

Вакуумное напыление многослойных тонкопленочных резистивных структур с температурной самокомпенсацией для сверхпрецизионных чип-резисторов

В. Д. Зуев¹, А. А. Рыжов¹, С. А. Гурин¹✉, А. Э. Шепелева¹,
М. Д. Новичков¹, П. А. Гурин²

¹ АО «НИИ электронно-механических приборов», Пенза, Россия

² Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
✉ teslananoel@rambler.ru

Аннотация. Представлены основные режимы получения и стабилизации многослойных тонкопленочных резистивных структур с температурной самокомпенсацией, позволяющей достичь значений температурного коэффициента сопротивления (ТКС) не более $\pm 2 \cdot 10^{-6}$ и нестабильностью сопротивления не более $\pm(0.01-0.02)\%$. В качестве резистивных пленок на основе нихрома был выбран сплав X20H75Ю, а также керметы К-20С и К-30С. Резистивный слой представляет собой двухслойную структуру, его получают в едином технологическом цикле в вакууме из двух высокостабильных материалов с положительным и отрицательным ТКС. Результаты исследований электрофизических характеристик прецизионных тонкопленочных резисторов из сплава X20H75Ю и керметов К-20С и К-30С подтверждают возможность комбинирования резистивных пленок из указанных материалов. Выбирая соотношения толщин слоев с положительным и отрицательным ТКС в двухслойной тонкопленочной структуре, можно добиться ТКС, близкого к нулевому значению. Технология исключила операцию термостабилизации в вакууме на фотолитографии при травлении контактных площадок после напыления пленок. Для исследования температурных характеристик резистора на основе полученной многослойной тонкопленочной структуры был разварен тонкой проволокой в чип-корпус.

Ключевые слова: технология тонкопленочной микроэлектроники, тонкопленочный резистор, температурный коэффициент сопротивления, нестабильность сопротивления

Для цитирования: Вакуумное напыление многослойных тонкопленочных резистивных структур с температурной самокомпенсацией для сверхпрецизионных чип-резисторов / В. Д. Зуев, А. А. Рыжов, С. А. Гурин, А. Э. Шепелева, М. Д. Новичков, П. А. Гурин // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 1. С. 5–13. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-1-5-13.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Vacuum Deposition of Multilayer Thin-Film Resistive Structures with Temperature Self-Compensation for Ultra-Precision Chip-Resistors

V. D. Zuev¹, A. A. Ryzhov¹, S. A. Gurin¹✉, A. E. Shepeleva¹,
M. D. Novichkov¹, P. A. Gurin²

¹ JSC «Research Institute of Electronic and Mechanical Devices», Penza, Russia

² Penza State University, Penza, Russia
✉ teslananoel@rambler.ru

Abstract. The main modes of obtaining and stabilizing multilayer thin-film resistive structures with temperature self-compensation, which allows to achieve a TCS value no more than $\pm 2 \cdot 10^{-6}$ and a resistance instability of no more than $\pm(0.01...0.02)\%$, are presented. The alloy X20H75YU, as well as K-20C and K-30C kermets, were

chosen as nichrome-based resistive films. The resistive layer is a two-layer structure, which is obtained in a single technological cycle in a vacuum from two highly stable materials with positive and negative TCS. The studies results of the electrophysical characteristics of TPR made of alloy X20H75YU and K-20C and K-30C kermets confirm the possibility of combining resistive films from these materials, choosing the ratio of layer thicknesses with positive and negative TCS in a two-layer thin-film structure, it is possible to achieve TCS close to zero. The technology has eliminated the operation of thermal stabilization in vacuum on photolithography when etching contact pads after spraying films. To study the temperature characteristics, a resistor based on the obtained multilayer thin-film structure was welded with a thin wire into a chip housing.

