



УДК 621.3.084.2

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.543.545

# О НЕОБХОДИМОСТИ СОЗДАНИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ МОЩНОСТИ СВЧ НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ МЭМС

## ON THE NECESSITY OF CREATING MICROWAVE POWER MEASUREMENT TOOLS BASED ON MEMS TECHNOLOGY

МАЛАЙ ИВАН МИХАЙЛОВИЧ<sup>1</sup>

MALAY IVAN M.<sup>1</sup>

ТИМОШЕНКОВ ВАЛЕРИЙ ПЕТРОВИЧ<sup>2</sup>

TIMOSHENKOV VALERY P.<sup>2</sup>

РУЛЕВ АЛЕКСЕЙ МИХАЙЛОВИЧ<sup>1</sup>

RULEV ALEXEY M.<sup>1</sup>

rulev@vniiftri.ru

rulev@vniiftri.ru

<sup>1</sup>ФГУП «ВНИИФТРИ»

<sup>1</sup>FSUE «VNIIFTRI»

р.п. Менделеево, Московская область

Mendeleevo, Moscow Region

<sup>2</sup>Кафедра интегральной электроники и микросистем НИУ «МИЭТ»

<sup>2</sup>National Research University of Electronic Technology (MIET)

124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1

1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498

Обозначена необходимость создания средств измерений мощности СВЧ на базе технологии микроэлектромеханических систем. Рассмотрены методические шаги по проведению исследований в целях выявления вариантов конструкции датчика мощности СВЧ. Рассмотрена возможность изготовления экспериментальных образцов.

**Ключевые слова:** средства измерений; эталон; МЭМС; датчик мощности.

The paper highlights the necessity of creating microwave power measurement tools based on microelectromechanical systems technology. Besides, it considers methodical steps for research to identify options for designing a microwave power sensor, as well as prospects for manufacturing experimental samples.

**Keywords:** measuring instruments; standard; MEMS; power sensor.

В настоящее время имеется серьезное отставание отечественной промышленности в области производства средств измерений (СИ) мощности СВЧ, которые используются при испытаниях радиотехнических изделий. Кроме того, имеется необходимость в развитии государственных эталонов единицы мощности СВЧ. Основные технические характеристики средств измерений мощности СВЧ схематично представлены на рис. 1.

Наиболее подходящей для создания СИ мощности является технология микроэлектромеханических систем (МЭМС), которая позволяет добиться высокой чувствительности, воспроизводимости характеристик и микроминиатюризации измерителей (датчиков) мощности СВЧ.

Основным функциональным элементом современных зарубежных датчиков мощности является тонкопленочный термоэлектрический преобразователь, выполненный по технологии МЭМС на подложке из кремния или другого материала с подходящими характеристиками. Состав термоэлектрического преобразователя представлен на рис. 2.

Основными составными частями термоэлектрического преобразователя являются подложка из кремния (или другого материала), поверхность которой подготовлена необходимым образом для нанесения тонкослойных термопар, нагрузочных резисторов, копланарной линии передачи

и контактных площадок. Мембрана, выполняемая методом анизотропного травления кремния (в случае использования монокристаллического кремния), имеет толщину 2–10 мкм и обеспечивает необходимый градиент температуры между холодными и горячими концами термопар. Типовая структура термоэлектрического преобразователя, выполненного с использованием кремния стандартной толщины 300 мкм, представлена на рис. 3.

Необходимость использования технологии МЭМС для производства средств измерений и создания государственных эталонов объясняется трудностью обеспечения согласования волновых сопротивлений, низкой чувствительностью и большой постоянной времени работы (инерционностью) существующих на сегодняшний

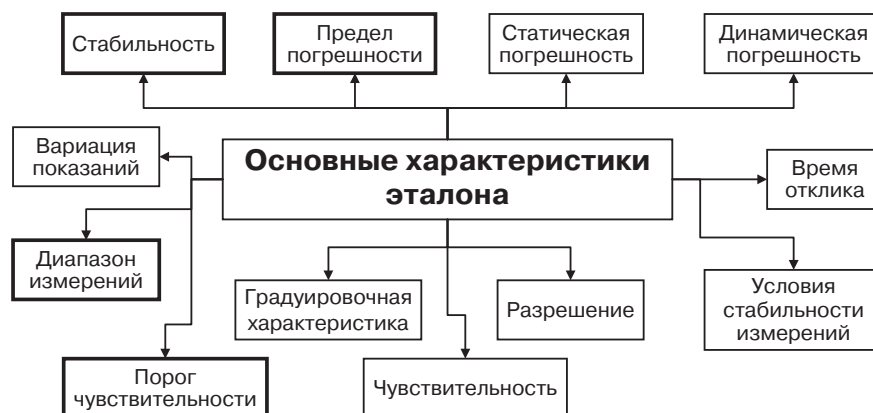


Рис. 1. Основные технические характеристики средств измерений мощности СВЧ



день измерительных преобразователей мощности СВЧ. Технология МЭМС могла бы решить эти проблемы путем создания тонкопленочного термоэлектрического преобразователя, который имел бы низкие обратные потери, на порядки лучшую чувствительность и малую постоянную времени по сравнению с существующими на сегодняшний день государственными эталонами.

