

# МЕЗОСТРУКТУРНЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В УСЛОВИЯХ КРИТИЧЕСКИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗОК

Д.Х.Абед, В.В.Евстигнеев

*В работе рассмотрены вопросы модели технологии изготовления и применения мезоструктурных температурных датчиков ( $\mu S$  RTD), физические принципы измерения температуры в условиях разрушения мезоструктурного терморезистивного слоя под воздействием комплексных температурно-механических воздействий на чувствительную поверхность датчика. Приводятся методики испытаний и расчет поправок на влияние саморазогрева низкоомного терморезистора, а также некоторые характеристики  $\mu S$  RTD на основе Ti, Ni, Al.*

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время среди широкого класса терморезистивных датчиков температуры (RTD) наибольшее распространение получили два типа терморезисторов: проволочные (Wire Wound) и микропленочные (Thin Film).

Обычными требованиями, предъявляемыми к датчикам, являются следующие:

1) характеристики датчика (размер, влияние вибраций, механические воздействия, чувствительность, температурный диапазон, стабильность, точность, способность регистрации температуры мелких частиц и двигающихся объектов, область применимости датчика, отсутствие воздействия датчика на процесс измерения, коэффициент саморазогрева, однородность, стоимость, взаимозаменяемость) [1].

2) внешние характеристики (контактный или оптический способ измерения температуры, требуемая точность измерения, диапазон изменения температуры, максимальная температура, необходимое быстрое действие датчика, условия эксплуатации, дополнительные требования) [2, 3].

Несмотря на высокую линейность температурной зависимости RTD, известные типы датчиков не обладают достаточной прочностью к воздействию импульсных динамических нагрузок, которые приводят к разрыву токоведущего слоя. Это объясняется тем, что для повышения чувствительности RTD требуется применение сверхтонких пленок и проволоки, которые не выдерживают резких ударов, больших температурных градиентов и механических напряжений. Таким образом, актуальной задачей в области теплофизических методов исследования процессов взрыва и горения является разработка RTD-

датчиков работающих в условиях критических эксплуатационных нагрузок.

## МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ МЕЗОСТРУКТУРЫ ТЕРМОДАТЧИКА

В основу метода изготовления устойчивого к большим термомеханическим нагрузкам RTD-датчика положен принцип аналогичный известному постулату Гиппократ: «лечить подобное подобным». Поэтому для того, что бы RTD-датчик мог обеспечивать измерение температуры в процессах взрыва и горения, он должен быть изготовлен в подобных условиях. Наиболее подходящими для этого технологиями являются детонационно-газовое и плазменное напыление покрытий из частиц металлических порошков. Скорость соударения частиц порошка с подложкой лежит в пределах от 0,4 до 1,5 М (М-число Маха), что обеспечивает напорное давление в точке соприкосновения от 100 до 800 МПа, в зависимости от плотности частиц металлического порошка. Температурный диапазон частиц порошка, напыляемых на подложку с помощью таких технологий, обычно лежит в пределах от 600 до 2300 °С.

Сформированные в таких условиях терморезистивный слой должен выдерживать эксплуатационные нагрузки, не превышающие указанные выше пределы. Изготовленный таким образом датчик будет иметь явно выраженную мезоструктуру (от греч. *mesos* - средний, промежуточный), то есть часть образующихся слоев, занимает среднее, промежуточное положение. По этому отличительному признаку терморезистивные датчики такого типа для краткости будем обозначать в дальнейшем аббревиатурой:  $\mu S$  RTD (MesoStructure Resistant Temperature Device).

Каждый слой  $\mu S$  RTD формируется при соударении расплавленной частицы металла с подложкой. По результатам литературного обзора, например [4], было отмечено, что при взаимодействии жидкой капли металла с твердой поверхностью растекание жидкости сопровождается теплообменом и фазовым превращением - кристаллизацией. Конкуренция этих процессов и определяет финальную форму затвердевшей капли. В связи с этим, задача оптимизация условий формирования капель определенной формы на контактных поверхностях различных материалов требует экспериментального исследования динамики растекания, охлаждения и затвердевания капель малого размера, включающая широкую вариацию, как условий осаждения капель, так и условий смачивания и теплообмена. Необходимо также развитие аналитических моделей, позволяющих выделить влияние и взаимозависимость условий осаждения капель и свойств используемых материалов.

