

УДК 621.382

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЕ ТЕМПЕРАТУРНУЮ САМОКОМПЕНСАЦИЮ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЧИП-РЕЗИСТОРОВ

© 2025 г. Е. А. Печерская^{а, *}, С. А. Гурин^а, С. В. Коновалов^{а, b}, А. Э. Шепелева^а,
М. Д. Новичков^а

^аПензенский государственный университет, Пенза, 400026 Россия

^bСибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, 654007 Россия

*e-mail: pea1@list.ru

Поступила в редакцию 12.01.2025 г.

После доработки 17.02.2025 г.

Принята к публикации 17.02.2025 г.

Работа направлена на решение задачи повышения точности тонкопленочных резисторов. Основной причиной возникновения данной проблемы является неконтролируемое изменение сопротивления резисторов с течением времени и при воздействии температуры, что затрудняет достижение лучшей стабильности сопротивления. Для решения предложено применение компенсационных слоев с различными по знаку температурными коэффициентами сопротивления. Разработано конструкторско-технологическое решение для сверхпрецизионных многослойных и комбинированных тонкопленочных резистивных структур с температурной самокомпенсацией из металлосилицидных сплавов и сплавов на основе нихрома, а также из кермета К-30С и никеля соответственно. Выбор комбинирующих пленок из сплава Х20Н75Ю и керметов К-30С обусловлен подбором соотношения толщин слоев. Разработаны структура и топология комбинированного и многослойного тонкопленочных резисторов. Разработан технологический процесс изготовления тонкопленочных чип-резисторов, отработаны режимы напыления и получения топологии посредством фотолитографии с последующей температурной стабилизацией. Проведены функциональные испытания опытной партии образцов, для которой дополнительно разработана технологическая оснастка. Разработанная технология позволяет достичь температурного коэффициента сопротивления $\pm 5 \times 10^{-7} - 1/^\circ\text{C}^{-1}$ в диапазоне рабочих температур от -60 до $+125^\circ\text{C}$. Научная новизна работы заключается в возможности комбинирования тонких пленок Х20Н75Ю/К-30С для многослойных и К-30С/Ni для комбинированных резистивных структур в предложенном исполнении с целью достижения температурной компенсации и улучшения показателей стабильности.

Ключевые слова: температурная компенсация, тонкопленочные резисторы, температурный коэффициент сопротивления, сопротивление, многослойные и комбинированные резистивные структуры, сверхпрецизионные резисторы.

DOI: 10.7868/S3034573125090138

ВВЕДЕНИЕ

Радиоэлектронная аппаратура постоянно совершенствуется, что происходит благодаря как минимум модернизации распространенных компонентов, в том числе резисторов [1, 2]. Одним из параметров, который влияет на точность резистора и требует улучшения, является неконтролируемое изменение сопротивления при воздействии температуры и с течением времени [2].

Повышение точности можно обеспечивать совместным использованием большого количества тонкопленочных слоев, позволяющих компенсировать друг друга при различных температурных коэффициентах сопротивления.

Благодаря этому становится возможным добиться лучшей температурной стабильности тонкопленочных резисторов, а также временной, что обусловлено отличными направлениями кривых старения материалов [3].

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ

Комбинирование резистивных пленок из сплава X20H75Ю (тонкопленочный резистор с положительным температурным коэффициентом сопротивления) и керметов К-30С (тонкопленочный резистор с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления) возможно при условии правильного подбора соотношения толщин слоев с положительным и отрицательным температурными коэффициентами сопротивления в двухслойной тонкопленочной структуре, что позволяет получить самокомпенсацию температурной зависимости сопротивления такого резистора, структура которого представлена на рис. 1.

Были рассчитаны сопротивления тонких пленок для резистора номиналом 10 кОм, которые составили $R_1 = 44$ кОм для нижнего слоя и $R_2 = 13$ кОм для верхнего слоя. Исходя из полученных значений разработана топология чип-резистора (рис. 2). При открытии части нижнего функционального слоя посредством фотолитографии появляется возможность точной подгонки лазером как сопротивления, так и температурного коэффициента сопротивления [4].

