

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР МЕТАЛЛОПЛЕНОЧНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ И АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

П. Г. Михайлов¹, А. П. Михайлов², И. Н. Пасхин³, А. Р. Ахметов⁴, Е. Д. Фадеев⁵

^{1,3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

² ООО «Газпромнефть–Цифровые решения», Санкт-Петербург, Россия

⁴ ООО НПЦ «КИТ», Пенза, Россия

¹ pit_mix@mail.ru, ² krendeleshik@gmail.com, ³ lluha1.1000@mail.ru, ⁴ icmus@mail.ru, ⁵ mercenfry@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается разработка конструктивно-технологических методов обеспечения временной и параметрической стабильности пленок и пленочных структур, формируемых на металлопленочных датчиках физических величин. Актуальность изложенных материалов состоит в том, что именно от стабильности резистивных пленок и пленочных структур зависит в большей степени стабильность датчиков. Цель – разработка воспроизводимых конструкций и технологий, обеспечивающих формирование стабильных по времени сенсорных элементов и структур. *Материалы и методы.* Достаточно подробно описаны предлагаемые конструкции полипленочных тензорезистивных структур различной конфигурации. Рассмотрены и проанализированы математические модели многослойных пленочных структур, определены номиналы тензорезисторов и методы их минимизации температурных коэффициентов резистивных структур. *Результаты и выводы.* В результате проведенных исследований в области разработки методов регулирования и поддержания временной и параметрической стабильности характеристик датчиков определены конструкции полипленочных структур и методы их формирования. В частности, было достигнуто повышение точности и постоянства электрофизических характеристик чувствительных элементов и измерительных модулей на 30–40 % по сравнению с известными российскими датчиками.

Ключевые слова: стабильность, пленка, тензорезистор, датчик, давление, температура, чувствительный элемент

Для цитирования: Михайлов П. Г., Михайлов А. П., Пасхин И. Н., Ахметов А. Р., Фадеев Е. Д. Методы обеспечения стабильности пленочных структур металлопленочных датчиков для ракетно-космической и авиационной техники // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 46–57. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-6

METHODS FOR ENSURING THE STABILITY OF FILM STRUCTURES OF METAL-FILM SENSORS FOR ROCKET, SPACE AND AVIATION EQUIPMENT

P.G. Mikhaylov¹, A.P. Mikhaylov², I.N. Paskhin³, A.R. Akhmetov⁴, E.D. Fadeev⁵

^{1,3} Penza State University, Penza, Russia

² GazpromNeft–Digital Solutions LLC, St. Petersburg, Russia

⁴ NPTS KIT LLC, Penza, Russia

¹ pit_mix@mail.ru, ² krendeleshik@gmail.com, ³ lluha1.1000@mail.ru, ⁴ icmus@mail.ru, ⁵ mercenfry@gmail.com

Abstract. *Background.* The article is devoted to the development of constructive and technological methods for ensuring the temporal and parametric stability of films and film structures formed on metal–film sensors of physical quantities. The relevance of the presented materials lies in the fact that the stability of sensors depends to a greater extent on the stability of resistive films and film structures. The purpose of the article is to develop reproducible designs and technologies that ensure the formation of time-stable sensor elements and structures. *Materials and methods.* The article describes in sufficient detail the proposed designs of polyfilm strain-resistant structures of various configurations. Mathematical models of multilayer film structures are considered and analyzed, the nominal values of strain gages are determined, and methods for minimizing the temperature coefficients of resistive structures are determined. *Results and conclusions.* As a result of the research conducted in the field of developing methods for regulating and maintaining the temporal and parametric stability of sensor characteristics, the designs of polyfilm structures and methods of their

formation are determined. In particular, an increase in the accuracy and consistency of the electrophysical characteristics of the sensing elements and measuring modules was achieved by 30–40 % compared with well-known Russian sensors.

Keywords: stability, film, strain gauge, sensor, pressure, temperature, sensing element

For citation: Mikhaylov P.G., Mikhaylov A.P., Paskhin I.N., Akhmetov A.R., Fadeev E.D. Methods for ensuring the stability of film structures of metal-film sensors for rocket, space and aviation equipment. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4):46–57. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-6

Общие сведения о стабилизации тонкопленочных резистивных структур в микроэлектронных датчиках

Очень важное значение при изготовлении высокотемпературных металлопленочных датчиков имеет технология напыления тонких пленок из различных металлов и методы стабилизации их электрофизических характеристик (ЭФХ).

Разработанный и применяемый для высокотемпературных датчиков тензорезистивный сплав из группы керметов – П7.5ХС [1], содержащий в своем составе хром, кремний, железо, алюминий, а также добавки редкоземельных элементов и представляющий собой гранулы этого материала, имеет невысокую стабильность по известной и апробированной технологии его напыления. Поэтому целесообразным является создание тонкопленочных резистивных структур, в которых сочетаются свойства известных тензорезистивных материалов, например, сплава Х20Н75Ю и сплава рения с вольфрамом (ВР–27 ВП) или с молибденом (МР–47 ВП). Для этого необходимо исследовать ЭФХ тонкопленочных тензорезисторов (ТР) со структурой резистивного слоя из двух или больших пленок резистивных материалов (РМ):

- с двухслойной структурой;
- с многослойной структурой, содержащей резистивную пленку из взаимно чередующихся монослоев РМ [2];
- с многослойной структурой, содержащей резистивную пленку из взаимно чередующихся монослоев РМ и отдельным слоем из материала с положительным ТКС;
- со сложной композиционной многослойной структурой, содержащей пленку из взаимно чередующихся монослоев двух РМ и отдельных слоев из этих или иных материалов.