Для создания СИ и эталонов необходимо решить задачу создания технологии изготовления тонкопленочных термоэлектрических преобразователей и согласованных нагрузок СВЧ.

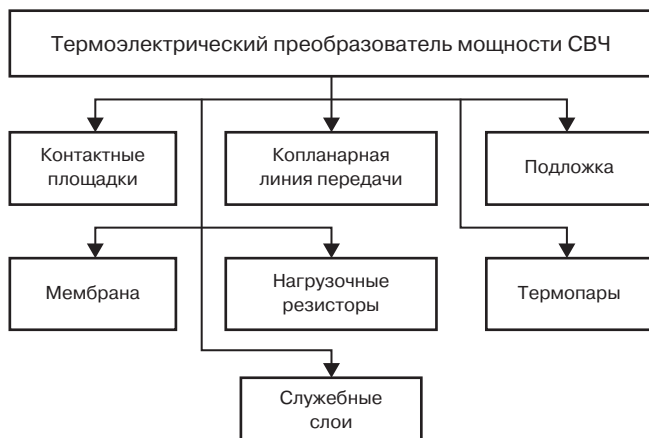


Рис. 2. Состав термоэлектрического преобразователя

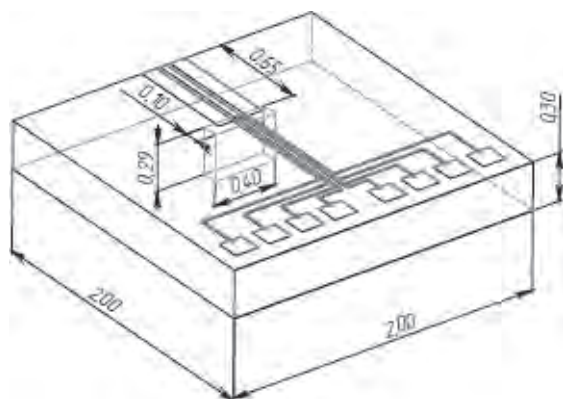


Рис. 3. Типовая структура термоэлектрического преобразователя (размеры в мм)

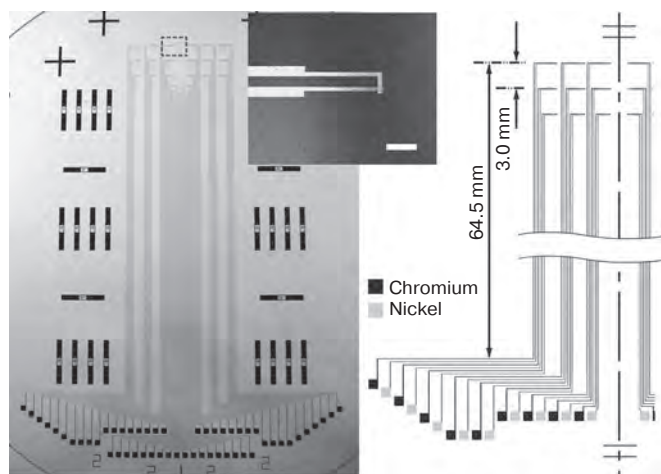


Рис. 4. Структура и коэффициент термо-ЭДС металлической термопары Ni-Cr [1]

Для решения этой проблемы необходимо проведение научно-исследовательских работ по поиску принципов построения (конструкции) и технологии изготовления тонкопленочных термоэлектрических преобразователей мощности СВЧ, проработки технологии изготовления с учетом возможностей отечественных предприятий-изготовителей.

