

УДК 621.317.089.6, 621.317.784.023

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
СВЧ-ТЕРМИСТОРОВ, ПРОИЗВОДИМЫХ
ФГУП «ВНИИФТРИ»****А.А. Прядка***ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
priadka@vniiftri.ru*

Аннотация. В работе исследовались характеристики производимых во ФГУП «ВНИИФТРИ» термисторов с целью изучить механизм возникновения паразитной ёмкости, ведущей к ухудшению работы термисторов на сверхвысоких частотах. В ходе работы были изучены механизмы, влияющие на ёмкость изделий. Усовершенствованы технологические операции, приводящие к увеличению ёмкости. Изготовлены партии термисторов с пониженными значениями паразитной ёмкости.

Ключевые слова: СВЧ-термистор, исследование свойств, совершенствование технологии.

**INVESTIGATION OF THE CHARACTERISTICS
OF MICROWAVE THERMISTORS PRODUCED
BY FSUE "VNIIFTRI"****A.A. Pryadka***FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,
priadka@vniiftri.ru*

Abstract. In this article, the characteristics of thermistors produced at FSUE "VNIIFTRI" were investigated. The purpose of the work is to study the mechanism of the occurrence of parasitic capacitance, leading to deterioration of the operation of thermistors at ultrahigh frequencies. In the course of the work, the mechanisms affecting the capacity of the products were studied. Technological operations leading to an increase in capacity have been improved. Batches of thermistors with reduced values of parasitic capacitance were manufactured.

Keywords: microwave thermistor, properties research, technology improvement.

Измерение мощности электромагнитных колебаний является одним из основных видов измерений в СВЧ-диапазоне. Наибольшее распространение получили преобразователи мощности, принцип действия которых основан на преобразовании мощности СВЧ в тепловую энергию. Одним из наиболее распространённых термочувствительных элементов преобразования является термистор.

Измерение мощности СВЧ с помощью термисторных преобразователей производится методом замещения поглощённой в термисторе мощности высокочастотных электромагнитных колебаний мощностью постоянного тока. Этим обеспечивается прослеживаемость единицы мощности СВЧ к эталонам основных физических величин — напряжения и силы тока на постоянном токе. Также особенностью термисторных преобразователей является высокая стабильность во времени [1].

При работе на СВЧ эквивалентную схему термистора можно представить следующим образом (рис. 1) [2]. Индуктивная и ёмкостная составляющие являются важными параметрами, влияющими на работу изделия [3]. Поэтому важно изучить механизмы возникновения этих составляющих, разработать технологические приёмы, обеспечивающие минимальные значения этих параметров, и провести измерения с целью подтверждения данных характеристик.

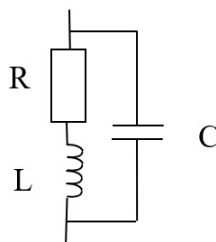


Рис. 1. Эквивалентная схема термистора

С целью проверки свойств рабочего тела термистора на соответствие теоретической модели [4] была изучена зависимость сопротивления термистора от температуры. На графике (рис. 2) представлены температурные зависимости для производимых во ФГУП «ВНИИФТРИ» термисторов и производившихся в советские годы заводским способом изделий.

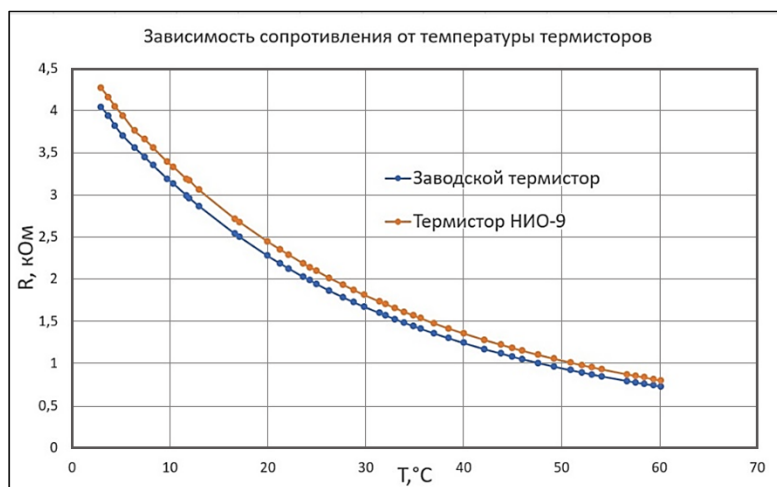


Рис. 2. Зависимость сопротивления термисторов от температуры

Измерения температуры производились датчиком ТН-485. Между термисторами и датчиком был создан тепловой контакт при помощи термопасты. Измерения сопротивления производились при помощи мультиметров АРРА 103N, изменение температуры обеспечивалось при помощи сушильного шкафа ШС-80-01.

Анализ данных, полученных в ходе эксперимента, показывает соответствие полученных данных и теоретической модели. Кроме того, наличие целевых структур, оксидных шпинелей в рабочем теле термистора подтверждено методом прямых наблюдений при помощи электронного сканирующего микроскопа (рис. 3).