Так как сплавы с рением имеют высокую температуру плавления (до 3000 °С), то для получения тонких пленок из этих сплавов необходимо использовать высокоэнергетические методы распыления, такие как электронно-лучевое или магнетронное распыление. Для возможности напыления сплавов Х20Н75Ю и МР-47 ВП в одном вакуумном цикле была модернизирована под магнетронное напыление установка УВН 71-ПЗ, в которой были смонтированы два дополнительных магнетрона с мишенями – катодами из сплавов Х20Н75Ю и МР–47 ВП.

Технологические методы обеспечения стабильности тонкопленочных систем датчиков

Формирование диэлектрических, полупроводниковых и металлических пленок с различным сочетанием легирующих материалов позволяет методика использования магнетронного напыления из одиночных источников, расположенных в напылительной секции магнетрона. В магнетроне монтируются распыляемые материалы различного состава. В частности, пленки со сложным составом, предназначенные для высокостабильных тензорезисторов, состоят из твердых растворов никеля в хrome. Сложные однослойные пленки из указанных материалов сформированы при температуре подложки примерно 200 °С. Тензорезисторы были получены при магнетронном формировании пленки из отдельных источников. При этом основные электрофизические характеристики (ЭФХ) в одиночной пленке в значительной степени отличаются от аналогичных характеристик в многослойной пленке, так, ТКС составлял $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ [3, 4].

Регулирование ТКС тензорезисторов обеспечивалось исходя из ранее полученных экспериментальных данных, путем программирования и внесения поправок, включенных в процесс термической обработки и стабилизации. Это позволяет добиться минимизации ТКС и дальнейшего повышения стабильности тензорезисторных металлопленочных датчиков.

Двухслойные тонкопленочные структуры резистивных слоев МЭД

Двухслойная структура резистивного слоя (рис. 1) может формироваться с использованием следующих конструктивно-технологических вариантов: нижний слой – из композиции,

имеющей величину температурного коэффициента сопротивления со знаком минус, а верхний слой – из композиции, имеющей величину температурного коэффициента сопротивления со знаком плюс.

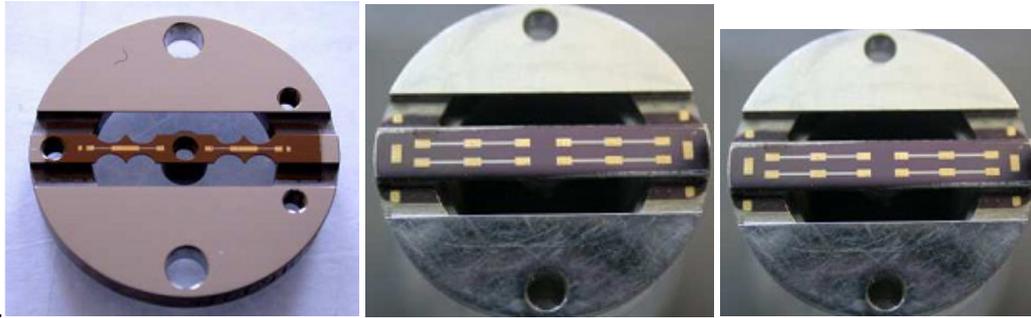


Рис. 1. Двухслойная структура тонкопленочных тензорезисторов

Сопротивление двухслойного резистора можно определить

$$R = \frac{\rho_{S1}\rho_{S2}}{\rho_{S1} + \rho_{S2}} N = \frac{n}{1+n} \rho_{S1} N, \quad (1)$$

где ρ_{S1} – поверхностное сопротивление нижнего слоя; ρ_{S2} – поверхностное сопротивление верхнего слоя; N – число квадратов резистивного слоя; $n = \frac{\rho_{S2}}{\rho_{S1}}$ – отношение поверхностных сопротивлений формируемых слоев.

Из возможных вариантов формирования двухслойной структуры наиболее рациональным является первый вариант, так как при формировании тонкопленочной структуры по второму варианту слой из материала с отрицательным ТКС необходимо обязательно защищать слоем диэлектрика, что в значительной степени усложняет технологию формирования ЧЭ.

Из выражения (1) величина поверхностного сопротивления R_S двухслойной структуры резистивного слоя определится выражением

$$R_S = \frac{n}{1+n} \rho_{S1} = \frac{d_1}{d_1 + d_2} \rho_{S1}, \quad (2)$$

где d_1 и d_2 – толщины первого и второго слоев ТР соответственно.

