

УДК 621.382.001.63

СЕНСОРЫ ТЕМПЕРАТУРЫ НА АНОДНОМ ОКСИДЕ АЛЮМИНИЯ

Н.И. МУХУРОВ

*Институт физики НАН Беларуси
пр. Независимости, 68, Минск, 220072, Беларусь*

Поступила в редакцию 10 августа 2012

Предлагаются варианты конструкций дилатометрических микрореле – сенсоров температуры на анодном оксиде алюминия. Для различных диапазонов температур и условий работы выбраны оптимальные конструкции.

Ключевые слова: дилатометрическое микрореле, сенсор температуры, рабочий диапазон.

Введение

Дилатометрические сенсоры осуществляют коммутацию внешних электрических цепей за счет изменения линейных размеров чувствительного элемента в зависимости от его температуры [1]. Дилатометрические датчики (преобразователи) температуры используют принцип различного линейного удлинения двух разнородных пластин, соединенных по всей длине. При нагреве, в связи с тем, что коэффициент линейного расширения одного из материалов больше такого же коэффициента другого материала, контакты при определенной температуре и жесткости пластин размыкаются. Порог срабатывания стандартных термореле задается регулируемым винтом путем изменения зазора. Пределы изменения порога и регулирования температуры составляют от 25 до 200 °С. Точность регулирования температуры ± 5 °С. Традиционные конструкции таких приборов и методы механической обработки его элементов имеют ряд общих недостатков, которые заключаются в больших массогабаритных показателях (размеры в десятки миллиметров и вес в сотни грамм), не только затрудняющих размещение сенсора в требуемой зоне или на нужном объекте, но и повышающих инерционность их реагирования.

В настоящее время ведутся интенсивные поиски путей миниатюризации дилатометрических сенсоров и повышения их эксплуатационных характеристик. Перспективными представляются как использование новых материалов и технологий, так и принципов построения, прежде всего с использованием принципов микросистемной техники.

Дилатометрические сенсоры на основе тонких подложек анодного оксида алюминия

Нами рассчитаны и промоделированы дилатометрические сенсоры на основе тонких подложек анодного оксида алюминия (АОА) с чувствительными элементами в виде микромеханизмов, получение которых может быть с прецизионной точностью обеспечено методами планарной микроэлектронной технологии и с токопроводящими элементами, формируемыми процессами вакуумного напыления [2]. При этом вся система с чувствительными и токопроводящими элементами, упругими и жесткими контактами выполняется на единой монолитной подложке, что исключает погрешности монтажа и снижает его трудоемкость.

Построение микроструктур дилатометрических сенсоров базируется на использовании уникальных упругих свойств, малого к.т.р. и высоких диэлектрических параметров АОА. Совпадение пределов упругости и прочности АОА повышает точность функционирования дилатометрического микрореле, так как исключает появление пластического деформирования, искажающего исходную форму перемычек. Это дает возможность формоизменения чувствительно-

го элемента в достаточно широком интервале температур, охватывающем отрицательные и положительные значения, не превышая предел упругих деформаций [3]. Микроструктуры миниатюрных dilatометрических сенсоров отличаются высокими точностью срабатывания и чувствительностью в широком интервале температур, малой тепловой и механической инерционностью. Они могут осуществлять коммутацию внешних электрических цепей за счет изменения линейных размеров выполненного с прецизионной субмикронной точностью чувствительного элемента в зависимости от его температуры. Проведенные предварительные расчеты и эксперименты показывают, что можно создать рациональные конструкции dilatометрических микросенсоров с точностью индикации температуры $0,5 - 2$ °С, рабочим диапазоном температур от -50 до $+500$ °С, коммутируемым током до 10 мА, габаритами не более $6 \times 10 \times 0,5$ мм³ (без корпуса), весом менее $8 \cdot 10^{-4}$ Н.

Основу dilatометрических микрореле составляет совокупность чувствительного элемента из металлического держателя с большим к.т.р. α_1 и преобразователя с меньшим к.т.р. α_2 (рис. 1, а). Преобразователь закреплен концами на держателе и содержит систему внутренних переключающих контактов и электропроводники с клеммами подключения к внешней электрической цепи [4, 5]. Преобразователь сформирован из единой плоской диэлектрической пластины, в центральной части которой выполнены фигурные окна, образующие между ними тонкие упругие V-образные переключки, величина биссектрисы тупого угла у которых h_0 при исходной (комнатной) температуре T_0 составляет:

$$h_0 = 0,707l \sqrt{\alpha_1 - \alpha_2} \left[1,05 \dots 1,2 T_{\max} - T_{\min} \right], \quad (1)$$

где l – длина переключки, T_{\min} , T_{\max} – минимальная и максимальная температуры теплового цикла реле, соответственно. Крайние части пластины выполнены сплошными площадками и закреплены на чувствительном элементе-держателе, также выполненном в виде плоской пластины с прямоугольным окном, расположенным напротив V-образных переключек. При этом контакты, проводники и клеммы сформированы на преобразователе из тонкопленочного проводящего покрытия.