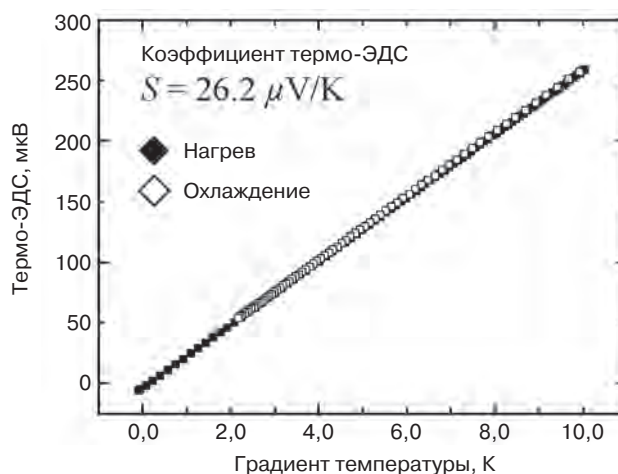
Решение задачи создания технологии производства измерительных преобразователей мощности представляется разбить на три этапа:

1. Поиск конструкции и отработка технологии изготовления тонкопленочных термоэлектрических преобразователей с большой величиной коэффициента термо-ЭДС.
2. Поиск конструкции и отработка технологии изготовления низкоомных (5–20 Ом/кв) тонкопленочных резисторов и копланарных волноводов для использования в качестве согласованной нагрузки.
3. Совмещение термоэлектрического преобразователя и согласованной нагрузки на кристалле с обеспечением низких обратных потерь, высокой чувствительности и малой постоянной времени.

Для охвата достаточно большого диапазона измерений мощности (–35...+44 дБм) имеющихся на сегодня зарубежных датчиков мощности необходимо отработать технологию изготовления датчиков как малой, так и большой мощности. В конструкции и технологии изготовления этих двух видов датчиков будут различия, которые обусловлены величиной рассеиваемой мощности.

В начале целесообразно решить проблему изготовления датчика мощности с частотой до 18 ГГц с обеспечением качественного и надежного согласования волновых сопротивлений и высокой чувствительности. В качестве термоэлектрического преобразователя необходимо рассмотреть варианты использования термопар на основе металлов и на основе полупроводниковых соединений. Полупроводниковые соединения сложнее в изготовлении, но обещают на порядок больший коэффициент термо-ЭДС, чем металлические, что позволит в дальнейшем сделать конструкцию датчика более надежной, а характеристики стабильнее. Сравнение коэффициентов термо-ЭДС металлических и полупроводниковых термоэлектрических преобразователей приведено на рис. 4 и 5.

Из сравнения коэффициентов термо-ЭДС видно, что полупроводниковые термопары позволяют получить в десятки раз большую чувствительность по сравнению с металлическими.



Недостатком данного вида термопар является сравнительная сложность технологии изготовления из-за необходимости получения материала термопары в кристаллическом состоянии с практически идеальной структурой. Получение таких материалов сопряжено с целым рядом особенностей технологических процессов, которые в итоге влияют на подвижность, рассеяние электронов в материале и, соответственно, на дисперсионные кривые кристаллической решетки [3]. Среди основных факторов можно выделить подготовку поверхности подложки, химический состав исходного материала, параметры процесса нанесения, температуру и время последующего отжига [2, 4].

В качестве тонкопленочных согласованных нагрузок необходимо рассмотреть использование как чистых металлов и сплавов, так и соединений, получаемых в реактивном процессе магнетронного распыления. На рис. 6 представлено схематичное изображение параметров, которые необходимо контролировать при изготовлении тонкопленочных нагрузочных резисторов методом магнетронного распыления в среде реактивного газа или без него.

Такие же параметры контролируются при изготовлении других элементов методом магнетронного распыления. Получение заданного сопротивления нагрузки с требуемой воспроизводимостью является также непростой задачей. Однако что касается величины полученного сопротивления, то в работе [5] получено сопротивление 2,7 Ом/кв при нанесении высоконапряженных пленок нитрида титана, для платины получено 1,4 Ом/кв, что позволяет говорить о возможности получения нагрузочных резисторов заданного сопротивления. Однако воспроизводимость процесса изучена не была.

Можно выделить следующие требования к термоэлектрическим преобразователям СВЧ:

- обеспечение диапазона измерений мощности СВЧ от  $-35$  до  $20$  дБм;
- получение КСВН СВЧ-входа до 2,2;
- чувствительность по входному СВЧ-сигналу не более  $-35$  дБм;
- линейность передаточной характеристики в рабочем диапазоне мощности СВЧ;
- обеспечение стабильности характеристик во времени;
- вариация показаний при движении рабочей точки вверх и вниз по входной мощности.

Легкую вариацию показаний можно наблюдать на рис. 4 как разность показаний при нагреве и охлаждении термопары.

Изготовление подобного термоэлектрического преобразователя позволит решить одну из главных задач обеспечения единства измерений мощности СВЧ, а именно создания изделия, которое может быть одинаково хорошо согласовано при монтаже как в коаксиальный, так и в волноводный тракт и в конечном итоге позволит создать универсальное и стандартное решение в области измерения мощности СВЧ.

