

Применение тонкопленочных термосопротивлений (Thin Film RTD) для измерения температуры и скорости потока

Ксения КОНДРАШОВА
xk@efo.ru

При изготовлении различных электронных компонентов, в том числе термодатчиков, применяются тонкопленочные технологии. Производство тонкопленочных элементов напоминает процесс изготовления полупроводников — тонкопленочный датчик состоит из керамической подложки, напыленной металлической структуры и слоя изоляции. В статье рассмотрим необычные первичные преобразователи, существование которых стало возможным благодаря тонкопленочной технологии: платиновые датчики температуры для пайки к поверхности объекта, датчики расхода сплошных сред и другие компоненты.

Общие сведения о термосопротивлениях

Термосопротивления являются одним из широко распространенных типов датчиков температуры. Это резистивные чувствительные элементы, чье сопротивление практически линейно зависит от температуры (рис. 1). Термосопротивления также известны разработчикам как термометры сопротивления или RTD, а также по обозначениям, принятым для термосопротивлений с определенной выходной характеристикой, — Pt100, Pt500, Pt1000, 50П, 100П, 50М, 100М и т. д.

Значительная часть современных термосопротивлений производится по тонкопленочной технологии.

Характеристики термосопротивлений

Основные параметры термосопротивления — его номинальная статическая характеристика (НСХ) и класс допуска. НСХ — это зависимость сопротивления элемента от температуры окружающей среды, иными словами, функция $R(T)$. Класс допуска описывает максимальное отклонение реальной зависимости $R(T)$ от идеальной.

Номинальная статическая характеристика

Несмотря на то, что одним из ключевых преимуществ термосопротивлений по сравнению с термисторами и термопарами считается линейность выходной характеристи-

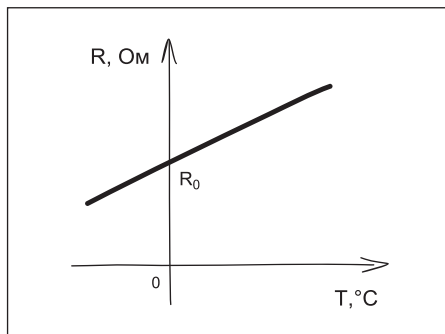


Рис. 1. Выходная характеристика термосопротивления

ки, функция $R(T)$ все же не является строго линейной. НСХ термосопротивления описывается полиномом $R(T)$, чей вид зависит от металла, из которого выполнен датчик, причем одному металлу может соответствовать несколько наборов коэффициентов полинома $R(T)$.

Подавляющая часть термосопротивлений выполняется из платины, в этом случае НСХ описывается следующим образом:

$$R(T) = R_0(1 + A \times T + B \times T^2) \text{ при } T > 0;$$

$$R(T) = R_0(1 + A \times T + B \times T^2 + C \times (T - 100) \times T^3) \text{ при } T < 0.$$

Если речь идет о никелевом датчике, то используется полином шестой степени:

$$R(T) = R_0(1 + A \times T + B \times T^2 + C \times T^3 + D \times T^4 + E \times T^5 + F \times T^6).$$

Для медных датчиков будет использоваться уже другая формула.

В приведенных полиномах значения коэффициентов A , B , C , D , E и F соответствуют типу металла, точнее температурному коэффициенту металла. Наиболее распространены платиновые датчики типа Pt 3850 ppm/K, этот тип термосопротивлений описан как в международных стандартах, так и в действующем ГОСТе. Ниже приведен набор коэффициентов полинома $R(T)$ для Pt 3850 ppm/K:

$$A = 3,9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5,775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = -4,183 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$$

Термосопротивления из платины Pt 3850 ppm/K обозначаются как Pt100, Pt500, Pt1000 и т. д.