Keywords: thin-film microelectronics technology, thin-film resistor, temperature coefficient of resistance, instability of resistance

For citation: Vacuum Deposition of Multilayer Thin-Film Resistive Structures with Temperature Self-Compensation for Ultra-Precision Chip-Resistors / V. D. Zuev, A. A. Ryzhov, S. A. Gurin, A. E. Shepeleva, M. D. Novichkov, P. A. Gurin // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 1. P. 5–13. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-1-5-13.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Повышенный рост требований потребителя к информационно-измерительным и управляющим системам (ИИС), проявляющийся в уменьшении массогабаритных размеров, мощности потребления, повышении точности при ужесточении требований к внешним дестабилизирующим факторам воздействия, например температуры, модернизации конструктива и технологии в изготовлении тонкопленочных резисторов актуален и в настоящее время. Погрешности, возникающие при воздействии температуры, составляют не менее 60 % от всех встречающихся при эксплуатации [1], [2]. Температура также служит причиной деградации в структуре тонких пленок [3]. Технология тонких пленок для изготовления резисторов нашла широкое применение для жестких условий эксплуатации [4], что обусловлено высокой линейностью их выходных характеристик, а также простотой конструкторских решений.

Цель статьи заключается в разработке технологических решений для создания в вакууме многослойных тонкопленочных прецизионных чип-резисторов с возможностью температурной самокомпенсации сопротивления значений температурного коэффициента сопротивления (ТКС) не более $\pm 2 \cdot 10^{-6}$ и допускаемого отклонения и нестабильности сопротивления не более $\pm(0.01-0.02)$ %.

Теоретическая часть и технология получения. Прецизионные тонкопленочные резисторы (ТПР) и схемы на их основе предназначены для использования в электронной аппаратуре в качестве образцовых преобразователей тока и напряжения [5].

Экспериментальные исследования существующих резистивных материалов для изготовления ТПР, работоспособных в широком диапазоне

температур ($-60...150$) °С, и анализ литературы показал, что наилучшие результаты по временной и температурной стабильности дают металлосилицидные резистивные материалы и материалы на основе нихрома [6]. Согласно теоретическим исследованиям, электрическая проводимость металлосилицидных ТПР (керметов типа К-20С и К-30С) обусловлена наличием двух составляющих – металлической и полупроводниковой (термоактивационной):

$$\sigma(t) = \sigma_{\infty} \exp\left(\frac{t_M}{t}\right) + \sigma_0(1 + \alpha t)^{-1},$$

где $T_M = E_M/K$ – характеристическая температура; E_M – максимальное значение энергии активации; K – постоянная Больцмана $1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; σ_{∞} – термоактивационная проводимость; σ_0 – металлическая проводимость; t – температура; α – ТКС металлической фазы.

Анализ приведенного соотношения дает основания полагать, что возможно получение ТКС, близкого к нулю. Однако, учитывая неуправляемость процесса вакуумного напыления и большое количество режимов формирования резистивной пленки, не удастся сформировать технологические критерии управляемого синтеза тонких пленок, ТКС которых был бы близким к нулю в рабочем диапазоне температур в результате уравнивания металлической (положительной) и термоактивационной (отрицательной) составляющих.

В действительности для стабильного ТКС резисторов на основе К-20С и К-30С и линейной характеристики изменения сопротивления от температуры напыление керметных пленок К-20С и К-30С должно длиться до 5 мин с уровнем вакуума до $4 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

В качестве резистивных пленок на основе хрома зарекомендовал себя сплав X20H75Ю. Формирование высокостабильных тонкопленочных резисторов из этого сплава, легированного алюминием, осуществляется термическим испарением с вольфрамового испарителя [7], [8]. Однако фракционирование X20H75Ю по тугоплавкости его компонентов создает трудности получения таких резисторов. В процессе напыления алюминий из навески испаряется в первую очередь (справедливо для больших токов), осаждаясь на заслонку, или легко растворяется в приповерхностном слое вольфрамового испарителя до полного испарения хрома и никеля.

Результаты исследований электрофизических характеристик ТПР из сплава X20H75Ю и керметов К-20С и К-30С демонстрируют факт возможного комбинирования резистивными пленками из указанных материалов, содержащих слои с противоположными по знаку ТКС, так как «свежеосажденные» пленки на основе керметов имеют отрицательный ТКС, а «свежеосажденные» пленки из сплава X20H75Ю с соблюдением подобранных режимов имеют положительный ТКС. Выбирая соотношения толщин слоев с положительным и отрицательным ТКС в двухслойной тонкопленочной структуре, можно добиться ТКС, близкий к нулевому значению.

