при этом стремиться чтобы величина обратных потерь не превышала минус 30 дБ. Цена такому изяществу может стремиться к бесконечности: поскольку геометрия используемой контроля процесса напыления технологической оснастки, зачастую, не соответствует размерам напыляемой топологии, то сопротивление резистора может отличаться от требуемого номинала на 10 %; неравномерность напыления по пластине в зависимости от выбранного материала резистора тоже достигает 30 % на размере пластины 150 мм; контактное сопротивление зависит от площади соприкосновения резистора и

проводника. Нужно обратить внимание, что толщина резистивного слоя, зачастую, не превышает 0,1 мкм и требует контроля шероховатости поверхности. Измерения сопротивлений согласованных нагрузок, изготовленных у 5 разных производителей, подтвердили приведенные выше оценки. Однако есть и исключения: технологические лидеры готовы выдавать продукцию с сопротивлением согласованных нагрузок в пределах пластины $\pm 1\%$ без лазерной подгонки.

К сожалению, измерений электрического сопротивления недостаточно для определения частотных характеристик полученной нагрузки, так как на СВЧ параметры уже зависят и от геометрии и слоев копланарных линий, и от параметров материала, и от основания, на которой находится пластина. В этом месте изготовления целесообразно проводить прослеживаемые измерения в СВЧ диапазоне с использованием зондовых станций [4].

2.3 Мембрана

Травления кремния осуществляется по двум технологиям: жидкостное травление с углом наклона стенок 51° и Bosch-процесс с практически вертикальными стенками. Разница профилей травления показана на рисунке 3.

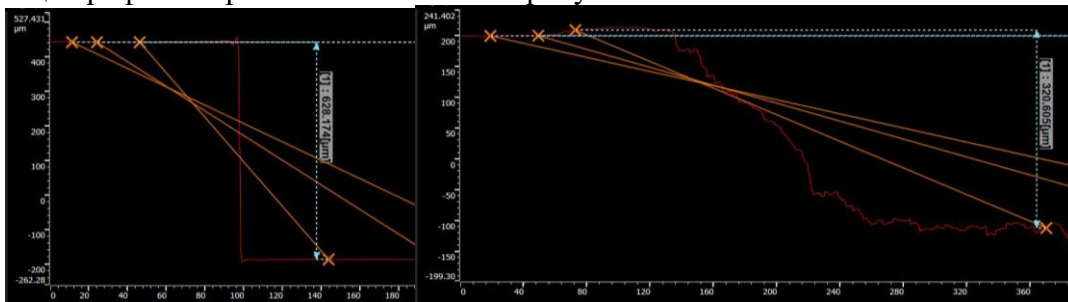


Рисунок 3. Профили мембран при Bosch-процессе (слева) и жидкостном травлении (справа)

Глубина травления связана со временем процесса, но из-за неламинарных потоков жидкости у измеренных образцов с жидкостным травлением мембран неравномерность толщины составляет десятки микрон (полученные толщины у тестовых пластин изменялись от 20 до 70 мкм) на пластинах диаметром 100 мм. Ситуация усугубляется при использовании мембран разных площадей и форм. Хрупкость пластины с мембранами значительно увеличивается и при большой плотности топологий пластины рассыпаются до разделения их кристаллы.

Травление мембран в пластина со структурой кремний-изолятор-кремний (кремний на изоляторе) обеспечивает равномерную толщину мембран на всей пластине. Проведенные тесты резки пластин с мембранами кремния толщиной 10 мкм показали высокую степень устойчивости. При этом мембраны оксида кремния толщиной 2 мкм имеют дефекты после резки пластины с вероятностью 90 %. Немаловажную роль при разрушении мембран играет изгиб пластин при из-за применяемой маски и напыленных слоев при повышенных температурах травления кремния.