При воздействии температуры сопротивление тонкопленочного ТР с двухслойной структурой резистивного слоя можно представить

$$R(T) \approx \frac{n(1 + \alpha_1 \Delta T + \alpha_2 \Delta T)}{(1 + \alpha_1 \Delta T) + n(1 + \alpha_2 \Delta T)}, \quad (3)$$

где α_1 – ТКС нижележащей пленки многослойного покрытия; α_2 – ТКС верхележащей пленки многослойного покрытия; ΔT – диапазон исследуемых температур. После проведения простейших преобразований математическая модель ТКС (α_R) многоуровневого тензорезистора будет выглядеть

$$\alpha_R \approx \frac{n\alpha_1 + \alpha_2}{[(1 + \alpha_1 \Delta T) + n(1 + \alpha_2 \Delta T)]}. \quad (4)$$

Учитывая, что преобразованная многослойная пленочная композиция тензорезистивного слоя должна обладать значением ТКС (α_R), близкий к нулю, т.е. $\alpha_R \approx 0$, соотношение n из формулы (4):

$$n = \frac{\rho_{S2}}{\rho_{S1}} = \frac{d_1}{d_2} = \left| \frac{\alpha_2}{-\alpha_1} \right|. \quad (5)$$

Это соотношение позволяет определить и технологический маршрут формирования двух-слойной структуры:

– напыление нижнего слоя структуры из материала с отрицательным ТКС до достижения величины поверхностного сопротивления ρ_{S1} , рассчитываемого как $\rho_{S1} = R_s \frac{1+n}{n}$;

– напыление верхнего слоя структуры из материала с положительным ТКС до достижения требуемой величины поверхностного сопротивления ρ_s всей структуры, при этом величина поверхностного сопротивления верхнего слоя ρ_{S2} определяется выражением

$$\rho_{S2} = n\rho_{S1}.$$

Многослойные структуры резистивного слоя МЭД

Многослойная тонкопленочная структура резистивного слоя (рис. 2) состоит из взаимно чередующихся монослоев двух резистивных материалов с противоположными по знаку ТКС (второй основной вариант исполнения).

Такая структура может быть сформирована по двум дополнительным вариантам:

- с нижним монослоем из материала с отрицательным ТКС (первый дополнительный вариант);
- с нижним монослоем из материала с положительным ТКС (второй дополнительный вариант).

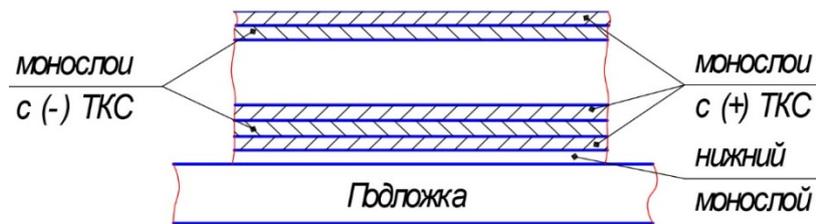


Рис. 2. Многослойная структура резистивного слоя с взаимно чередующимися монослоями из двух резистивных материалов

Общеизвестно, что проводимость металлической пленки проявляется на раннем этапе формирования вследствие туннельного эффекта, когда пленка состоит из отдельных разрозненных островков (участок 1, рис. 3).

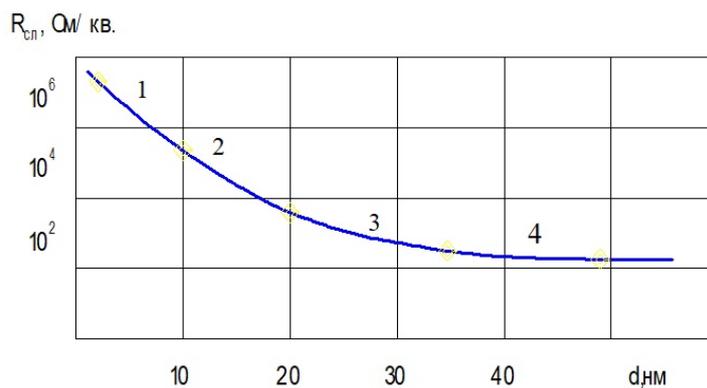


Рис. 3. Зависимость поверхностного сопротивления металлической пленки от толщины:
 1 – островковая структура; 2 – начало массового соприкосновения островков;
 3 – сетчатая структура; 4 – сплошная пленка

Таким образом, при формировании пленки последовательным напылением двух резистивных материалов из двух изолированных источников (мишеней) сопротивление элементарного резистора Δr можно представить выражением

$$\Delta r \approx \frac{\Delta\rho_{S1}\Delta\rho_{S2}}{\Delta\rho_{S1} + \Delta\rho_{S2}} N = \Delta\rho_{S1-2} N, \tag{6}$$

где $\Delta\rho_{S1}$, $\Delta\rho_{S2}$ – приращения поверхностных сопротивлений монослоев, которые формируются за каждый цикл напыления из материалов с отрицательным и положительным ТКС соответственно.

С увеличением используемых циклов напыления m толщина пленки увеличивается, т.е. $d = (\Delta d_1 + \Delta d_2)m$, а величина поверхностного сопротивления уменьшается до требуемого значения $R_{сл}$

$$R_{сл} = \frac{\Delta\rho_{S1}\Delta\rho_{S2}}{(\Delta\rho_{S1} + \Delta\rho_{S2})m}, \quad (7)$$

где $m = Mt$, M – скорость вращения карусели, об/мин; t – время напыления, мин.

Для учета изменения сопротивления монослоев от температуры ММ:

$$R(T) \approx \frac{(1 + \alpha_1\Delta T + \alpha_2\Delta T)n_1\Delta\rho_{S1}}{m[(1 + \alpha_1\Delta T) + n_1(1 + \alpha_2\Delta T)]} N, \quad (8)$$

где $n_1 = \frac{\Delta\rho_{S2}}{\Delta\rho_{S1}} = \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{\Delta d_1}{\Delta d_2}$ – соотношение приращений поверхностных сопротивлений наносимых монослоев.