Другой распространенный на постсоветском пространстве тип термосопротивлений — платиновые датчики с температурным коэффициентом Pt 3911 ppm/K. В прошлом российскому ГОСТу соответствовал только этот тип термосопротивлений, а потому датчики Pt 3911 ppm/K до сих пор используются на некоторых предприятиях и обозначаются как 50П, 100П, 500П и т. д. Коэффициенты полинома $R(T)$, соответствующие датчикам Pt 3911 ppm/K, приведены ниже:

$$A = 3,9692 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5,829 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = -4,3303 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}.$$

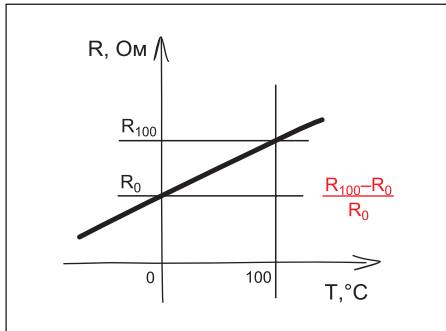


Рис. 2. Температурный коэффициент термосопротивления

В индустрии также применяются термосопротивления других типов: Pt 3750 ppm/K, Ni 6180 ppm/K, Ni 6720 ppm/K, Cu 4280 ppm/K и т. д., однако они распространены значительно меньше, чем Pt 3850 ppm/K.

Отметим, что температурный коэффициент, выраженный в ppm/K, соответствует наклону выходной характеристики на участке от 0 до +100 °C (рис. 2) и может быть выражен как в ppm/K, так и в °C⁻¹, %/°C или в других единицах.

Помимо степени полинома и его коэффициентов, НСХ датчика определяется номинальным сопротивлением R₀ — сопротивлением элемента при температуре 0 °C. В соответствии с приведенными выше формулами датчики с более высоким номинальным сопротивлением имеют более крутую характеристику, а значит, и большую разрешающую способность (рис. 3). Датчики с высоким R₀ также выбирают для снижения энергопотребления измерительного модуля.

В общепринятых для термосопротивлений типа Pt 3850 ppm/K обозначениях кодируется величина номинального сопротивления: Pt100 — это датчик с R₀ = 100 Ом, Pt500 — датчик с R₀ = 500 Ом, Pt1000 — датчик с R₀ = 1000 Ом, аналогично для других типов термосопротивлений.

Класс допуска

С помощью понятия «класс допуска» описывают максимально допустимое отклонение реальной характеристики датчика от расчетной. Каждому классу соответствует функция, описывающая допуск, и диапазон температур, на котором он определен (рис. 4).

В российском ГОСТе и международном стандарте DIN 60751 (IEC-751) для платиновых тонкопленочных датчиков с коэффициентом Pt 3850 ppm/K определено четыре класса допуска (таблица).

Помимо упомянутых в таблице классов, существуют классы, соответствующие более высокой точности: 1/5 DIN и 1/10 DIN. В то же время с удешевлением производства термосопротивлений датчики класса С постепенно вытесняются с рынка современных компонентов.

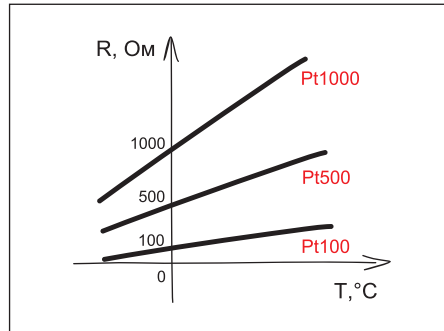


Рис. 3. НСХ платиновых термосопротивлений с различными номинальными сопротивлениями

Таблица. Определения классов допуска для платиновых тонкопленочных термосопротивлений Pt 3850 ppm/K

Класс допуска	Альтернативные названия класса	Допуск	Диапазон температур, °C
Class AA	Class Y 1/3 DIN 1/3 B F 0,1	±(0,1+0,0017 T)	0...+150
Class A	1/2 DIN 1/2 B F 0,15	±(0,15+0,002 T)	-30...+300
Class B	DIN F 0,3	±(0,3+0,005 T)	-50...+500
Class C	Class 2B Class BB F 0,6	±(0,6+0,01 T)	-50...+600

Важно понимать, что для датчиков, выполненных с использованием не тонкопленочной, а намоточной технологии, определения классов допуска имеют существенные отличия.

Технологии изготовления термосопротивлений

Как правило, термосопротивления представляют собой либо тонкопленочные (Thin Film), либо намоточные (проволочные, Wire Wound) элементы (рис. 5).

Тонкопленочный датчик состоит из керамической подложки, на которую наносятся металлическая токопроводящая дорожка и изолирующий слой из стекла.