Структура тонкопленочного резистора представлена диэлектрической подложкой 1, токопроводящим слоем 2, резистивными пленками с отрицательным 3 и положительным 4 знаками температурного коэффициента сопротивления (рис. 3).

Для комбинированного тонкопленочного резистора номиналом 10 кОм также были рассчитаны $R_1 = 9879$ Ом, $R_2 = 123$ Ом и спроектирована

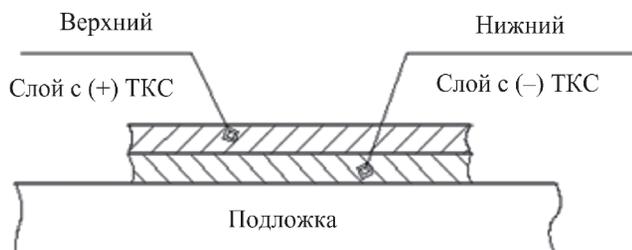


Рис. 1. Многослойный тонкопленочный резистор, ТКС — температурный коэффициент сопротивления.

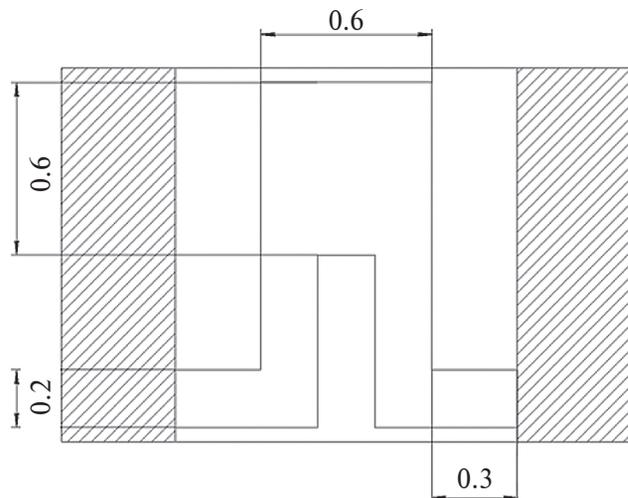


Рис. 2. Топология многослойного тонкопленочного резистора.

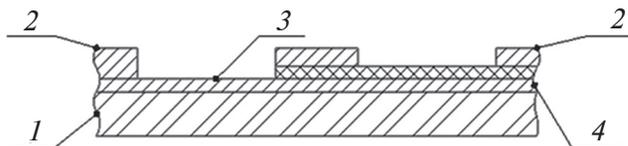


Рис. 3. Комбинированный тонкопленочный резистор: 1 — диэлектрическая подложка; 2 — токопроводящий слой; 3, 4 — резистивные пленки с отрицательным и положительным знаками температурного коэффициента сопротивления соответственно.

его топология (рис. 4). При такой топологии использовали дополнительную контактную площадку и большое количество подгоночных секций, обеспечивающих корректировку параметров на 30%.

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО ТЕМПЕРАТУРНУЮ САМОКОМПЕНСАЦИЮ

Подложку очищают без кипячения сначала в изопропиловом спирте в течение 10 мин, затем в спирто-ацетоновой смеси в течение 15 мин, продувают и сушат при температуре 50°C в течение 2 ч. Очистка подложки напрямую влияет на адгезию тонких пленок [5, 6].