ТКС (α_R) тонкопленочного ТР с многослойной структурой из взаимно чередующихся монослоев можно представить ММ:

$$\alpha_R \approx \frac{\alpha_2 + n_1\alpha_1}{(1 + \alpha_1\Delta T) + n_1(1 + \alpha_2\Delta T)}. \quad (9)$$

Следует отметить, в исследуемой структуре тензорезистивного слоя с чередующимися слоями из двух материалов с взаимнообратными по ТКС величинами получено, что для пленочного тензорезистора его итоговый ТКС не зависит от числа циклов формирования, а сама модель (9) идентична модели (4) для многослойной (двухслойной) модели пленочного тензорезистора, сформированного из двух пленок тензоматериалов.

Многоуровневая структура тензорезистора с отдельной пленкой из материала с положительным ТКС

В отличие от предыдущей структуры резистивного слоя, состоящего из взаимно чередующихся монослоев двух резистивных материалов, рассматриваемая структура содержит верхний слой из материала с положительным ТКС, который одновременно служит защитным слоем для нижележащих монослоев (рис. 4).

Рассматриваемая структура резистивного слоя тонкопленочного ТР может быть сформирована по двум дополнительным вариантам:

- с нижележащим слоем из сплава с ТКС < 0 (1-й дополнительный вариант);
- с верхним слоем из сплава с ТКС > 0 (2-й дополнительный вариант).

Сопротивление сформированной нижней пленки можно представить в виде следующей ММ:

- для первого дополнительного варианта

$$r_1 = \frac{1}{m_1} \Delta\rho_{S1} N = R_{S1} N; \quad (10)$$

- для второго дополнительного варианта

$$r_1 = \frac{1}{m'_1} \Delta\rho_{S2} N = R_{S2} N, \quad (11)$$

где m_1 , m'_1 – количество циклов напыления при формировании слоя из нижней пленки ($m_1 = Mt_1$; $m'_1 = Mt'_1$); M – скорость вращения карусели; t_1 , t'_1 – время напыления нижнего слоя по первому и второму вариантам.

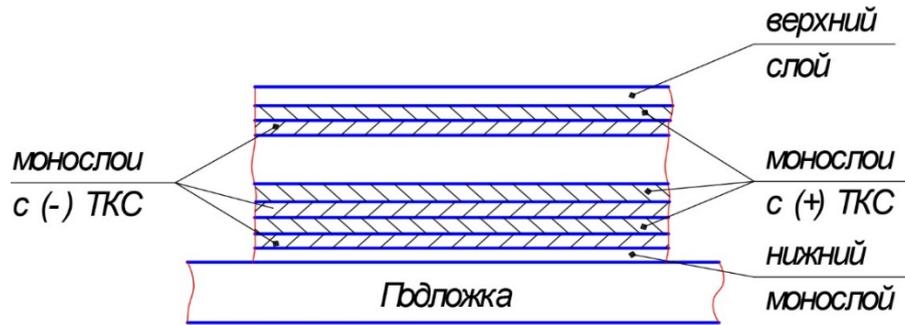


Рис. 4. Многослойная структура тонкопленочного ТР с взаимно чередующимися монослоями двух резистивных материалов и отдельным слоем из материала с положительным ТКС

Сопротивление последующего слоя из взаимно чередующихся монослоев двух резистивных материалов может быть представлено в виде ММ:

$$r_2 = \frac{1}{m_2} \frac{\Delta\rho_{s1}\Delta\rho_{s2}}{\Delta\rho_{s1} + \Delta\rho_{s2}} N = R_{s1-2} N, \quad (12)$$

где m_2 – количество циклов совместного напыления взаимно чередующихся монослоев резистивных материалов с противоположными по знаку ТКС; $m_2 = Mt_2$; t_2 – время совместного напыления монослоев.

Сопротивление последнего верхнего слоя из материала с положительным ТКС:

$$r_3 = \frac{1}{m_3} \Delta\rho_{s3} N = R_{s3} N, \quad (13)$$

где m_3 ($m_3 = Mt_3$) – число циклов формирования верхнего слоя тензорезистивных материалов с ТКС > 0 ; t_3 – время напыления при формировании последнего (верхнего) слоя тонкопленки с положительным ТКС.

Общее сопротивление тонкопленочного ТР с исследуемой структурой резистивного слоя можно определить из следующих аналитических ММ:

– для первого принятого варианта:

$$R_{об} = \frac{\Delta\rho_{s1}\Delta\rho_{s2}}{m_3\Delta\rho_{s1} + m_2(\Delta\rho_{s1} + \Delta\rho_{s2}) + m_1\Delta\rho_{s2}} N; \quad (14)$$

– для второго дополнительного варианта:

$$R'_{об} = \frac{\Delta\rho_{s1}\Delta\rho_{s2}}{m'_3\Delta\rho_{s1} + m'_2(\Delta\rho_{s1} + \Delta\rho_{s2}) + m'_1\Delta\rho_{s1}} N, \quad (15)$$

здесь m'_2 , m'_3 – количество циклов совместного напыления из взаимно чередующихся монослоев и циклов напыления только слоя из резистивного материала с положительным ТКС соответственно для второго дополнительного варианта.