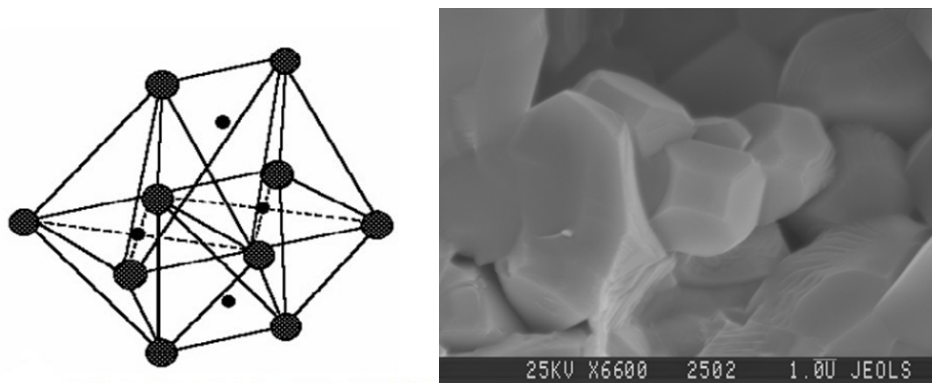


Рис. 3. Теоретическая модель «шпинели» и фотография микроструктуры термистора, полученная с помощью электронного микроскопа. Увеличение 6600^x

Таким образом, рабочее тело термистора соответствует заданным свойствам, дальнейшие эксперименты в области совершенствования технологии его изготовления нецелесообразны.

В ходе дальнейших операций к рабочему телу термистора приваривают выводы при помощи серебрясодержащей пасты и наносят защитное стеклянное покрытие. В ходе данных высокотемпературных операций серебро и расплавленное стекло мигрируют в пористое рабочее тело термистора (рис. 4).

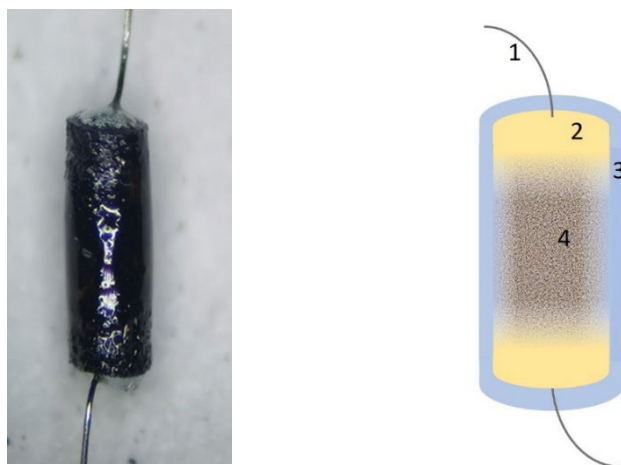


Рис. 4. Внешний вид термистора и схематическое изображение его внутренних структур:
1 — платиновая нить; 2 — серебряная паста; 3 — стекло; 4 — рабочее тело термистора

Данные процессы формируют в рабочем теле термистора новые структуры, состоящие из проводящего серебра и стекла с диэлектрическими свойствами. Вероятно, подобные структуры являются причиной избыточной ёмкости термисторов на высоких частотах.

Для проверки данной гипотезы были опробованы несколько технологических приёмов, позволяющих снизить миграцию серебра в рабочее тело термистора. Измерения ёмкости проводились при помощи измерителя RLC АКТАКОМ АМ-3026 на частоте 5 МГц, поскольку измерения на рабочих частотах невозможны без установки термисторов в волновод.

Защитное стеклянное покрытие осуществляется методом нанесения стеклянной пасты марки ПЗХ-1 с дальнейшим плавлением стекла. Это классическое решение, применяемое в производстве радиоэлектронных компонентов [5]. Рекомендации производителя: конвейерный процесс с выдержкой 5–7 минут при 600 °С изначально неприемлем из-за высокой скорости впитывания стекла в рабочее тело термистора и резкого повышения сопротивления ввиду этого. На графике (рис. 5) представлена зависимость сопротивления от времени нагрева.

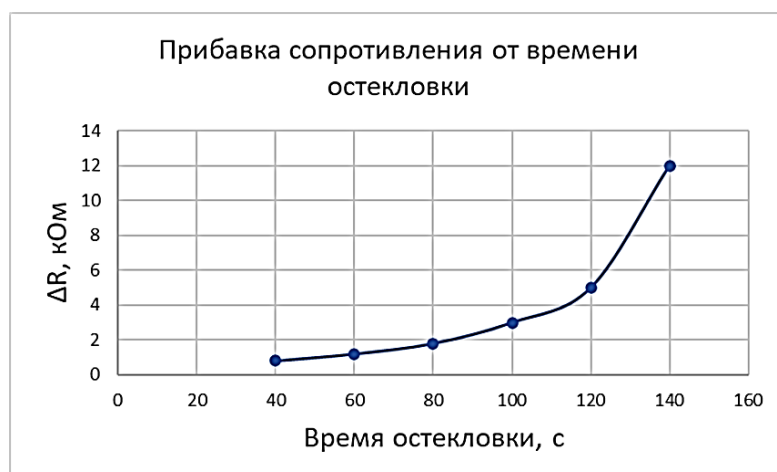


Рис. 5. Зависимость сопротивления термистора от времени остекловки

Таким образом, процесс остекловки определяется целевым сопротивлением и регулированию не подлежит. Альтернатив стеклянному покрытию также не найдено ввиду его термостойкости.