3. Результаты изготовления опытных образцов преобразователей мощности

Приведенные выше исследования позволили изготовить опытные образцы преобразователей мощности, показанные на рисунке 4 (слева), с толщиной мембраны 10 мкм. Проведено исследование скорости реакции поликремниевой термопары на мембране на изменение температуры между спаями при малой мощности нагрева. График переходного процесса представлен на рисунке 4 (справа). Полученные результаты демонстрируют возможность проведения до 300 измерений в секунду, что

для тепловых ваттметров является очень высоким показателем.

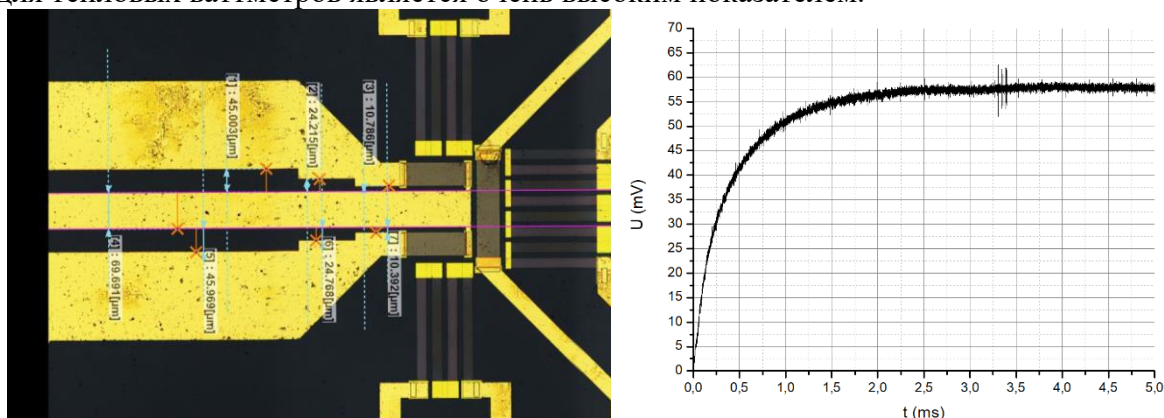


Рисунок 4. Внешний вид кристалла и время установления теплового режима (справа)

Измеренные значения КСВН согласованной нагрузки на кристалле не превышают 1,2, а преобразователя в сборе 1,4 в диапазоне частот от 0 до 40 ГГц. Значения калибровочного коэффициента преобразователя мощности при увеличении частот уменьшается на 20 %.

4. Заключение

Приведены практические результаты, полученные в ходе разработки коаксиальных термоэлектрических преобразователей мощности с диапазоном частот от 0 до 40 ГГц. Показано, что получаемые в процессе разработки и изготовления результаты промежуточного контроля параметров СВЧ ЭКБ при стандартизованных технологических процессах дают более детальное представление об изделии. На основе полученных в рамках единичных работ технологий выделены критические для СВЧ структур элементы и операции, требующие учета особенностей распространения электромагнитной волны или измерений в СВЧ диапазоне. Показаны достигнутые характеристики ваттметров с первичными преобразователями на кристаллах отечественно производства.

Список литературы

1. М.И. Билько Измерение мощности на СВЧ. [Текст] / М.И. Билько, А.К. Томашевский, П.П. Шаров, Е.А. Баймуратов - 2-е изд., перераб и доп. // М.: Радио и связь - 1986. - 168 с.
2. Scott J. B. et al. New thermocouple-based microwave/millimeter-wave power sensor MMIC techniques in GaAs // IEEE transactions on microwave theory and techniques. – 2010. – Т. 59. – №. 2. – С. 338-344.
3. Чирков И.П. «Перспективы развития эталонов в области измерений мощности СВЧ в радиочастотных трактах»/ Семёнов В.А., Коудельный А.В., Перепёлкин В.А., Чирков И.П.// Альманах современной метрологии. 2019. № 2 (18). С. 46-64.
4. Малай И.М., Пивак А.В., Чирков И.П. Построение системы обеспечения единства измерений параметров копланарных структур СВЧ // Метрология в радиоэлектронике. Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции. Менделеево, 2025. С. 42-45.