На следующем этапе формируют слои тонких пленок методом вакуумного напыления на установке УВН-71 ПЗ. Режимы напыления опытных образцов многослойных и комбинированных тонкопленочных резисторов, а также режимы

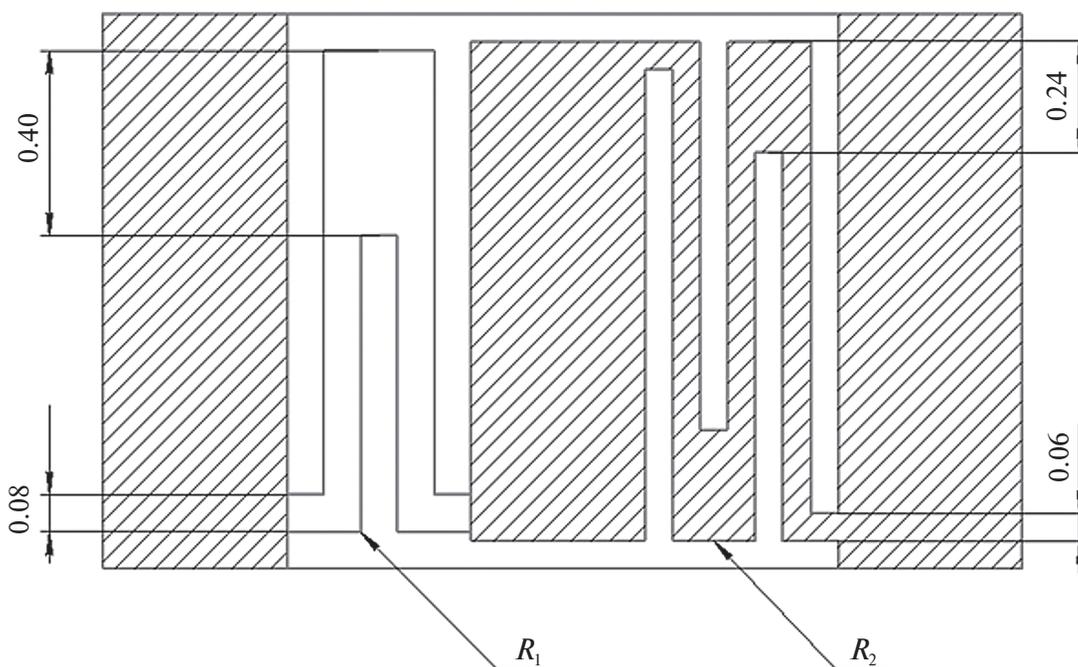


Рис. 4. Топология комбинированного тонкопленочного резистора.

Таблица 1. Режимы напыления тонкопленочных резисторов

Многослойный и комбинированный тонкопленочный резистор						
Слой	Ток испарителя $I_{испар.}, A$	Начальное остаточное давление в камере $P_{ост.нач.}, 10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$	Конечное остаточное давление в камере $P_{ост.кон.}, 10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$	Температура подложки, $T_{подл.}, ^\circ C$	Сопротивление контрольного образца, кОм	Время напыления, с
X20H75Ю	280–350	2	3.5	350	1.050–1.080	60
К-30С	480–500	2	3.5	380	0.750–0.850	200–280
Ni	400–480	3	8	400	0.0012–0.002	300–360
Контактные площадки						
Cr	250–320	3	6	350	1.200–1.400	30
Ni	400–480	3	8	400	0.0012–0.002	300–360

напыления контактных групп на обратной стороне подложки представлены в табл. 1. Для нанесения защитного слоя, удовлетворяющего заданным требованиям, был выбран метод высокочастотного ионно-плазменного магнетронного распыления мишени Al_2O_3 на установке Caroline D12A1 при давлении 0.1 Па, рабочем токе магнетрона 1 А и температуре подложек 300°C.

Далее были определены режимы получения топологии резисторов методом фотолитографии [6]: подложки с напыленными пленками обезжиривали в ацетоне, а затем в спирте; для формирования защитного рельефа использовали позитивный фоторезист ФП-383; количество оборотов центрифуги при нанесении фоторезиста было порядка 1800–2000 об./мин; сушку фоторезиста проводили при

$+100\pm 5^\circ\text{C}$ — 15 мин; после экспонирования и проявления фоторезиста дубили при $+170\pm 10^\circ\text{C}$ — 10 мин; травление осуществляли в плазме аргона, снятие фоторезиста — при $+60\pm 5^\circ\text{C}$; отжиг в муфельной печи происходил при температуре $350\pm 5^\circ\text{C}$.