Механизм образования отдельных частиц в процессе плазменного нанесения покрытия (сплет-частиц) и формирования из них терморезистивного слоя иллюстрируется рисунком 1.

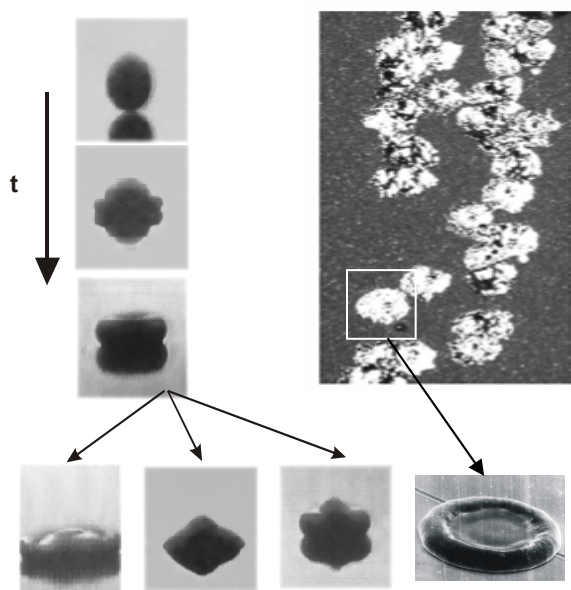


Рис. 1. Скоростная съемка процессов формирования сплет-частиц в одном слое мезоструктуры

В рамках этой, уже общей постановки задачи, для успешного внедрения  $\mu S$  RTD технологии в микроэлектронику встает вопрос о прогнозировании формы затвердевших капель металла при их осаждении на поверхности различных материалов в условиях, соот-

ветствующих средним значениям чисел Вебера ( $We=1-100$ ) и Рейнольдса ( $Re<1500$ ). Таким образом, благоприятный прогноз в области получения соответствующей формы капель невозможно сделать без сознательного и углубленного изучения процессов, происходящих в момент соприкосновения капли металла с подложкой. Здесь необходимо четкое понимание влияния различных факторов на процесс формирования мезоструктуры. Определяющими параметрами (рис. 2), с нашей точки зрения, являются такие как: природа взаимодействующих материалов, соотношение температуры капли металла и подложки, а также скорость и размер осаждаемых частиц.



Рис. 2. Взаимодействие микрокапель металла с поверхностью

#### ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ $\mu S$ RTD-ДАТЧИКА

Работа  $\mu S$  RTD-датчика основана на известной зависимости удельного сопротивления от температуры, однако в отличие от серийно выпускаемых RTD-датчиков  $\mu S$  RTD-датчик формируется в виде чешуйчатой наслоенной структуры сплет-

## МЕЗОСТРУКТУРНЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В УСЛОВИЯХ КРИТИЧЕСКИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗОК

частиц, образующей проводящие металлические участки и области контактов между ними. Причем резистивные свойства подобной структуры будут определяться двумя факторами, во-первых, сопротивление  $\mu S RTD$  зависит от химической природы проводящего материала (классический RTD), а во-вторых, числом и качеством контактных площадок между отдельными сплет-частицами. Такая мезоструктура будет определять резистивные свойства датчика, причем при низких (300-500 K) температурах определяющую роль будет играть линейная зависимость сопротивления от температуры, а при высоких (>500 K) – решающее значение будут определять процессы, происходящие в контактных областях, а именно процессы постепенного разрушения контактов между отдельными осажденными сплет-частицами. Этот процесс будет приводить к постепенному отклонению температурной зависимости от линейного вида. Модельная топология  $\mu S RTD$ -датчика в идеальном случае представлена на рисунке 3, а полученные экспериментальные образцы на рисунке 4. В качестве диэлектрической подложки выбран керамический материал (сапфир -  $Al_2O_3$ ), т.к. он обладает достаточной механической прочностью, высоким значением электрического удельного сопротивления и низким коэффициентом теплопроводности.