Намоточные датчики имеют цилиндрическую форму и состоят из одной или нескольких металлических спиралей. Металлическая проволока либо наматывается на стеклянный или керамический цилиндр, после чего покрывается изолирую-

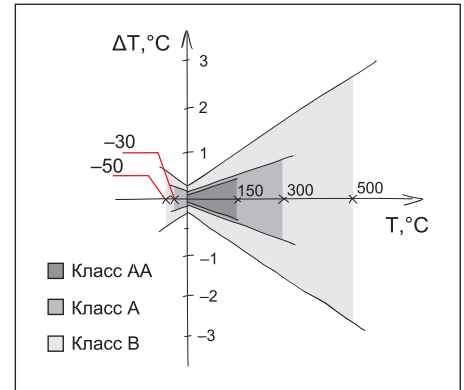


Рис. 4. Определения классов допуска AA, A и B для платиновых термосопротивлений с температурным коэффициентом Pt 3850 ppm/K

щим слоем (outer wound design), либо помещается в каналы внутри керамического цилиндра (coiled design).

Тонкопленочные датчики появились на рынке значительно позже намоточных, однако за последние несколько десятилетий они получили заслуженную популярность и на сегодня составляют большую часть рынка термосопротивлений.

Если отечественные датчики типа 50M, 100M, 50П или 100П все еще заметно дешевле изготовить в намоточном исполнении, то для популярных платиновых элементов Pt100, Pt500, Pt1000 ситуация прямо противоположная. Абсолютное большинство датчиков с коэффициентом Pt 3850 ppm/K выполняется по тонкопленочной технологии, а стоимость таких элементов ниже намоточных датчиков и может составить менее \$1.

При более низкой цене тонкопленочные датчики превосходят намоточные по целому ряду характеристик, в том числе по устойчивости к вибрациям и резким перепадам температуры, по скорости отклика и т. д. Кроме того, с помощью тонкопленочной технологии становится возможным создание специальных решений, о которых мы расскажем далее.

Структура тонкопленочного элемента

Рассмотрим структуру тонкопленочного термосопротивления подробнее на примере элементов швейцарской компании IST-AG.