Выполнение преобразователя из единой диэлектрической пластины, содержащей тонкие упругие миниатюрные V-образные переключки сечением $(0,05 \times 0,05) - (0,15 \times 0,15)$ мм² и длиной $3 - 6$ мм с соотношением величины биссектрисы тупого угла и длины по формуле (1), обеспечивающим максимальный коэффициент преобразования, и крепежные площадки, а также применение тонкопленочного проводящего покрытия на диэлектрике позволяют резко сократить размеры элементов до сотен микрометров. В таком dilatометрическом микрореле существенно снижены инерционность, повышены точность и чувствительность конструктивных элементов за счет миниатюризации, технологичности их изготовления и упрощения монтажно-сборочных операций. Плоская форма чувствительного элемента-держателя и преобразователя исключает изменение формы переключек при их сборке. Прямоугольное окно в чувствительном элементе-держателе позволяет избежать замыкания переключек через чувствительный элемент-держатель и повышает эффективность теплообмена. Миниатюризация реле, уменьшение массы электропроводящих элементов, выполнение преобразователя и чувствительного элемента-держателя плоскими, выполнение прямоугольного окна в пластине чувствительного элемента-держателя позволяют значительно снизить тепловую и механическую инерционность микрореле. Повышение точности конструктивных элементов и снижение тепловой и механической инерционности обеспечивают высокие точность срабатывания и чувствительность dilatометрического микрореле при достижении заданных температурных параметров как в статическом состоянии, так и в условиях значительных вибрационных и ударных нагрузок.

Схематические изображения конструктивных решений dilatометрических микрореле для различных условий эксплуатации представлены на рис. 1.

Для функционирования в различных диапазонах температур конструктивные варианты имеют виды, представленные на рис. 1, в, г: при температурах ниже исходной (комнатной) – рис. 1, в, в диапазоне температур выше и ниже исходной (комнатной) – рис. 1, г, при двух значениях температур, превышающих исходную (комнатную) – рис. 1, д. Взаимосвязь исходных размеров переключек, т. е. величины биссектрисы тупого угла у переключек h_0 и длины переключек l при исходной (комнатной) температуре T_0 , выражается соотношением (1).

Соотношение (1) обеспечивает работу V-образных перемычек в зоне максимального приближения к прямолинейной форме, т.е. при наибольшем коэффициенте преобразования, достигающем в момент замыкания 50 – 150-ти кратного значения, и в то же время создает запас по температуре на $0,05 - 0,20 T_{\max}$ на верхнем пределе рабочего диапазона температур, $0,05 - 0,20 T_{\min}$ на нижнем пределе рабочего диапазона температур, что исключает вероятность растяжения и разрушения перемычек в рабочем диапазоне температур. Ножевая форма контактных выступов предохраняет перемычки от разрушения в случае "ложного" срабатывания внешней системы управления.

Преобразователь может быть выполнен с перемычками дугообразной формы, тогда коэффициент в формуле (1) будет равен 0,612.