По итогам проведения исследовательских работ целесообразно разработать техническое задание на проведение опытно-конструкторской работы по разработке измерителя (датчика) мощности СВЧ перспективного диапазона частот на базе термоэлектрического преобразователя, изготовленного по технологии МЭМС.

В заключение следует отметить, что проведенные начальные исследования возможности изготовления датчика не выявили непреодолимых препятствий, возникающие проблемы могут быть решены с привлечением базы научно-исследовательских институтов и предприятий-изготовителей. Особенно необходимо отметить перспективу создания на базе технологии МЭМС эталонов измерителей мощности электромагнитных колебаний

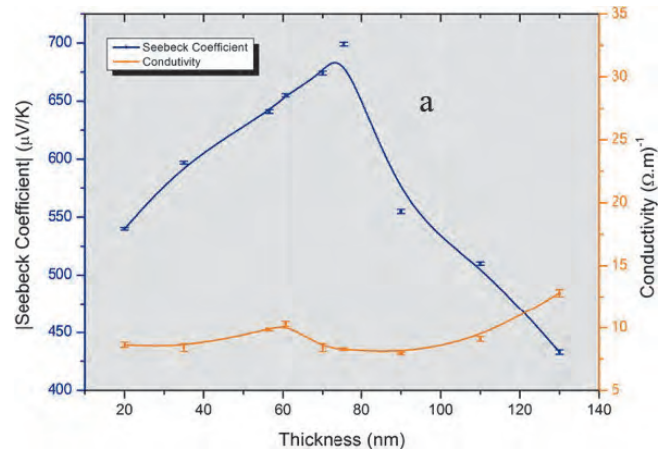


Рис. 5. Коэффициент термо-ЭДС полупроводниковой термопары  $V_2O_5$  в зависимости от толщины слоя [2]

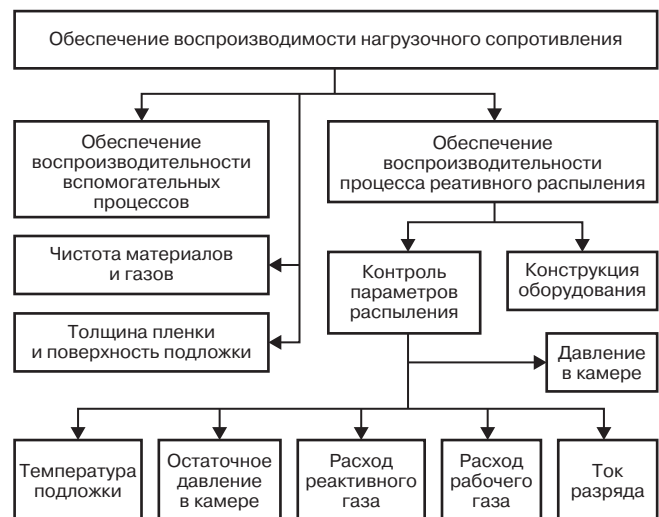


Рис. 6. Основные контролируемые параметры при изготовлении тонкопленочных нагрузочных резисторов

диапазона частот до 110–330 ГГц. Такая работа позволит существенно сократить отставание отечественной промышленности в области средств измерений мощности СВЧ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Liu H., Sun W., Chen Q., Xu S. *Thin-Film Thermocouple Array for Time-Resolved Local Temperature Mapping* // IEEE Electron Device Letters. Vol. 32. № 11, November 2011.
2. Bianchi Marques C., Figueira J., Ropio I., Oliveira S., Loureiro J., Ferreira I.  *$V_2O_5$  thin film for high sensitivity flexible and transparent thermal sensors* // Jpn. J. Appl. Phys., 59(54), 2016. 120–126.
3. Pshenay-Severin D.A., Ivanov Y.V., Burkov A.T. *The effect of interband electron scattering on thermoelectric properties of the novel topological compound CoSi* // arXiv:1805.11334v1 [cond-mat. mes-hall] 29 May 2018.
4. Acosta D., Pérez A., Magaña C., Hernández F.  *$V_2O_5$  Thin Films Deposited by RF Magnetron Sputtering: The Influence of Oxygen Content in Physical Properties* // Journal of Materials Science and Engineering. A 6 (3–4) (2016). 81–87.
5. Creemer J. F., van der Vlist W., de Boer C. R., Zandbergen H. W., Sarro P. M. *MEMS Hotplates with TiN as a Heater Material* // DOI: 10.1109 / ICSSENS.2005.1597703.