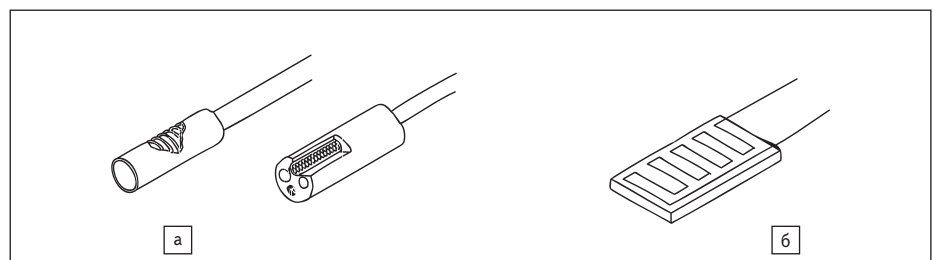


Рис. 5. Конструкции термосопротивлений: а) намоточные; б) тонкопленочные

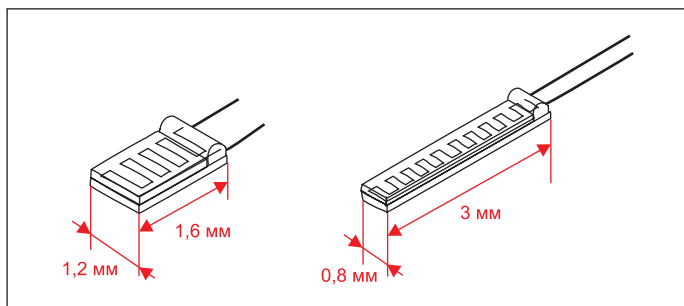


Рис. 7. Габариты выводных тонкопленочных термосопротивлений минимального размера

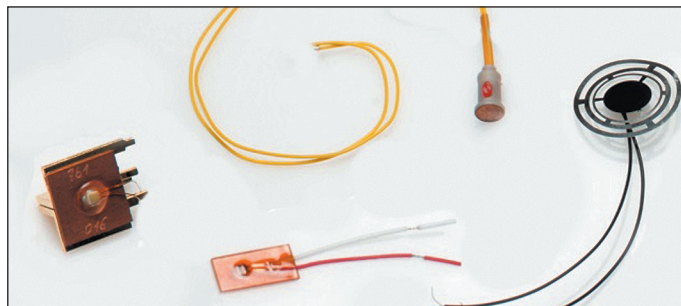


Рис. 9. Металлизированные термосопротивления, установленные на контактные детали

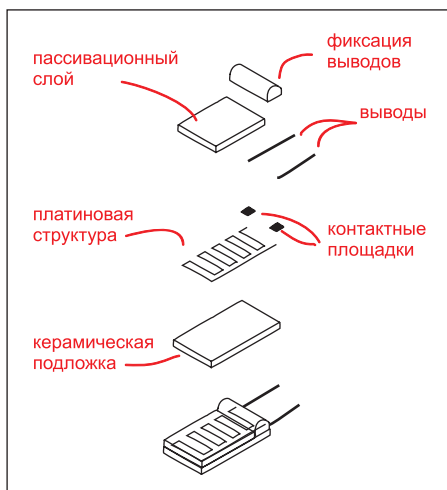


Рис. 6. Конструкция тонкопленочного термосопротивления

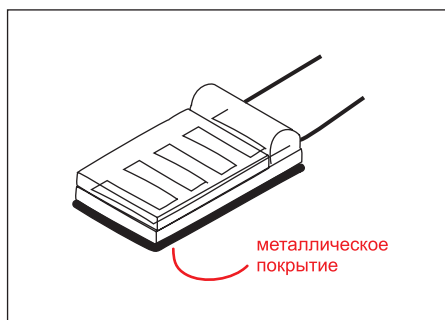
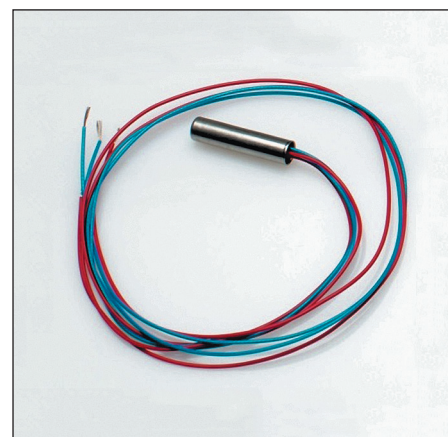


Рис. 8. Металлизированное термосопротивление

Рис. 10. Фото датчика RealProbe^{Temp}

Типовой элемент состоит из керамической пластины из оксида алюминия, на которую напыляется слой платины и наносится фоторезист. Затем пластина совмещается с маской, экспонируется и подвергается травлению. В результате на пластине формируется платиновая токопроводящая структура и контактные площадки. Металлический меандр покрывается пассивационным слоем из специального состава стекла, после чего к датчику привариваются выводы, а место их крепления дополнительно укрепляется (рис. 6).

Такую структуру имеет абсолютное большинство тонкопленочных термосопротивлений, это универсальная и недорогая конструкция. Кроме того, данные элементы, в отличие от намоточных датчиков, могут иметь:

- нестандартное номинальное сопротивление. Номинальное сопротивление определяется структурой меандра, которая может быть изменена с относительно небольшими затратами. По этой причине тонкопленочный датчик может быть выполнен с R0, «сдвинутым» относительно стандартных значений 100, 500 и 1000 Ом. Тонкопленочные элементы также могут быть изготовлены с повышенным номинальным сопротивлением — 2000, 5000 и даже 10 000 Ом.

- SMD-исполнение. Тонкопленочное сопротивление имеет форму пластины, поэтому может поставляться в корпусе для поверхностного монтажа (0603, 0805, 1206). Поскольку в этом случае отсутствует необходимость изготовления и крепления выводов, SMD-термосопротивления гораздо дешевле, чем выводные датчики с аналогичными характеристиками. Компания IST также производит датчики в корпусе Flip-Chip.
- миниатюрный размер. Еще одним уникальным свойством тонкопленочных датчиков является возможность изготовить миниатюрные выводные датчики — компания IST выпускает термосопротивления Pt100, Pt500 и Pt1000 размером всего 1,2×1,6 мм, а также датчики размером 0,8×3 мм, которые могут быть установлены в трубки и узкие корпуса диаметром от 1 мм (рис. 7).

Металлизированные термосопротивления

Отдельно следует рассмотреть датчики компании IST-AG, предназначенные для контакта с поверхностью измерений.