Зависимость сопротивления многослойного тонкопленочного ТР с рассматриваемой структурой резистивного слоя от температуры T может быть представлена в виде следующих аналитических ММ:

– для первого дополнительного варианта:

$$R(T) \approx \frac{n_1\Delta\rho_{s1}(1 + \alpha_1\Delta T + \alpha_2\Delta T)}{(1 + \alpha_1\Delta T)(am_1 + m_2) + n_1(1 + \alpha_2\Delta T)(m_1 + m_2)} N; \quad (16)$$

– для второго дополнительного варианта:

$$R(T) \approx \frac{n_1\Delta\rho_{s1}(1 + \alpha_1\Delta T + \alpha_2\Delta T)}{(1 + \alpha_1\Delta T)[m'(1 + a_1) + m'_2] + m'_2n_1(1 + \alpha_2\Delta T)} N, \quad (17)$$

где a и a_1 – коэффициенты, характеризующие соотношение циклов напыления.

ТКС (α_R) тонкопленочного ТР со структурой резистивного слоя из взаимно чередующихся монослоев и отдельным слоем из материала с положительным ТКС:

– для первого дополнительного варианта

$$\alpha_R \approx \frac{m_{об} (a\alpha_2 + n_1\alpha_1) + m_2 (\alpha_2 + an_1\alpha_1)}{m_{об} [a(1 + \alpha_1\Delta T) + n_1(1 + \alpha_2\Delta T)] + m_2 [(1 + \alpha_1\Delta T) + an_1(1 + \alpha_2\Delta T)]} \quad (18)$$

или через время напыления

$$\alpha_R \approx \frac{t_1 (a\alpha_2 + n_1\alpha_1) + t_2 (\alpha_2 + an_1\alpha_1)}{t_1 [a(1 + \alpha_1\Delta T) + n_1(1 + \alpha_2\Delta T)] + t_2 [(1 + \alpha_1\Delta T) + n_1(1 + \alpha_2\Delta T)]}, \quad (19)$$

где $m_{об}$ – общее количество циклов напыления, необходимое для обеспечения требуемой величины поверхностного сопротивления резистивного слоя ρ_S :

$$m_{об} = m_1(1 + a) + m_2 = M [t_1(1 + a) + t_2].$$

Из анализа выражений (18) и (19) следует, что условием управления величиной ТКС является $|a\alpha_2| \approx |n_1\alpha_1|$ и $|\alpha_2| \approx |an_1\alpha_1|$;

– для второго дополнительного варианта:

$$\alpha'_R \approx \frac{m'_{об}\alpha_2 + m'_2 n_1\alpha_1}{m'_{об}(1 + \alpha_1\Delta T) + m'_2 n_1(1 + \alpha_2\Delta T)} \quad (20)$$

или через время напыления:

$$\alpha'_R \approx \frac{t'_1(1 + a_1)\alpha_2 + t'_2(\alpha_2 + n_1\alpha_1)}{t'_1(1 + a_1)(1 + \alpha_1\Delta T) + t'_2 [(1 + \alpha_1\Delta T) + n_1(1 + \alpha_2\Delta T)]}, \quad (21)$$

где $m_{об}$ – общее число циклов напыления, необходимое для получения штатной величины ρ_S :

$$m'_{об} = m'_1(1 + a) + m'_2 = M [t'_1(1 + a) + t'_2]; \quad (22)$$

– для первого дополнительного варианта:

$$m_2 = \left| \frac{m_{об}(a\alpha_2 + n_1\alpha_1)}{\alpha_2 + an_1\alpha_1} \right|; \quad (23)$$

– для второго дополнительного варианта:

$$m'_2 = \left| \frac{m'_{об}\alpha_2}{n_1\alpha_1} \right|. \quad (24)$$

Таким образом, для рассмотренных вариантов формирования резистивного слоя со структурой из взаимно чередующихся монослоев двух резистивных материалов с противоположными по знаку ТКС и отдельным слоем (верхним) из материала с положительным ТКС определяется следующий технологический маршрут формирования:

– методом магнетронного напыления и количеством циклов m_1 формируется нижний слой резистивной структуры из материала с отрицательным (или положительным) ТКС:

$$R_{S1} = \frac{1}{m_1} \Delta\rho_{S1}. \quad (25)$$

Расчетная величина поверхностного сопротивления этого слоя определяется из выражения

$$R_{S1} = \frac{R_S R_{S1-2} (1 + a)}{R_{S1-2} - R_S}, \quad (26)$$

где ρ_S – требуемая величина поверхностного сопротивления резистивного слоя;

– методом магнетронного напыления при вращающейся карусели одновременно с двух мишеней-катодов последовательно формируется слой резистивной структуры из взаимно чередующихся монослоев двух резистивных материалов при количестве циклов совместного напыления m_2 (или m'_2), которые рассчитываются по формуле (23) или (24):

$$R_{S1-2} = \frac{R_S R_{S1}}{R_{S1} - R_S (1+a)}; \quad (27)$$

– методом магнетронного напыления при вращающейся карусели в течение m_3 -циклов напыления ($m_3 = am_1$) формируется слой резистивной структуры из материала с положительным ТКС до достижения величины поверхностного сопротивления этого слоя $R_{S3} = R_{S1}/a$:

$$R_{S3} = \frac{R_S R_{S1} R_{S1-2}}{R_{S1} R_{S1-2} - R_S (R_{S1} + R_{S1-2})}. \quad (28)$$

Инструментальные методы повышения стабильности тонкопленочных датчиков

Несмотря на достаточно высокий технический уровень разработанной и серийно освоенной технологии изготовления интегральных ЧЭ тензорезисторных ДФВ неизбежной, к сожалению, проблемой остается обеспечение температурной и долговременной стабильности сопротивлений тонкопленочных ТР.