Подложки с резистивными модулями на следующем этапе разделяли на полосы для нанесения металлизации на торцевые стороны по режимам, указанным в табл. 1, после чего полосы разделяли на чип-резисторы [7, 8]. На завершающем этапе технологического процесса проводили подгонку лазером тонкопленочного резистора к расчетным значениям сопротивлений [8, 9].

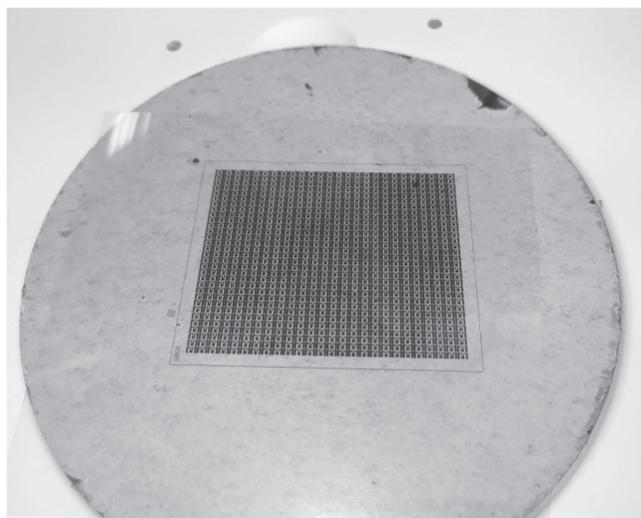


Рис. 5. Фотошаблон.

СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ЧИП-РЕЗИСТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СВЕРХПРЕЦИЗИОННЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ С ТЕМПЕРАТУРНОЙ САМОКОМПЕНСАЦИЕЙ

Установлено, что для получения температурного коэффициента сопротивления $K-30\text{C}$ в пределах от -50×10^{-6} до $-100 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, если следовать подобранным режимам, напыление должно длиться не более 5 мин, вакуум не должен опускаться ниже 4×10^{-5} мм рт. ст.

В качестве резистивных пленок на основе ни-хрома лучшим образом себя зарекомендовал сплав X20N75Ю [10, 11]. При условии его легирования алюминием пленку формировали термическим испарением из вольфрама при плавном достижении тока 260–270 А, при котором происходило расплавление навески. Температуру подложек поддерживали в пределах 400°C [10, 12].

После формирования слоев тонких пленок формировали топологию методами фотолитографии [13]. Для этого был изготовлен фотошаблон (рис. 5). Подложки с полученной топологией (рис. 6) подвергались температурной стабилизации, заключающейся в выдерживании в печи при температуре 350°C в течение 6 ч.

На следующем этапе подложки разделяли на полосы и формировали контактные группы на торцевых сторонах подложек [14, 15]. Гнезда