Резистивным слоем выступает структура из двух слоев, полученная в едином технологическом цикле в вакууме из двух материалов с положительным и отрицательным ТКС, являющихся высокостабильными материалами. При изготовлении таким методом и контролем поверхностного сопротивления по образцу-свидетелю сопротивление такого ТПР определяется по следующей формуле:

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

где ρ_{S1} и ρ_{S2} – поверхностные сопротивления положительного и отрицательного слоев соответственно; N – число квадратов резистивного слоя; $n = \rho_{S2}/\rho_{S1}$.

Следующая формула определяет R двухслойного тонкопленочного резистора при воздействии температуры:

$$R(t) = \frac{n(1 + \alpha_1 \Delta t + \alpha_2 \Delta t)}{(1 + \alpha_1 \Delta t) + n(1 + \alpha_2 \Delta t)},$$

где α_1 и α_2 – ТКС первого и второго слоев тонких пленок соответственно; Δt – изменение температуры.

Величина ТКС (α_R) определена формулой [9]

$$\alpha_R = \frac{n\alpha_1 + \alpha_2}{[(1 + \alpha_1 \Delta t) + n(1 + \alpha_2 \Delta t)]}.$$

Соотношение поверхностных сопротивлений тонкопленочных слоев в зависимости от температуры ($R(t) = R_0(1 + \alpha_R \Delta t)$), где R_0 – сопротивление при нормальных климатических условиях, учитывая, что ТКС такой структуры из двух слоев (рис. 1) $\alpha_R \sim 0$:

$$n = \frac{\rho_{S2}}{\rho_{S1}} = \frac{d_1}{d_2} = \left| \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \right| = \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{d_1}{d_2},$$

где α_1 , α_2 – ТКС X20H75Ю первого и К20-С, К-30С, К-50С второго слоев; d_1 , d_2 – толщины слоев из X20H75Ю и из К20-С, К-30С, К-50С; ρ_1 , ρ_2 – удельные поверхностные сопротивления первого и второго слоев.

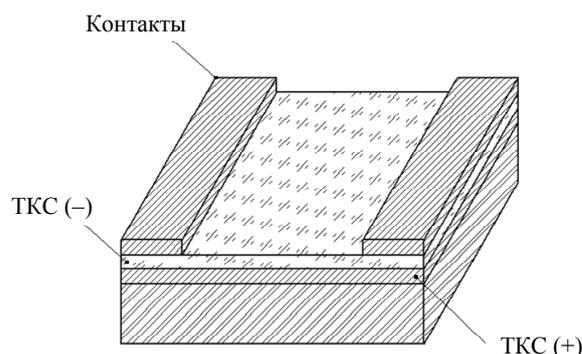


Рис. 1. Структура многослойного ТПР
Fig. 1. Structure of the multilayer TPR

Имея данные о фактических значениях ТКС (α_1 и α_2) резистивных слоев из конкретных резистивных материалов, определяется n , при котором ТКС двухслойного ТПР будет иметь значение, близкое к нулевому. Если ТКС обоих слоев равны по модулю и если равны удельные поверхностные сопротивления этой двухслойной структуры, то компенсация ТКС будет успешна. Однако толщины слоев будут отличаться за счет того, что пленки на основе X20H75Ю и керметов К-20С и К-30С обладают разными электрофизическими характеристиками.

Методика эксперимента. На начальном этапе разработки технологии предварительно рассчитали требуемое сопротивление двухслойного ТПР.

Рассмотрим пример расчета параметров получения резистора с сопротивлением 100 Ом и

технологии его изготовления. Общее сопротивление двухслойного ТПР из выражения для параллельного соединения резисторов [8]

$$R = \frac{R_H R_B}{R_H + R_B},$$

где R_H – сопротивление нижнего слоя; R_B – сопротивление верхнего слоя.