Рис. 3. Топологическая модель структуры

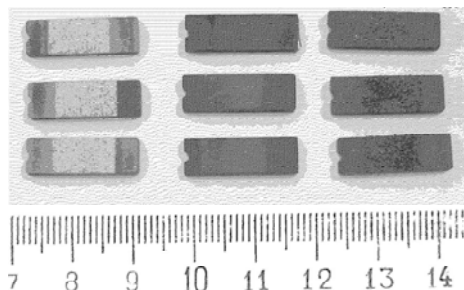


Рис. 4. Образцы  $\mu S RTD$  – датчиков с терморезистивным слоем из порошков Al, Ti, Ni соответственно

Покрывтие состоит из несколько слоев, образующих мезоструктуру. Данная структура в общем виде может быть представлена трехмерной матрицей, состоящей из сетки сопротивлений. При анализе эквивалентной электрической схемы, на данном этапе ограничимся плоским слоем, который формирует набор параллельных и последовательных сопротивлений (рисунок 5), возникающих на границах соединения частиц. Общее сопротивление датчика определяется химической прочностью соединения частиц между собой, числом, размером и видом контактов.

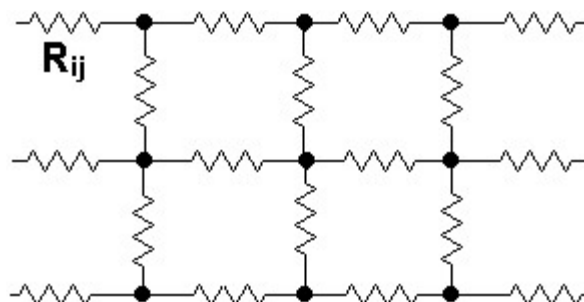


Рис. 5. Эквивалентная электрическая схема  $\mu S RTD$  – датчиков

На эквивалентной электрической схеме низкоомные сплет-частицы отображены узлами соединений, а резисторы в смежных ветвях соответствуют сопротивлениям межзеренных границ, образованной мезоструктуры, таким образом, они характеризуют особенность  $\mu S RTD$  – датчика, где совместно с терморезистивным эффектом явно выявляется зависимость от площади контактов ячеек мезоструктур и топологии токоведущего слоя, т.е. его эффективной длины.

Поверхность датчика в процессе эксплуатации разрушается под воздействием высокой температуры, в результате уменьшается количество контактов между частицами, образующими мезоструктуру датчика. Этот процесс иллюстрируется на рисунках 6, 7. С точки зрения эквивалентной схемы  $\mu S RTD$ -датчика мы можем говорить о «перегорании» некоторых резисторов в цепи. Это приведет к скачкообразному изменению общего сопротивления датчика, а так как число и расположение резисторов в цепи заранее невозможно предсказать, то данный процесс носит вероятностный характер.