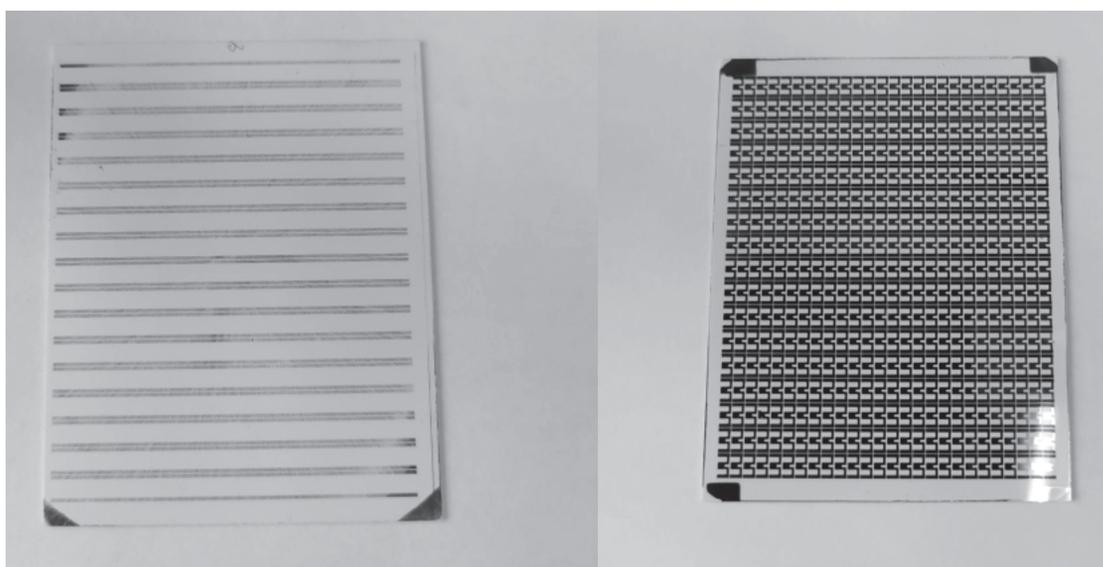


Рис. 6. Сформированная топология тонкопленочного резистора.

каруселей современных установок вакуумного напыления в поставляемой производителем комплектации не предусматривают возможность напыления металла на торцевые стороны подложки. Для этого была разработана дополнительная технологическая оснастка (рис. 7).

Полученные образцы разделяли на чип-резисторы, контакты которых дополнительно покрывали припоем. Для обеспечения требуемых значений электрических параметров на следующем этапе проводили подгонку лазером [16]. Стоит отметить, что в случае комбинированной структуры лазерная подгонка изменяет температурный коэффициент сопротивления тонкопленочного резистора в целом [17–19].

ПРОВЕДЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУЧЕННОГО ОБРАЗЦА ЧИП-РЕЗИСТОРА

С целью апробации результатов проделанной работы были изготовлены опытные партии многослойных и комбинированных тонкопленочных резисторов из восьми образцов в типоразмере 0805 с номинальным сопротивлением 10 кОм. Результаты проведенных измерений представлены в табл. 2. Таким образом, предлагаемая технология позволяет получить тонкопленочные чип-резисторы с температурным коэффициентом сопротивления не хуже $\pm 5 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ в диапазоне температур от -60 до $+125^\circ\text{C}$.