Топология такого ТПР имеет полосковую форму, при этом длина больше ширины в 2 раза. Чтобы получить $R = 100$ Ом, сопротивление квадрата должно быть порядка 50 Ом/кв. Образец-свидетель для контроля удельного поверхностного сопротивления пленки – диэлектрическая полоска из ситалла с напыленными контактами из алюминия Al. Длина между контактами – 12 квадратов. Тогда для того, чтобы получить заданное сопротивление квадрата, сопротивление образца-свидетеля после напыления верхнего слоя из керметов К-20С, К-30С и К-50С должно быть порядка 600 Ом. Сопротивление нижнего слоя по показаниям образца-свидетеля должно составлять 1200 Ом/кв. Значение сопротивления для верхнего слоя

$$50 = 100 \frac{X}{100 + X},$$

где 50 – общее сопротивление одного квадрата двухслойной структуры; 100 – сопротивление одного квадрата нижнего слоя из сплава никеля Ni и хрома Cr; X – искомое сопротивление верхнего слоя из керметов К-20С, К-30С и К-50С.

В результате алгебраических преобразований: $X = 100$.

Значения удельного поверхностного сопротивления для обоих слоев определяются условием компенсации ТКС согласно математическому выражению требуемого «номинала» и исходя из экспериментальных данных.

Были запущены 2 партии по 3 подложки. В качестве диэлектрической пластины использовался ситалл СТ50-1. В целях обеспечения необходимой адгезии перед напылением подложки обезжирили в смеси из хрома и паров изопропилового спирта. Далее осуществлялся отжиг в муфельной печи на протяжении 3 ч.

Первый (нижний) слой, имеющий после напыления положительный ТКС, формировали посредством метода термовакуумного напыления навесок из Х20Н80 – сплава никеля Ni и хрома Cr.

Разряжение в камере перед напылением составляло порядка $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст., ток на испарителе регулировали в пределах от 300 до 400 А, добиваясь равномерного кипения сплава и отсутствия брызг испаряемого материала. Распыление на заставку перед ее открытием проводили в течение 65...75 с. Сопротивление на образце-свидетеле после завершения составило 1.174 кОм.

При этом недостатком пленки из нихрома служит ее чувствительность к влаге, приводящая к вытравливанию резистивных дорожек, обусловленному электрохимической коррозией. На рис. 2 представлено растворение резистивного слоя за счет электролитической коррозии в области положительного контакта с образованием электроизолирующих продуктов.

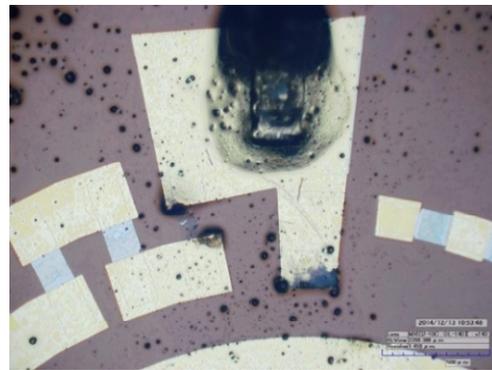


Рис. 2. Последствия воздействия влаги и загрязнений на поверхности схемы
Fig. 2. Effects of moisture and contamination on the surface of the circuit

Для решения этой проблемы пленки из нихрома пассивируют. Такие защитные покрытия выполняют из стекла (свинцово-боросиликатной стеклянной пленки), SiO , SiO_2 , Si_3N_4 , полимеров. Именно поэтому ТПР из Х20Н75Ю наносили нижним слоем.

Второй (верхний) слой, имеющий после напыления отрицательный знак ТКС, формировали посредством метода «взрывного» испарения в вакууме с ленточного вольфрамового испарителя керметов К-20С, К-30С и К-50С (резистивный сплав РС-4800/стекло С44-1 в виде диспергированного порошка). Разряжение в камере перед напылением составляло порядка $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст., ток на испарителе регулировали в пределах от 400 до 550 А. Напыление заканчивали при достижении сопротивления на образце-свидетеле в пределах 0.63...0.67 кОм. Следует отметить, что термостабилизация в вакууме непосредственно после напыления пленок не осуществляется. Это необ-

ходимо для невозможности диффузии материалов контактных площадок в «тело» резистора и его «подтрава» на этапе фотолитографии при травлении материала контактных площадок.