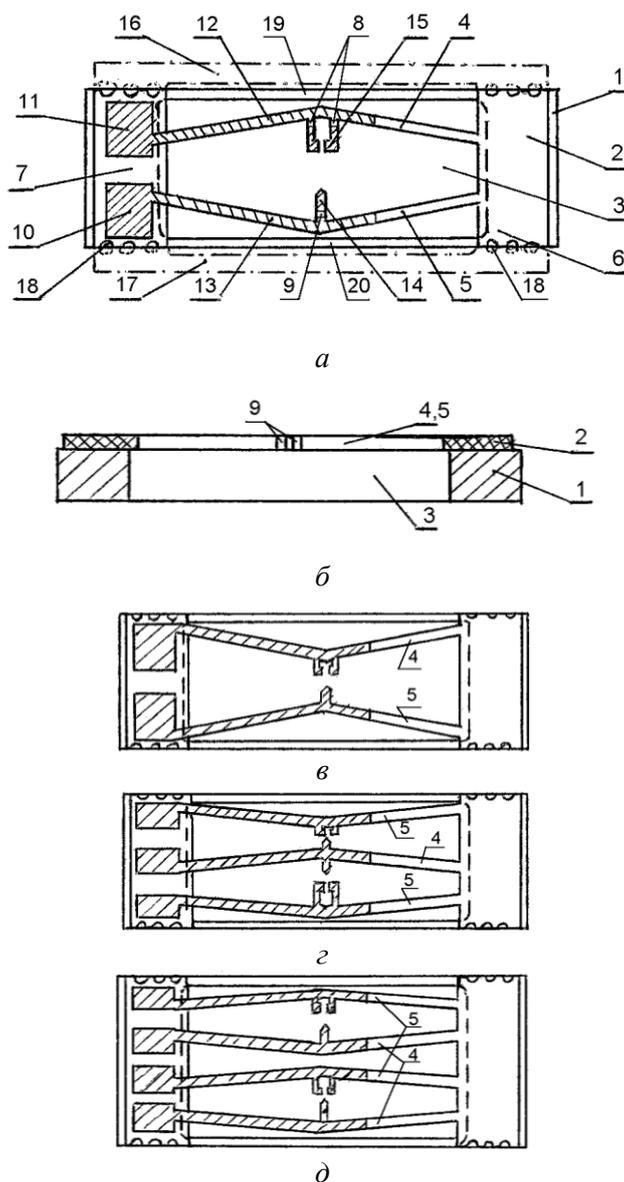


Рис. 1. Схематическое изображение различных конструктивных вариантов дилатометрических микрореле: а, в–д – вид сверху, б – поперечный разрез;

- 1 – чувствительный элемент-держатель; 2 – преобразователь; 3 – прямоугольное окно; 4,5 – перемычки;
 6,7 – крепежные площадки; 8,9 – ножевые контактные выступы; 10,11 – клеммы;
 12,13 – коммутирующие дорожки; 14,15 – переключающие контакты;
 16,17 – вспомогательные площадки; 18 – перфорационные отверстия; 19,20 – стойки

В дилатометрическом микрореле, предназначенном для работы в условиях повышенных (относительно исходной комнатной) температур, преобразователь выполнен с вершинами V-образных перемычек, направленными наружу (рис. 1, а, б), в условиях пониженных (относи-

тельно исходной комнатной) температур – направленными внутрь (рис. 1, в). При рабочем диапазоне, рассчитанном на положительные и отрицательные температуры, преобразователь содержит сочетания обеих форм перемычек (рис. 1, з). Дилатометрическое микрореле, предназначенное для реагирования на несколько температур одного знака, содержит соответствующее количество пар перемычек (рис. 1, д). Соотношение величины биссектрисы тупого угла у перемычек и длины перемычек в последнем случае определяется парой, рассчитанной на наибольшую величину температуры.

Микроструктуры дилатометрического микрореле выполняются следующими методами: чувствительный элемент-держатель – штамповкой из металлической ленты (например, из алюминия, имеющего большой к.т.р. $\alpha_1 \approx 24 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ и высокую теплопроводность), преобразователь – прецизионным локальным травлением анодного оксида алюминия к.т.р. $\alpha_2 \approx 6 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ с использованием фотолитографических процессов планарной микроэлектронной технологии, тонкопленочные токопроводящие элементы – вакуумным напылением через маски. Такая технология обеспечивает высокую точность формирования элементов, в особенности наиболее ответственной в дилатометрическом микрореле детали – преобразователя. Высокая точность выполнения размеров преобразователя (несколько микрометров) существенно сокращает инерционность дилатометрического микрореле. Габариты макетных образцов составили – $5 \times 1 \times 10$ мм³ при размерах перемычек от $0,05 \times 0,05 \times 3$ мм³ до $0,15 \times 0,15 \times 6$ мм³, сечения ножевых контактных выступов от $0,03 \times 0,05$ мм² до $0,10 \times 0,15$ мм². Длина выступов определяется из условия прочности и надежности замыкания цепи при заданной температуре. Поскольку перемычки таких малых размеров обладают низкой жесткостью, то для исключения искажения их формы при транспортировке преобразователь изготавливается с вспомогательными площадками. Сборка заключается в наложении и склейке термостойкими клеями чувствительного элемента-держателя и крепежных площадок преобразователя. Плоская форма деталей и вспомогательные площадки преобразователя позволяют избежать деформирования перемычек при сборке. После скрепления вспомогательные площадки преобразователя обламываются вдоль специально для этой цели предусмотренного ряда перфорационных отверстий.