Благодаря небольшим размерам и плоской форме тонкопленочных термосопротивлений разработчики часто выбирают эти элементы для задач, где сенсор прикладывается или приклеивается к поверхности объекта измерений. Это довольно популярная практика, однако даже небольшой зазор между элементом и поверхностью способен значительно уменьшить время отклика и точность измерений температуры.

Данная проблема решается с помощью металлизированных датчиков — выводных термосопротивлений, пригодных для пайки к поверхности.

Структура металлизированного термосопротивления показана на рис. 8. Компания IST-AG изготавливает несколько десятков моделей металлизированных термосопротивлений с различными характеристиками.

В зависимости от задачи такие элементы припаиваются к корпусу измерительного устройства, к металлическим пластинам и дискам, а если есть возможность, то и сразу к поверхности объекта (рис. 9).

Помимо отдельных металлизированных чувствительных элементов, компания IST-AG выпускает термосопротивления, уже припаянные к трубкам, пластинкам и другим деталям.

Наиболее популярным модулем является датчик RealProbe^{Temp}, представляющий собой гильзу из нержавеющей стали длиной 25 мм, на дно которой припаяно термосопротивление (рис. 10).

Традиционно датчики в аналогичном корпусе конструируются иначе: чувствительный элемент помещается в центр гильзы, которая наполняется термопастой. По сравнению с традиционным решением, RealProbe^{Temp} позволяет не только значительно сократить время отклика, но и получить минимальную ошибку при погружении датчика в среду на небольшую глубину (рис. 11, 12).

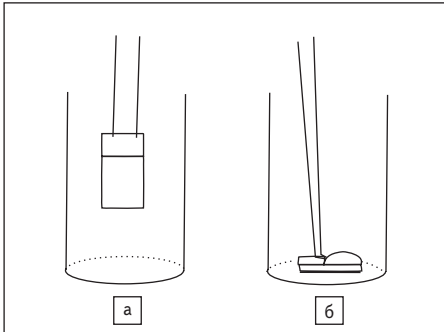


Рис. 11. Конструкции датчиков:
а) классическая; б) RealProbeTemp

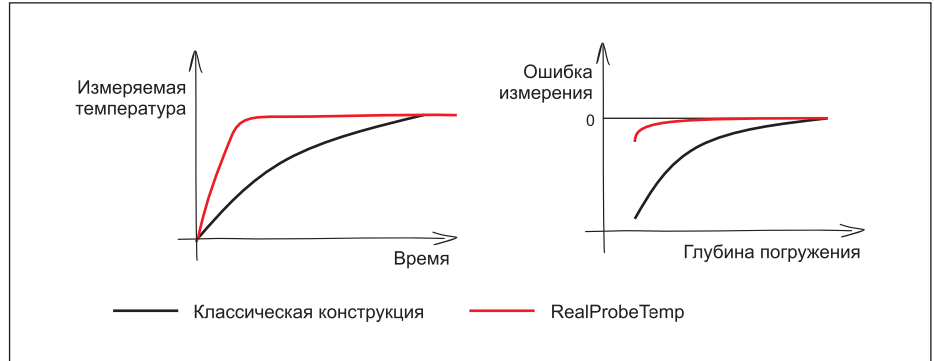


Рис. 12. Сравнение классического исполнения датчика и RealProbeTemp

Применение тонкопленочных термосопротивлений для измерения расхода

Металлизированные термосопротивления позволяют значительно повысить скорость отклика и точность при измерении температуры, однако их можно использовать и для других целей, например для измерения скорости потока.

На базе платиновых тонкопленочных термосопротивлений, в частности, изготавливаются термоанемометры. Это чувствительные элементы, состоящие из нагревателя и датчика температуры. Принцип действия термоанемометра основан на зависимости теплоотдачи погруженного в среду нагревателя от скорости движения среды: чем быстрее поток проходит «мимо» нагревателя, тем больше тепла нагреватель отдает среде.

Реализация термоанемометра от компании IST-AG состоит из двух металлизированных термосопротивлений разного номинала, припаянных к металлической трубочке (рис. 13).

Элемент Pt50 выполняет роль нагревателя, элемент Pt1000 — датчика температуры. Среда проходит через трубочку от датчика температуры к нагревателю. С ростом скорости потока температура нагревателя Pt50 падает, а вместе с ней уменьшается и сопротивление Pt50. В то же время датчик температуры Pt1000 продолжает измерять температуру среды и не меняет сопротивления с изменением скорости потока (рис. 14).