Основными причинами отказов и временной и параметрической нестабильности ЭФХ пленочных ТР являются дефекты в слоях тонкопленочных элементов датчиков. Указанные дефекты возникают как на исходных кремниевых пластинах, так и на пластинах, которые воспринимаются в процессе изготовления микромеханических элементов.

Кроме того, накопление дефектов происходит при процессах фотолитографии, при поглощении остаточных газов в объеме вакуумной камеры и т.д. [5, 6]. Современные процессы настройки тензорезисторов позволяют получить точность порядка 10 %. Для повышения точности тензорезисторы должны подвергаться настройке, например, с помощью удаления части резистивной пленки механически, испарением определенных участков резистивной пленки электронным или лазерным лучем [7].

Важнейшими технологиями для прецизионных тонкопленочных датчиков являются термические операции, которые целесообразно проводить в две стадии:

- термоциклическая обработка в вакууме;
- термообработка на воздухе.

Импульсная обработка позволяет:

- структурировать (стабилизацию) резистивный слой (отжигать скрытые дефекты в пленке;
- упорядочивать структуру пленки, образуя мостики проводимости между отдельными зернами, в том числе и в зонах расположения отжигаемых скрытых дефектов);
- осуществлять подгонку величины сопротивлений резисторов до требуемого номинального значения без изменения их геометрии;
- также отбраковывать потенциально ненадежные резисторы с «критичными» дефектами резистивного слоя.

При создании структуры контактной группы с проводящим слоем из золота произведена замена материала адгезионного слоя на ванадий, что позволило повысить стабильность и надежность контактного сопротивления, а также расширить диапазон рабочих температур до 350 °С без ухудшения качества проводящего слоя из золота (отсутствует деградация проводящего слоя) [7–9].

При формировании топологии интегральной тензосхемы, как на мембранном, так и на балочном УЭ, применен комбинированный метод изготовления:

- напыляется сплошным слоем резистивная пленка из тензорезистивного материала с требуемой ρ_S ;
- формируется фоторезистивная маска резистивного слоя, незащищенные фоторезистом участки резистивного слоя, травятся ионно-химическим методом (рис. 5).

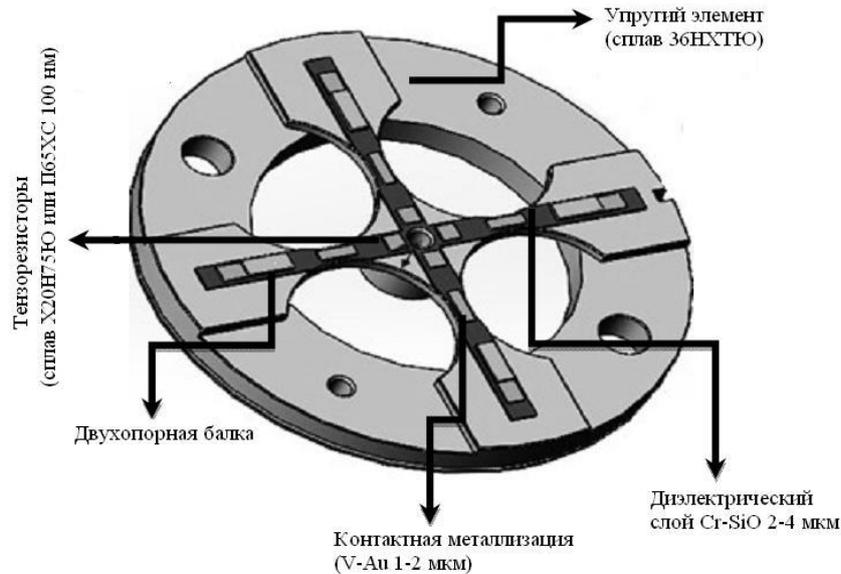


Рис. 5. Внешний вид балочного ЧЭ со сформированной на его поверхности гетерогенной пленочной системы

Технологические тренировки

На всех этапах ТП изготовления датчиков происходит накопление дефектов и несовершенств, влияние которых может привести к нестабильности и отказу датчика при испытаниях или в эксплуатации. Для повышения стабильности датчиков в процессе их изготовления предусмотрено проведение технологических тренировок (ТТ), призванных интенсифицировать деградационные процессы, особенно после завершения изготовления.

Разновидностями технологических тренировок, используемых при изготовлении МЭД, являются: термоцикловая, термотоковая и термодформационная тренировки. Кроме того, эффективны также электротоковые тренировки, термоотжиг и захлаживание.

Электротоковая тренировка в наибольшей степени используется в металлопленочных датчиках, для которых основным регулируемым параметром является температурный коэффициент сопротивления (ТКС) ТР [10]. ТКС в тонкопленочных резисторах связан с удельным сопротивлением таким образом, что их произведение есть величина постоянная (правило Матиссена). Доказано, что при пропускании постоянного тока через пленочный резистор происходит одновременное уменьшение его сопротивления и увеличение ТКС. При тренировке импульсами тока длительностью в несколько миллисекунд, наоборот, сопротивление увеличивается, а ТКС уменьшается. Опытным путем обнаружено, что стабильными являются резистивные пленки, имеющие положительный ТКС малой величины. Отрицательный ТКС в металлопленочных ТР характеризует, как правило, нарушения в ТП формирования пленки, а также присутствие загрязняющих элементов в ее материале. Кроме того, при напылении пленки рекомендуется использовать технологические операции, которые не нарушают исходную стехиометрию резистивного материала. Такими «щадящими» операциями являются магнетронное или электронно-лучевое напыление.