Анодная окись алюминия, используемая для изготовления преобразователя, наряду с высокими диэлектрическими свойствами имеет достаточно высокие механические параметры: предел прочности практически равен пределу упругости и составляет 40 кг/мм², модуль упругости – $1 \cdot 10^4$ кг/мм², что обеспечивает хорошую упругость перемычек. Например, допустимый прогиб консольного микростержня из анодного оксида алюминия сечением $0,1 \times 0,1$ мм² и длиной 5 мм составляет $0,67$ мм. Это дает возможность формоизменения V-образных перемычек в достаточно широком интервале температур, охватывающем отрицательные и положительные значения от -50 до $+150$ °С, не превышая предел упругих деформаций. Согласно соотношению (1) допустимо превышение граничных пределов от 4 до 10 °С. Совпадение пределов упругости и прочности повышает точность функционирования дилатометрического микрореле, так как исключает появление пластического деформирования, искажающего исходную форму перемычек. Пластины анодной окиси алюминия могут быть получены толщиной от долей микрона до сотен микрон, по площади – до 150×150 мм². Последнее обеспечивает возможность в изготовлении преобразователя широко использовать методы планарной интегральной технологии.

Дилатометрические микрореле работают следующим образом. При повышении температуры чувствительный элемент-держатель, изготовленный из металла с большим к.т.р. (например, из алюминия, имеющего $\alpha_1 \approx 24 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹), увеличивается по длине и раздвигает закрепленные на нем крепежные площадки преобразователя, выполненного из материала с малым к.т.р. (например, анодного оксида алюминия, имеющего $\alpha_2 \approx 6 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹). Последние растягивают V-образные перемычки, что с большим коэффициентом преобразования трансформируется в уменьшение величины биссектрисы тупого угла V-образных перемычек и встречное движение ножевых контактных выступов с переключающими контактами. Величина h биссектрисы тупого угла V-образных перемычек в процессе нагрева составляет согласно (1):

$$h = 0,707l \sqrt{\alpha_1 - \alpha_2 [1,05 \dots 1,2 T_{\max} - T]}, \quad (2)$$

где T – текущая температура, изменяющаяся от $T_{\min} = T_0$ до T_{\max} .

Аналогичный процесс изменения h происходит при понижении температуры. В этом случае в формуле (2) $T_{\max}=T_0$, а T изменяется от T_{\min} до T_0 .

Равномерность температуры по длине, малая тепловая инерционность и высокая чувствительность при нагреве V-образных перемычек и стоек, расположенных по боковым сторонам прямоугольного окна, обеспечиваются их малым по площади сечением, высокой теплопроводностью алюминия, наличием прямоугольного окна, способствующего свободному конвективному теплообмену деталей микрореле, V-образной формой перемычек.

При достижении заданной максимальной от исходной температуры величина биссектрисы тупого угла V-образных перемычек составляет минимально допустимую величину:

$$h_{\min} = 0,707l\sqrt{\alpha_1 - \alpha_2} \quad 0,05 \dots 0,2 T_{\max}, \quad (3)$$

переключающие контакты замыкаются и срабатывает подключенная к dilatометрическому микрореле внешняя аппаратура, осуществляющая требуемый тепловой режим объекта. Наличие остаточной величины биссектрисы тупого угла V-образных перемычек h_{\min} исключает растяжение и возможное при этом разрушение перемычек.

Вариант макетного образца приведен на рис. 2. В подложке 1 из АОА сформированы V-образные перемычки 2 с ножевыми контактными выступами 3 посередине. Концы подложки закреплены на алюминиевой основе 4 с к.т.р., существенно отличным от АОА. На перемычках и концах пластины вакуумным напылением нанесены токопроводящие дорожки и контакты. При повышении температуры за счет разности к.т.р. алюминия и АОА перемычки выпрямляются и при определенной температуре замыкаются контакты. При охлаждении прогиб перемычек увеличивается, и замыкаются другие контакты.