Приваривание платиновой нити осуществляется методом высокотемпературного спекания серебряной пасты ППС-2. Производителем рекомендован конвейерный процесс с выдержкой 8 мин при 850 °С. В лабораторных условиях процесс затянут в связи с инерционностью муфельной печи. Поэтому исследованы два способа снизить влияние пасты — сократить время воздействия температуры и заменить марку пасты [6].

Проводники присоединялись при помощи токопроводящей вжигаемой пасты трёх различных марок: серебряной ППС-2, платиновой ПП-33, палладиевой ПП-11 при одинаковых условиях. Результат представлен в таблице 1. Экспериментальные партии изготавливались в количестве 5–10 штук, поэтому результат представлен в виде диапазона значений.

Таблица 1

Марка пасты	ППС-2	ПП-33	ПП-11
Ёмкость, пФ	2,8–3,5	5–7	1,1–2

Термисторы с палладиевой пастой демонстрируют наименьший диапазон ёмкостей. Можно сделать вывод о том, что миграция компонентов пасты ПП-11 в рабочее тело термистора минимальна.

С целью оптимизации температурного режима вжигания пасты проведены эксперименты с различным профилем нагрева и охлаждения экспериментальных партий термисторов (таблица 2). Производителем рекомендован конвейерный процесс с выдержкой 8 мин при 850 °С.

Таблица 2

Режим спекания	Ёмкость, пФ	Сопротивление, кОм
Нагрев — 2 часа, выдержка — 30 минут	2,8–3,5	1,9–2,3
Нагрев — 1 час, выдержка — 10 минут	2,5–3,5	1,9–2,3
Нагрев — 40 минут, выдержка — 10 минут, извлечение заготовок из горячей печи	0,3–0,8	1,9–2,3

Уменьшение времени спекания снижает ёмкость термисторов, но не влияет на сопротивление. Исходя из полученных данных, организация конвейерного процесса будет перспективным решением, позволяющим избежать избыточной миграции серебра в процессе длительного нагрева и остывания муфельной печи.

Уменьшение диаметра изделия должно приводить к снижению площади конденсатора и, как следствие, его ёмкости. Были изготовлены партии термисторов с различным диаметром рабочего тела — 0,28 и 0,2 мм. Следует отметить, что диаметр изделий в 0,2 мм является пределом для данной технологии изготовления. Результаты эксперимента представлены в таблице 3.

Таблица 3

Диаметр рабочего тела, мм	Ёмкость, пФ	Сопротивление, кОм
0,28	2,8–3,5	1,9–2,3
0,2	0,8–1,4	2,2–4,3

Уменьшение диаметра рабочего тела снижает ёмкость термисторов и увеличивает сопротивление.

В ходе работы исследованы технологические подходы, позволяющие снизить паразитные характеристики терморезисторов. Изготовлены опытные партии изделий и исследованы их характеристики. Применение паст другой марки, сокращение времени спекания и уменьшение диаметра рабочего тела термистора позволяют добиться значительного снижения ёмкости, измеряемой на частоте 5 МГц.

Список литературы

1. Петухова Н.А., Гатчин Ю.А. Измерение мощности в СВЧ-диапазоне // Успехи современной науки и образования. — 2016. — Т. 2. — № 11. — С. 146–151.
2. Сергеев В.А. Оценка погрешности термисторных датчиков при измерении СВЧ-мощности методом замещения // Датчики и системы. — 2004. — № 12. — С. 9–12.
3. Перепелкин В.А., Пивак А.В., Чуйко В.Г. Исследование линейности эталонных термисторных ваттметров и оценка минимально достижимых погрешностей измерений отношения СВЧ-мощностей // Измерительная техника. — 2003. — № 10. — С. 45–51.
4. Шашков А.Г., Касперович А.С. Динамические свойства цепей с термисторами. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. — 208 с.
5. Пат. Российская Федерация, МПК Н 01 С 7/00. Толстопленочный резистивный элемент / Б.Н. Андронов [и др.]; заявитель и патентообладатель Научно-производственный комплекс «Аксель». — № 2054720; опубл. 20.02.1996, Бюл. № 2.
6. Кожевникова Н.М., Смирнягина Н.Н. Серебряные проводниковые пасты для пленочной микроэлектроники // Вестник Бурятского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук. — 2012. — № 2. — С. 181–184.

Статья поступила в редакцию: 19.04.2022 г.

Статья прошла рецензирование: 01.06.2022 г.

Статья принята в работу: 25.07.2022 г.