Термосопротивления включаются в мостовую схему. Измерительный мост сбалансирован в отсутствие потока, но с падением сопротивления элемента Pt50 появляется сигнал разбаланса, который подается на мост через обратную связь и используется в качестве выходного сигнала. Выходное напряжение является функцией скорости потока, пример зависимости приведен на рис. 15.

Описанный чувствительный элемент выпускается под маркетинговым названием Out Of Liquid, которому соответствует код для заказа P1K0/050.232.2K. C.050.M. U.S.

С помощью датчика Out Of Liquid можно измерять расход жидкости или газа в пре-

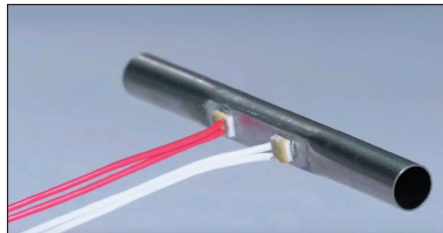


Рис. 13. Фото датчика Out Of Liquid

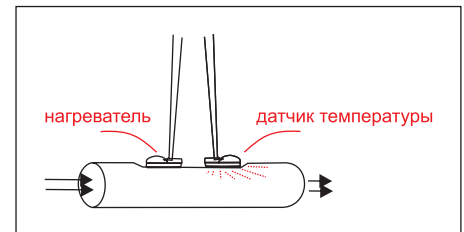


Рис. 14. Конструкция датчика Out Of Liquid

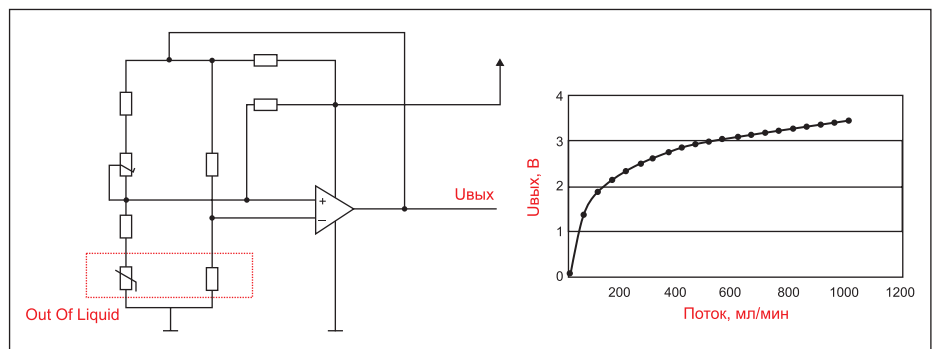


Рис. 15. Пример схемы включения датчика Out Of Liquid и пример выходной характеристики

делах 0–3000 мл/мин (≈ 4 м/с). Рабочий температурный диапазон датчика $-50 \dots +180$ °С, время отклика не превышает 300 мс.

Трубка Out Of Liquid выполнена из нержавеющей стали, ее длина составляет 40 мм, внешний диаметр 4 мм, внутренний диаметр 3,8 мм. Модуль либо врезается в основную трубу, либо отводится от нее как шунт в зависимости от конечной задачи.

Одно из главных преимуществ данного решения — полная изоляция чувствительных элементов и потока. Это делает возможным применение Out Of Liquid для измерения потока газов и жидкостей практически любого состава.

Для измерения скорости потока газов и некоторых жидкостей компания IST-AG выпускает и другие термоанемометрические и калориметрические чувствительные элементы. Такие датчики тоже состоят из термосопротивлений-нагревателей и термосопротивлений-термосенсоров, однако они располагаются не отдельно, а на единой керамической подложке. Датчики представляют собой

миниатюрную пластинку, которая погружается в измеряемую среду. Более подробная информация о тепловых датчиках скорости потока доступна в источниках [1, 2].

Заключение

Конечно, тонкопленочные технологии применяются не только при производстве термосопротивлений — их используют для изготовления других пассивных компонентов, батарей питания, а также в оптике и иных областях. Однако именно с появлением тонкопленочных термосопротивлений стало возможным создание новых эффективных решений для измерения температуры и скорости потока.

Литература

1. Материалы с сайта компании IST-AG. www.ist-ag.com
2. Материалы с сайта компании «ЭФО». www.efo-sensor.ru