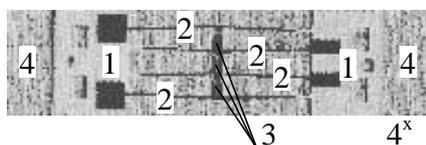


Рис. 2. Макетный образец dilatометрического микрореле с V-образными перемычками:
1 – подложка из АОА; 2 – V-образные перемычки; 3 – ножевые контактные выступы;
4 – алюминиевая пластина

Зависимость величины биссектрисы тупого угла у перемычек h_0 от рабочей температуры T_{\max} выражается соотношением (2), где $T = T_0$ – нормальная температура теплового цикла микрореле. Аналогичная формула справедлива и для отрицательных температур. Соотношение обеспечивает работу V-образных перемычек в зоне максимального приближения к прямолинейной форме, т.е. при наибольшем коэффициенте преобразования, достигающем в момент замыкания 50 – 150-ти кратного значения, и в то же время создает запас по температуре на 0,05 – 0,20 T_{\max} на верхнем пределе рабочего диапазона температур, 0,05 – 0,20 T_{\min} на нижнем пределе рабочего диапазона температур, что исключает вероятность растяжения и разрушения перемычек при предельных температурах.

Измеренные изменения размеров V-образных перемычек при нагреве для двух значений их длин ($l_1=5$ мм и $l_2=10$ мм) в макетных образцах показаны на рис. 3. Видно, что диапазон изменений обеспечивает достаточно высокую чувствительность dilatометрических микрореле к повышению температуры окружающей среды.

Основные элементы макетных образцов микроструктур dilatометрических микрореле характеризуются следующими размерами: V-образные перемычки – от $0,05 \times 0,05 \times 3,0$ мм³ до $0,15 \times 0,15 \times 6,0$ мм³, сечение ножевых контактных выступов от $0,03 \times 0,05$ мм² до $0,10 \times 0,15$ мм². Ножевая форма контактных выступов предохраняет перемычки от разрушения в случае "ложного" срабатывания внешней системы управления. Крайние части пластины выполнены сплошными площадками и закреплены на чувствительном элементе-держателе, также выполненном в виде плоской пластины с прямоугольным окном, расположенным напротив V-образных перемычек. При этом контакты, проводники и клеммы сформированы на преобразователе из тонкопленочного проводящего покрытия.

В силу своей простоты и высокой радиационной устойчивости материалов и конструкций исходных элементов данные микросенсоры могут работать в экстремальных условиях ок-

ружающей среды. Области применения – от бытовых электроприборов до космической аппаратуры в электрических схемах контроля и регулировки температуры; авиационная техника (в частности, устройства для отключения подогревателей летательных аппаратов при достижении заданной температуры рабочей среды в условиях воздействия широкого диапазона вибрационных нагрузок), системы автоматики для терморегулирования жидкостей и газовой среды, а также для точного измерения температуры во взаимодействии с индикаторными часами.

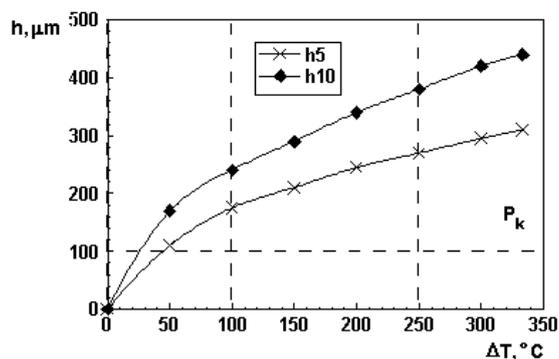


Рис. 3. Удлинение V-образных перемычек при нагреве для двух значений их длин ($h5$ для $l_1 = 5$ мм и $h10$ для $l_2 = 10$ мм).

Заключение

Проведен анализ функциональных характеристик чувствительных элементов ускорения и установлен диапазон чувствительности микродатчиков в зависимости от конструктивных параметров. Предложены варианты конструкций чувствительных элементов для емкостных датчиков ускорения в плоскопараллельном и объемном исполнениях.

SENSORS OF TEMPERATURE BASED ON ANODIC ALUMINA

N.I. MUKHUROV

Abstract

Variants of designs dilatometric microrelays – sensors of temperature based on anodic alumina are offered. For various ranges of temperatures and operating conditions optimum designs are chosen.

Список литературы

1. Агейкин Д.И., Костина Е.Н., Кузнецова Н.Н. Датчики контроля и регулирования. М., 1965.
2. Ефремов Г.И., Котова И.Ф., Мухуров Н.И. // Матер. X НТК «Датчик-98». Крым, Гурзуф, 23–30 мая 1998 г. С. 254–256.
3. Efremov G.I., Mukhurov N.I. // Proceedings 3d International Conference on Space Charge in Solid Dielectric CSC'3. France, 29 June–3 July 1998. P.503–506.
4. Патент РФ №4536. Дилатометрическое микрореле / Григоришин И.Л., Ефремов Г.И., Мухуров Н.И.
5. Патент РФ №4727. Дилатометрическое реле / Ефремов Г.И., Мухуров Н.И.