Режимы напыления опытных образцов ТПР указаны в табл. 1.

Табл. 1. Режимы напыления нижнего слоя X20H75Ю и верхнего слоя К-20С многослойного ТПР

Tab. 1. Spraying modes of the lower layer of X20H75U and the upper layer of K-20C multilayer TPR

Слой	Ток испарителя $I_{\text{исп}}$, А	Начальное остаточное давление в камере $P_{\text{ост. нач}}$ мм рт. ст.	Конечное остаточное давление в камере $P_{\text{ост. кон}}$ мм рт. ст.
X20H75Ю	280...350	$2 \cdot 10^{-5}$	$3.5 \cdot 10^{-5}$
К-20С	480...500	$2 \cdot 10^{-5}$	$3.5 \cdot 10^{-5}$

Средние значения ТКС тонкопленочной структуры из никеля и хрома по данным, полученным при эксперименте находятся в пределах от $(5...50) \cdot 10^{-6}$ 1/°С. Средние значения ТКС тонкопленочной структуры на основе керметов находятся в пределах от $-(15...80) \cdot 10^{-6}$ 1/°С.

Полученные средние значения ТКС говорят о том, что верхний и нижний слой не будут равны друг другу по модулю. Было решено получать пленки с равными удельными поверхностными сопротивлениями в связи с тем, что длительное воздействие высоких температур в ходе стабилизации, подгонки и старения в любом случае приведет к смещению ТКС в положительную сторону и у X20H75Ю, и у керметов К-20С, К-30С и К-50С. Это дает возможным получение ТКС двухслойного ТПР до проведения всех операций по подгонке и старению порядка $-(30...15) \cdot 10^{-6}$.

Затем получали рисунок тонкопленочного резистора и формировали схему методами фотолитографии. По окончании на выборке измеряли R полученных ТПР, необходимое для определения ТКС на каждой подложке в трех точках по диагонали. Измеряли в двух условиях: при нормальных 20 и при 150 °С. Результаты приведены в табл. 2.

Испытания полученных образцов. Для исследования температурных характеристик резистор на основе полученной многослойной тонкопленочной структуры был разварен тонкой проволокой в чип-корпус (рис. 3) и помещен в установку типа «ДИНАР». Установка для измерения представлена на рис. 4.

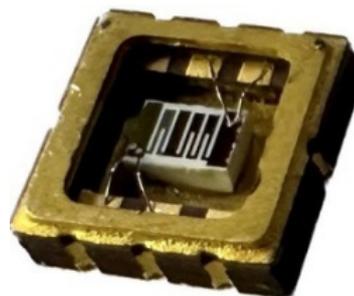


Рис. 3. Чип-резистор
Fig. 3. Chip-resistor



Рис. 4. Установка типа «ДИНАР»
Fig. 4. DINAR type installation

Табл. 2. Значения сопротивления и ТКС ТПР до операций по стабилизации выходных параметров
Tab. 2. Values of resistance and TCS TPR before operations to stabilize output parameters

R при нормальных условиях, Ом	R при 150 °С, Ом	ТКС, ppm
103.764	103.588	-16.9
112.386	112.179	-18.4
105.620	105.508	-10.6
104.451	104.328	-11.7
107.389	107.199	-17.7
100.462	100.272	-18.9
103.771	103.489	-27.1
105.288	105.074	-10.2
110.454	110.273	-16.3
111.049	110.822	-20.4
107.433	107.278	-14.4
100.527	100.328	-19.8
99.897	99.765	-13.2
101.338	101.104	-23.1
106.733	106.521	-19.7
104.288	104.089	-19.1
102.554	102.388	-16.1

Из табл. 2 следует, что рассчитанные значения R и ТКС до термостабилизации, подгонки и старения верны. Предварительные значения ТКС тонкопленочных резисторов лежат в диапазоне – $(30...15) \cdot 10^{-6}$.

Необходимо отметить, что режимы термотренировки ТПР из Х20Н75Ю и К-20С имеют различный характер. Так, рассматривая ТПР на основе К-20С с требуемыми характеристиками, необходимо отметить, что требуется длительный отжиг на воздухе на протяжении, например, 1 сут., далее – операции «старения» резисторов посредством воздействия электронагрузки и температуры 150...200 °С до 10 сут.