Необходимо отметить, что режимы технологических тренировок индивидуальны для конкретных типов ЧЭ и датчиков, оптимальные значения управляющих параметров определяются после длительных технологических отработок и экспериментов, а сами значения и порядок воздействия управляющих факторов являются, как правило, предметом «ноу-хау» или патентуются.

Фактически механизмы действия технологических тренировок на материал или структуры МЭД сводятся к возникновению временных обратных связей, стабилизирующих или дестабилизирующих объект (пленку, ТР, ЧЭ). основополагающими моментами при осуществляемых в процессе проведения тренировок энергетических воздействиях являются возникновение термодинамически устойчивых структур, а также уменьшение общей энергии, содержащейся в системе вследствие релаксации, образования устойчивых фаз, протекания экзотермических реакций и прочих эффектов [11–13].

Процесс термической стабилизации параметров сформированной тонкопленочной структуры

Термостабилизацию сформированной тензосхемы ЧЭ целесообразно проводить в две стадии:
– термоциклическая обработка в вакууме;
– термообработка на воздухе.

Многостадийная термообработка тензосхемы в вакууме $\sim 5,0 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. ($7,75 \cdot 10^{-3}$ Па) проводится контролируемым нагревом и охлаждением. Однако выбранные режимы термостабилизации не гарантируют достижения стабильности параметров ЧЭ при окончательной сборке датчика.

Завершается процесс изготовления ЧЭ контролем величины сопротивления изоляции ($R_{из}$) сформированной тензосхемы относительно корпуса УЭ.

Обсуждения

Проведенные исследования в области обеспечения временной и параметрической стабильности в части разработки новых конструктивно-технологических решений, которые позволяют улучшить электрофизические характеристики элементов датчиков, а также повысить технологичность изготовления [14–18].

Список литературы

1. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам / под ред. П. П. Мальцева. М. : Техносфера, 2005. 592 с.
2. Цыбизов П. Н. Чувствительные элементы для микроэлектронных датчиков давления информационно-измерительных систем : автореф. ... дис. к-та техн. наук. Пенза : ПГУ, 2007. URL: <https://www.dissercat.com/content/chuvstvitelnye-elementy-dlya-mikroelektronnykh-datchikov-davleniya-informatsionno-izmeritel'n>
3. Соколов Л. В. Основы исследования и разработки в области сенсорных МЭМС-устройств // Датчики и системы. 1999. № 3. С. 13–17.
4. Варадан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение. М. : Техносфера, 2004. 528 с.
5. Михайлов П. Г., Омаров А. Д., Султангазинов С. К. Применение высокотемпературных датчиков физических величин на основе широкозонных полупроводников // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 2–4. С. 471–474.
6. NEXUS Market Analysis for MEMS and Microsystems III, 2005–2009. URL: <http://www.nexus-mems.com> (дата обращения: 05.05.2018).
7. Achard J., Tallaire A. [et al.]. Evaluation of freestanding boron-doped diamond grown by chemical vapour deposition as substrates for vertical power electronic devices // Applied Physics Letters. 2012. Vol. 100. P. 122109.
8. Модификация и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными потоками / под ред. Дж. Поути. М. : Машиностроение, 1985.
9. Хмельницкий Р. А., Талипов Н. Х., Чучева Г. В. Синтетический алмаз для электроники и оптики. М. : Изд-во ИКАР, 2015. 228 с.
10. Микроэлектронные датчики давления и устройства. Разработка и производство // Сайт фирмы ПП МИДА. URL: <http://midaus.com/rus/transmitters.htm> (дата обращения: 20.07. 2024).
11. Поликристаллические полупроводники. Физические свойства и применение / под ред. Г. Харбеке. М. : Мир, 1989.
12. Mikhailov P. G., Slesarev Yu. N., Chulkov V. A. Mathematical Modeling of Combined Sensor Information – Measuring Systems // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 11, № 20. P. 10332–10335
13. Михайлов П. Г., Сергеев Д. А., Соколов А. В. Управление свойствами функциональных материалов высокотемпературных датчиков // Инновационные технологии в машиностроительном комплексе : сб. тр. МНПК. Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. С. 292–294.
14. Михайлов П. Г., Мокров Е. А., Скотников В. В. [и др.] Вопросы создания высокотемпературных датчиков механических величин. Материалы. Конструкции. Технологии // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2013. № 4. С. 61–70.
15. Джексон, Р. Новейшие датчики. М. : Техносфера, 2005. 384 с.
16. Михайлов П. Г., Ожигенов К. А., Аналиева А. У. Узлы и компоненты микроэлектронных датчиков // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2015. № 3. С. 184–193.
17. Михайлов П. Г., Михайлов А. П., Фадеев Е. Д. Разработка физико-математических моделей чувствительных элементов преобразователей физических величин систем управления // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2019. № 1. С. 22–26.

18. Михайлов П. Г., Лапшин В. И. Моделирование и конструирование кремниевых чувствительных элементов емкостных датчиков давлений // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013. № 5. С. 128–133.