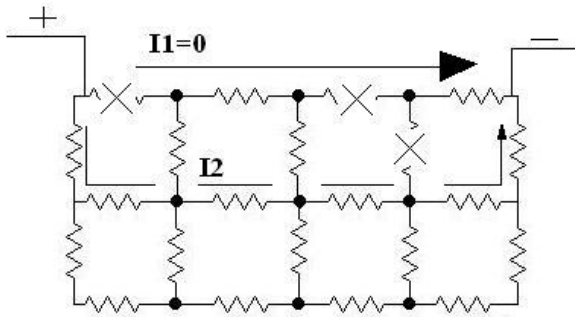


Рис. 6. Разрушение поверхности датчика и изменение токоведущих участков

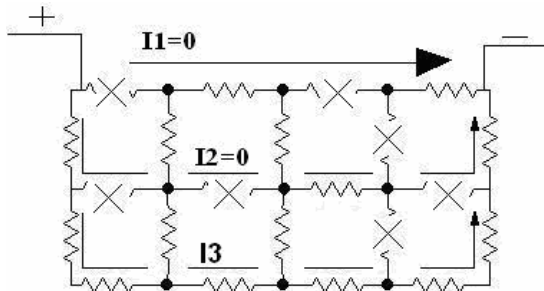


Рис. 7. Разрушение верхних слоев  $\mu S$  RTD-датчика

### СХЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Схема измерения температуры, использующая  $\mu S$  RTD-датчик может быть построена на использовании метода и прибора сравнения. Типичными схемными реализациями данного метода служат измерительные мосты, в основе работы которых заложен дифференциальный или нулевой метод. Применение уравновешенного моста позволяет сравнивать при помощи двух или более вспомогательных сопротивлений, подбираемых таким образом, чтобы со сравниваемыми сопротивлениями они составляли замкнутый контур (четырёхполюсник), питаемый от одного источника и имеющий две равнопотенциальные или близкопотенциальные точки, обнаруживаемые индикатором равновесия [5].

Для измерения малых сопротивлений применим двойной мост, обеспечивающий измерение малых сопротивлений.

Общее сопротивление датчика оценивается следующим образом:

$$R = R_0 (1 + \alpha T) = \rho L / S (1 + \alpha T), \text{ где}$$

$R_0$  – сопротивление датчика при  $0^\circ\text{C}$ ,

$\rho$  – удельное сопротивление ( $\text{Ом}\cdot\text{м}$ ),

$L$  – длина датчика (м),

$S$  – площадь поперечного сечения датчика ( $\text{м}^2$ ),

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления ( $^\circ\text{C}^{-1}$ ),

$T$  – температура ( $^\circ\text{C}$ ),

Для измерения сопротивления датчика применяем одинарный или двойной мост Уитстона (рис. 8), обеспечивающий необходимую точность измерения сопротивлений ( $\mu S$  RTD) порядка ( $10^{-8}$  –  $10$  Ом).

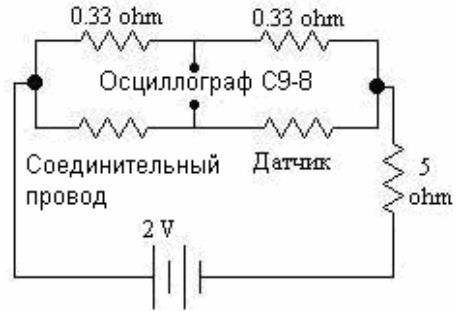


Рис. 8. Измерительный мост Уитстона

Испытания эксплуатационных параметров датчиков проводились на экспериментальном стенде, приведенном на рисунке 9.

Порядок проведения испытаний:

1. Измерение сопротивления датчика в режимах: а) разогрев до  $1000^\circ\text{C}$ , б) охлаждение до комнатной температуры;
2. Повторные измерения сопротивлений датчиков (не менее 5 раз для каждого датчика);
3. Статистическая обработка калибровки датчиков.

Для измерения точного значения сопротивления ток, протекающий через образец, не должен вызывать саморазогрев датчика. Уравнение, которое определяет саморазогрев для  $\mu S$  RTD-датчика имеет следующий вид:

$$\frac{P}{A} = -kU'(0).$$

Где:

$P$  – тепловая мощность в RTD =  $V^2 / R(T)$ , (Вт)

$A$  – площадь поверхности RTD, ( $\text{м}^2$ )

$K$  – коэффициент температуропроводности подложки, ( $\text{м}^2/\text{с}$ ).

Таким образом:

$$\frac{P}{A} = -\gamma \frac{(T_2 - T_1)}{l},$$

$$T_1 = \frac{IP}{\gamma A} + T_2 = \frac{IV^2}{\gamma AR(T)} + T_2, \text{ где } \gamma = k\beta$$

$\beta$  – параметр теплового сопротивления подложки, ( $\beta = \text{Дж}/\text{м}^3\cdot\text{K}$ )

## МЕЗОСТРУКТУРНЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В УСЛОВИЯХ КРИТИЧЕСКИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗОК

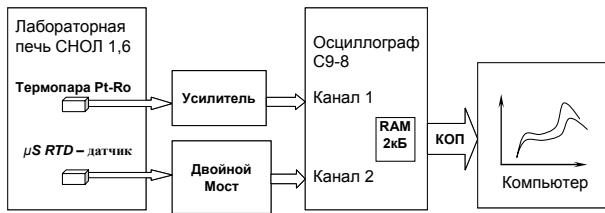


Рис. 9. Блок-схема установки по калибровке  $\mu S RTD$  и измерения температуры

### ТЕМПЕРАТУРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА $\mu S RTD$ -ДАТЧИКА

Отличительной особенностью измерительной характеристики  $\mu S RTD$  является наличие нелинейного участка на температурной характеристике (рис. 10), явно проявляющаяся после нагревания  $\mu S RTD$  выше некой температуры  $T_{des}$ . Эта температура, по нашему мнению, соответствует началу активного разрушения части поверхностных слоев мезоструктуры. Причем после остывания характеристика не возвращается к начальной точке. Таким образом, мы имеем дело с температурным гистерезисом, наблюдаемым в процессе термоциклических испытаний  $\mu S RTD$ . Величина же увеличения сопротивления определяется энергией связи сплет-частиц в исследуемой мезоструктуре. После проведения достаточного числа термоциклов  $\mu S RTD$ , как и  $RTD$  подвержен разрушению, этот момент определяется числом циклов, химической природой осажденного материала, толщиной слоя покрытия и т.д. При этом, варьируя в широких пределах толщину нанесенного  $\mu S RTD$  слоя, имеем возможность прогнозирования длительности работы подобного датчика в критических условиях эксплуатации.

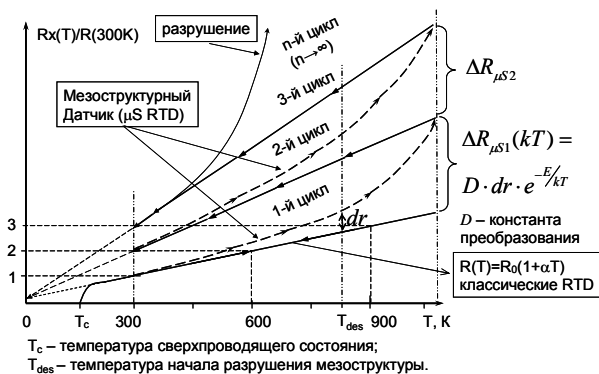


Рис. 10. Сравнение температурных характеристик  $RTD$  и  $\mu S RTD$

## ВЫВОДЫ

После изучения характеристик существующих датчиков и характеристик импульсных высокотемпературных гетерогенных потоков, можно сделать вывод, что разработанные  $\mu S RTD$  терморезисторы наиболее приемлемы для измерения температуры в условиях критических механических, тепловых и ударных нагрузок, поскольку обладают высокой механической стойкостью к воздействию нагрузок, возникающих в импульсных процессах напыления, удара, взрыва. Поэтому предлагается формировать структуру терморезистора в процессе осаждения в виде слоистых проводящих мезоструктур.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абед Д.Х., Гумиров М.А. Контактный метод измерения температуры покрытия в процессе детонационно-газового напыления // Наука технологии инновации, часть 2, Новосибирск, 2004. - С. 3-4.
2. Desmaris R. & Breuer J., How to Select and Use the Right Temperature Sensor, sensors magazine, Jan. 2001.
3. Bluestein I. Understanding Contact Temperature Sensors, sensors magazine, Jan. 1999.
4. Predtechensky M.R., Varlamov Yu. D., Ul'iankin S.N., Cherepanov A. N., Popov V.N. Spreading and solidification of liquid metal droplets on a substrate: experiment, analytical model and numerical simulation, Proceedings of 32nd International Symposium on Microelectronics, October 26-28, 1999, Chicago Hilton & Towers, Chicago, Illinois, IMAPS-International Microelectronics and Packaging Society, 1999, pp. 166-171.
5. Методы и средства измерения электрических величин / Под ред. Э.Г. Атамалян. М., 1974.