Термостабилизирующие режимы ТПР из Х20Н75Ю осуществляются посредством термоциклической обработки в вакууме, а далее – на воздухе.

После выдержки в вакуумной камере и дальнейшей – в термощафе ТПР следуют на электро-тренировку и импульсно-токовую тренировку. Выбранные механизмы термостабилизации определяются рекристаллизацией микроструктуры тонкой пленки, а также ее окисления.

Помимо различных режимов термостабилизации готовых ТПР на основе Х20Н75Ю и К-20С, сложность в оптимизации технологии стабилизации представляла сама предложенная многослойная структура. Для ТПР на основе композиции «Х20Н75Ю – К-20С» характерны дополнительные процессы деградации на границе раздела и другие особенности атомарной структуры пленки, связанные с технологией синтеза. С целью разработки необходимых режимов стабилизации и достижения заданной температурно-временной стабильности, осуществили испытания ТПР из Х20Н75Ю.

В целях стабилизации выходных параметров, полученных ТПР, была проведена операция термоциклирования в вакууме до 350...450 °С (2 цикла). Термический отжиг осуществлялся в воздухе при 220...360 °С и длился 4...12 ч. Для того, чтобы получить необходимые «номиналы» ТПР, а также с целью возможности осуществления последующей лазерной подгонки, провели высокотемпературную подгонку сопротивлений в воздухе при высоких температурах 380...550 °С. Окончанием технологического процесса стала операция старения на протяжении не менее 24 ч в воздухе при 140...260 °С.

После всех операций по стабилизации параметров рассчитали ТКС резисторов:

$$\alpha_R = \frac{R_t - R_0}{\Delta t R_0},$$

где R_t – сопротивление ТПР при 150 °С; R_0 – сопротивление ТПР при 0 °С; Δt – разность температур.

Показания после лазерной подгонки по секциям в диапазоне рабочих температур 0...150 °С лежат в пределах $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ 1/°С.

Значения параметров тонкопленочных резисторов после проведенных операций представлены в табл. 3.

Табл. 3. Значения сопротивления и ТКС ТПР после операций по стабилизации выходных параметров
Tab. 3. Values of resistance and TCS TPR after operations to stabilize output parameters

R при нормальных условиях, Ом	R при 150 °С, Ом	ТКС, ppm
92.789	92.777	-1.3
93.077	93.076	-0.1
93.489	93.471	-1.9
92.457	92.445	-1.3
92.963	92.959	-0.35
95.367	95.345	-2.3
95.359	95.351	-0.84
95.260	95.250	-1.05
95.035	95.022	-1.4
98.421	98.418	-0.3
98.071	98.059	-1.2
97.786	97.772	-1.4
93.168	93.164	-0.43
93.121	93.107	-1.5
93.112	93.111	-0.1
90.197	90.189	-0.9
92.627	92.620	-0.8

Так, R тонкопленочных резисторов находится в пределах 15 % от необходимых 100 Ом. При этом их ТКС не хуже ± 1.5 .

Заключение. Согласно полученным результатам проведенной работы, способ изготовления тонкопленочного резистора, отличающийся тем, что резистивный слой получают в виде двухслойной структуры (Х20Н75Ю и К-20С) в едином технологическом цикле в вакууме из двух высокостабильных материалов с положительным и отрицательным ТКС, позволяет реализовать возможность самокомпенсации ТКС. Разработана технология, позволяющая исключить диффузию материалов контактных площадок в «тело» тонкопленочного многослойного резистора и последующего его «подтравка» посредством устранения термостабилизации в вакууме на этапе фотолитографии при травлении материала контактных площадок после напыления пленок. После операций термостабилизации, подгонки и «старения» происходит «уход» сопротивлений резисторов в

сторону уменьшения для возможности лазерной подгонки и компенсация ТКС, приближающая его к нулю. ТКС полученных образцов ТПР не пре-

вышают величины $\pm 1 \cdot 10^{-6}$. Допускаемое отклонение и нестабильность сопротивления лежат в диапазоне не более $\pm(0.01 \dots 0.02) \%$.