References

1. Mal'tsev P.P. (ed.). *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. Ot issledovaniy k razrabotkam = Nano- and microsystem engineering. From research to development*. Moscow: Tekhnosfera, 2005:592. (In Russ.)
2. Tsybizov P.N. Sensitive elements for microelectronic pressure sensors of information and measuring systems: PhD abstract. Penza: PGU, 2007. (In Russ.). Available at: <https://www.dissercat.com/content/chuvstvitelnye-elementy-dlya-mikroelektronnykh-datchikov-davleniya-informatsionno-izmeriteln>
3. Sokolov L.V. Fundamentals of research and development in the field of sensor MEMS devices. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 1999;(3):13–17. (In Russ.)
4. Varadan V., Vinoy K., Dzhozhe K. *VCh MEMS i ikh primeneniye = HF MEMS and their application*. Moscow: Tekhnosfera, 2004:528. (In Russ.)
5. Mikhaylov P.G., Omarov A.D., Sultangazinov S.K. Application of high-temperature sensors of physical quantities based on wide-band semiconductors. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2017;(2–4):471–474. (In Russ.)
6. *NEXUS Market Analysis for MEMS and Microsystems III, 2005–2009*. Available at: <http://www.nexus-mems.com> (accessed 05.05.2018).
7. Achard J., Tallaire A. et al. Evaluation of freestanding boron-doped diamond grown by chemical vapour deposition as substrates for vertical power electronic devices. *Applied Physics Letters*. 2012;100:122109.
8. Pouti Dzh. (ed.). *Modifikatsiya i legirovaniye poverkhnosti lazernymi, ionnymi i elektronnyimi potokami = Modification and alloying of the surface by laser, ion and electron flows*. Moscow: Mashinostroeniye, 1985. (In Russ.)
9. Khmel'nitskiy R.A., Talipov N.Kh., Chucheva G.V. *Sinteticheskiy almaz dlya elektroniki i optiki = Synthetic diamond for electronics and optics*. Moscow: Izd-vo IKAR, 2015:228. (In Russ.)
10. Microelectronic pressure sensors and devices. Development and production. *Sayt firmy PG MIDA = Website of PG MIDA company*. (In Russ.). Available at: <http://midaus.com/rus/transmitters.htm> (accessed 20.07.2024).
11. Kharbeke G. (ed.). *Polikristallicheskie poluprovodniki. Fizicheskie svoystva i primeneniye = Polycrystalline semiconductors. Physical properties and applications*. Moscow: Mir, 1989. (In Russ.)
12. Mikhailov P.G., Slesarev Yu.N., Chulkov V.A. Mathematical Modeling of Combined Sensor Information – Measuring Systems. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017;11(20):10332–10335.
13. Mikhaylov P.G., Sergeev D.A., Sokolov A.V. Control of the properties of functional materials of high-temperature sensors. *Innovatsionnyye tekhnologii v mashinostroyitel'nom komplekse: sb. tr. MNPК = Innovative technologies in the machine-building complex : proceedings of the international scientific and practical conference*. Penza: Izd-vo PGU, 2012:292–294. (In Russ.)
14. Mikhaylov P.G., Mokrov E.A., Skotnikov V.V. et al. Issues of creating high-temperature sensors of mechanical quantities. Materials. Constructions. Technologies. *Izmereniye. Monitoring. Upravleniye. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2013;(4):61–70. (In Russ.)
15. Dzhekson R. *Noveyshie datchiki = The latest sensors*. Moscow: Tekhnosfera, 2005:384. (In Russ.)
16. Mikhaylov P.G., Ozhikenov K.A., Analieva A.U. Nodes and components of microelectronic sensors. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of the Southern Federal University. Technical sciences*. 2015;(3):184–193. (In Russ.)
17. Mikhaylov P.G., Mikhaylov A.P., Fadeev E.D. Development of physico-mathematical models of sensitive elements of converters of physical quantities of control systems. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus = XXI century: results of the past and problems of the present plus*. 2019;(1):22–26. (In Russ.)
18. Mikhaylov P.G., Lapshin V.I. Modeling and construction of silicon sensing elements of capacitive pressure sensors. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of the Southern Federal University. Technical sciences*. 2013;(5):128–133. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Петр Григорьевич Михайлов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационно-измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: pit_mix@mail.ru

Petr G. Mikhaylov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of information
and measurement technology and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алексей Петрович Михайлов

начальник группы,
ООО «Газпромнефть–Цифровые решения»
(Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Киевская, 5, корп. 4)
E-mail: krendeleshik@gmail.com

Aleksey P. Mikhaylov

Head of group,
GazpromNefit–Digital Solutions LLC
(building 4, 5 Kievskaya street, St. Petersburg, Russia)

Илья Николаевич Пасхин

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: Iluha1.1000@mail.ru

Илья N. Paskhin

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Андрей Равильевич Ахметов

заместитель генерального директора,
ООО НПЦ «КИТ»
(Россия, г. Пенза, ул. Кустодиева, 23)
E-mail: icmus@mail.ru

Andrey R. Akhmetov

Deputy general director,
NPTS KIT LLC
(23 Kustodieva street, Penza, Russia)

Евгений Дмитриевич Фадеев

независимый исследователь
(Россия, г. Москва)
E-mail: mercenary.exe@gmail.com

Evgeny D. Fadeev

Independent researcher
(Moscow, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 11.07.2024

Поступила после рецензирования/Revised 06.08.2024

Принята к публикации/Accepted 05.09.2024