Список литературы

1. Лучинин В. В., Мальцев П. П. Нанотехнологии в новом технологическом укладе // Нано- и микросистемная техника. 2021. Т. 23, № 1. С. 3–5.
2. Асташенкова О. Н., Корляков А. В. Контроль физико-механических параметров тонких пленок // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 2. С. 24–29.
3. Миллер Ю. Г. Физические основы надежности интегральных схем. М.: Сов. радио, 1976. 318 с.
4. SiC в качестве изоляционного слоя чувствительного элемента тензометрического датчика давления для особо жестких условий эксплуатации / Р. М. Печерская, И. В. Волохов, С. А. Гурин, Ф. А. Абдуллин // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 12. С. 767–772.
5. Гурин С. А. Исследование и разработка тонкопленочных гетерогенных структур чувствительных элементов датчиков давлений с экстремальными условиями эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб., 2016. 156 с.
6. Волохов И. В. Технологические методики повышения стабильности параметров тонкопленочных тензорезисторных датчиков давления: дис. ... канд. техн. наук. ПГУ, Пенза, 2008. 137 с.
7. Влияние переходных процессов в тонкопленочной гетерогенной структуре на надежность чувствительных элементов тензорезисторных датчиков давления / И. А. Аверин, И. В. Волохов, Е. А. Мокров, Р. М. Печерская // Изв. вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2008. № 2. С. 123–127.
8. Зеленцов Ю. А., Зеленцов В. Ю. Об эффективности пассивных схем термокомпенсации дрейфа начального разбаланса тензомостов // Датчики и системы. 2007. № 2. С. 10–13.
9. Лугин А. Н. Конструкторско-технологические основы проектирования тонкопленочных прецизионных резисторов. Пенза: ИИЦ ПГУ, 2008. 287 с.

Информация об авторах

Зуев Вячеслав Дмитриевич – канд. техн. наук, ген. директор АО «НИИ электронно-механических приборов», ул. Каракозова, д. 44, Пенза, 440600, Россия.

E-mail: vdzuev@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0005-5656-4918>

Рыжов Александр Алексеевич – канд. техн. наук, зам. ген. директора АО «НИИ электронно-механических приборов», ул. Каракозова, д. 44, Пенза, 440600, Россия.

E-mail: pgufr@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0006-3140-5897>

Гурин Сергей Александрович – канд. техн. наук, начальник лаборатории НПК-1, АО «НИИ электронно-механических приборов», ул. Каракозова, д. 44, Пенза, 440600, Россия.

E-mail: teslananoel@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9602-7221>

Шепелева Анастасия Эдуардовна – инженер-технолог НПК-1, АО «НИИ электронно-механических приборов», ул. Каракозова, д. 44, Пенза, 440600, Россия.

E-mail: anastasiya.shepeleva.01@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8600-084X>

Новичков Максим Дмитриевич – инженер-технолог НПК-1, АО «НИИ электронно-механических приборов», ул. Каракозова, д. 44, Пенза, 440600, Россия.

E-mail: novichkov1998maks@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9319-2475>

Гурин Павел Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование машиностроения» Политехнического института Пензенского государственного университета, ул. Красная, д. 40, Пенза, 440026, Россия.

E-mail: sbgurin_pavel@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6045-5432>

Вклад авторов:

Зуев В. Д. – общее руководство.

Рыжов А. А. – общее руководство.

Гурин С. А. – концептуальное решение.

Шепелева А. Э. – экспериментальные исследования.

Новичков М. Д. – выводы.

Гурин П. А. – заключение.

References

1. Luchinin V. V., Mal'cev P. P. Nanotehnologii v novom tehnologicheskom uklade // Nano- i mikrosistemnaja tehnika. 2021. T. 23, № 1. S. 3–5. (In Russ.).

2. Astashenkova O. N., Korljakov A. V. Kontrol' fiziko-mehaničeskikh parametrov tonkih plenok // Nano- i mikrosistemnaja tehnika. 2013. № 2. S. 24–29. (In Russ.).

3. Miller Ju. G. Fizicheskie osnovy nadezhnosti integral'nyh shem. M.: Sov. radio, 1976. 318 s. (In Russ.).

4. SiC v kachestve izoljacionnogo sloja chuvstvitel'nogo jelementa tenzometricheskogo datchika davlenija dlja osobo zhestkih uslovij jekspluatacii / R. M. Pecherskaja, I. V. Volohov, S. A. Gurin, F. A. Abdullin // Nano- i mikrosistemnaja tehnika. 2016. T. 18, № 12. S. 767–772. (In Russ.).

5. Gurin S. A. Issledovanie i razrabotka tonkoplnochnyh geterogennyh struktur chuvstvitel'nyh jelementov datchikov davlenij s jekstremal'nymi uslovijami jekspluatacii: dis. ... kand. tehn. nauk. SPbGJeTU (LJeTI), SPb., 2016. 156 s. (In Russ.).

6. Volohov I. V. Tehnologičeskie metodiki povyshe-nija stabil'nosti parametrov tonkoplnochnyh tenzorezistornyh datchikov davlenija: dis. ... kand. tehn. nauk. PGU, Penza, 2008. 137 s. (In Russ.).

7. Vlijanie perehodnyh processov v tonkoplnochnoj geterogennoj strukture na nadezhnost' chuvstvitel'nyh jelementov tenzorezistornyh datchikov davlenija / I. A. Averin, I. V. Volohov, E. A. Mokrov, R. M. Pecherskaja // Izv. vuzov. Povolzhskij region. Tehničeskie nauki. 2008. № 2. S. 123–127. (In Russ.).

8. Zelencov Ju. A., Zelencov V. Ju. Ob jeffektivnosti passivnyh shem termokompensacii drejfa nachal'nogo razbalansa tenzomostov // Datchiki i sistemy. 2007. № 2. S. 10–13. (In Russ.).

9. Lugin A. N. Konstruktorsko-tehnologičeskie osnovy proektirovanija tonkoplnochnyh precizionnyh rezistorov. Penza: IIC PGU, 2008. 287 s. (In Russ.).

Information about the authors

Vyacheslav D. Zuev – Cand. Sci. (Eng.), General Manager of JSC Scientific Research Institute of Electronic and Mechanical Devices, Karakozova St., 44, Penza, 440600, Russia.

E-mail: vdzuev@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0005-5656-4918>

Alexander A. Ryzhov – Cand. Sci. (Eng.), Deputy General Director of JSC Scientific Research Institute of Electronic and Mechanical Devices, Karakozova St., 44, Penza, 440600, Russia.

E-mail: pgufr@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0006-3140-5897>

Sergey A. Gurin – Cand. Sci. (Eng.), Head of the laboratory of NPK-1, JSC Scientific Research Institute of Electronic and Mechanical Devices, Karakozova St., 44, Penza, 440600, Russia.

E-mail: teslananoel@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9602-7221>

Anastasia E. Shepeleva – Process engineer of NPK-1, JSC Scientific Research Institute of Electronic and Mechanical Devices, Karakozova St., 44, Penza, 440600, Russia.

E-mail: anastasiya.shepeleva.01@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8600-084X>

Maxim D. Novichkov – Process engineer of NPK-1, JSC Scientific Research Institute of Electronic and Mechanical Devices, Karakozova St., 44, Penza, 440600, Russia.

E-mail: novichkov1998maks@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9319-2475>

Pavel A. Gurin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of «Technologies and Equipment of Mechanical Engineering» of the Polytechnic Institute of Penza State University, Krasnaya St., 40, Penza, 440026, Russia.

E-mail: sbgurin_pavel@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6045-5432>

Author contribution statement:

Zuev V. D. – general management.

Ryzhov A. A. – general management.

Gurin S. A. – conceptual research.

Shepeleva A. E. – experimental research.

Novichkov M. D. – findings.

Gurin P. A. – conclusion.

Статья поступила в редакцию 17.07.2024; принята к публикации после рецензирования 12.11.2024; опубликована онлайн 27.01.2025.

Submitted 17.07.2024; accepted 12.11.2024; published online 27.01.2025.