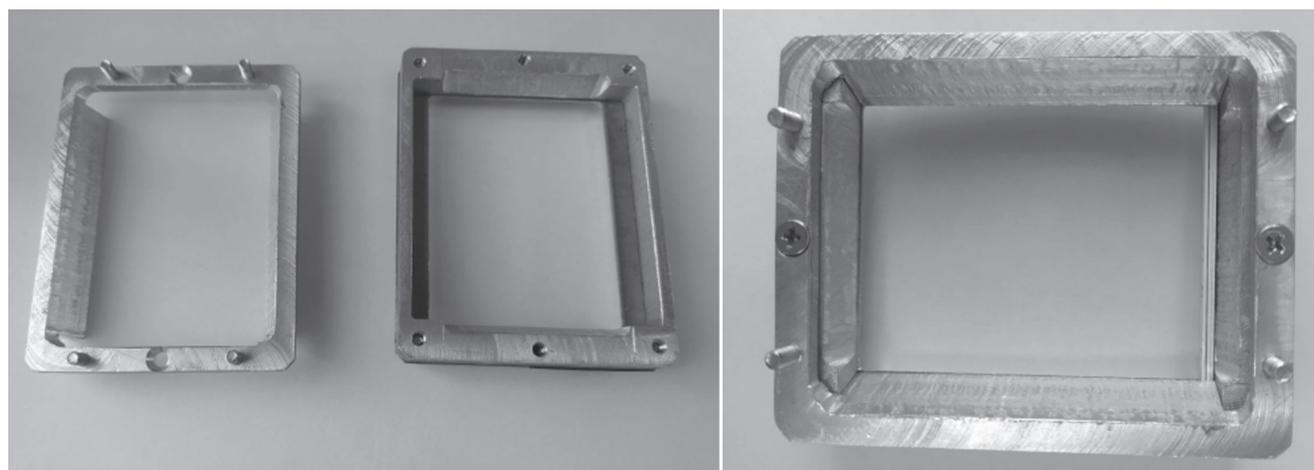


Рис. 7. Технологическая оснастка для металлизации торцевых сторон подложки.

Таблица 2. Результаты косвенных измерений температурного коэффициента сопротивления многослойных и комбинированных тонкопленочных резисторов

№	Многослойные ТПР*			№	Комбинированные ТПР*		
	R при -60°C , кОм	R при 125°C , кОм	ТКС, $10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$		R при -60°C , кОм	R при 125°C , кОм	**ТКС, $10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
1	9.98186	9.981875971	16	1	9.956432	9.956433	20
2	9.964249	9.964249996	1	2	10.036851	10.036854	30
3	10.067714	10.06766165	-52	3	10.027354	10.027358	48
4	10.09557	10.09562654	56	4	9.986574	9.986569	-46
5	9.997162	9.997134008	-28	5	9.982188	9.982186	-16
6	9.972797	9.972817943	21	6	10.044312	10.044314	20
7	9.990522	9.990528993	7	7	10.041643	10.041640	-24
8	10.00818	10.00827	94	8	9.965981	9.965977	-37

*ТПР — тонкопленочный резистор, **ТКС — температурный коэффициент сопротивления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана конструкция чип-резисторов на основе пленок многослойных (X20H75Ю/К-30С) и комбинированных (К-30С/Ni) резистивных структур в типоразмере 0805 номиналом 10 кОм с дополнительными тонкопленочными слоями, позволяющими добиться температурной компенсации.

Разработан технологический процесс изготовления многослойных и комбинированных тонкопленочных резисторов, включающий в себя операции очистки подложек, напыления, фотохимической обработки, термотренировки, резки подложек, формирования контактных групп, подгонки.

Созданы экспериментальные образцы термостабильных сверхпрецизионных многослойных и комбинированных тонкопленочных резисторов поверхностного монтажа с температурной самокомпенсацией в типоразмере 0805. Разработанное конструкторско-технологическое решение позволяет добиться температурного коэффициента сопротивления ТКС $\pm 5 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ в диапазоне рабочих температур от -60 до $+125^\circ\text{C}$.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации “Синтез и исследование перспективных наноматериалов, покрытий и электронных устройств” (№ 124041700069-0).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лучинин В.В., Мальцев П.П. // Нано- и микросистемная техника. 2021. Т. 23. № 1. С. 3.
2. Мараканов В.В., Недорезов В.Г., Кузнецов А.В. Резистивные материалы на основе никеля для прецизионных резисторов // Электронная промышленность. 1988. Вып. 3. С. 62.
3. Доросинский А.Ю., Прокофьев О.В., Семочкина И.Ю. // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 98.
<https://doi.org/10.21685/2307-4205-2021-4-11>
4. Дубровина Н.Н., Костин Г.Ф. // Вестн. Концерна ВКО “Алмаз–Антей”. 2020. № 4. С. 34.
<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-34-40>
5. Родионов Ю.А., Котов Д.А., Плебанович В.И., Ковальчук Н.С. Базовые технологические операции фото-литографии и оборудование для их реализации: учеб.-метод. пособие. Минск: БГУИР, 2017. 71 с.
6. Shirani A., Joy T., Rogov A., Lin M., Yerokhin A., Mogonye J.-E., Korenyi-Both A., Aouadi S.M., Voevodin A.A., Berman D. // Surf. Coat. Technol. 2020. V. 397. P. 126016.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126016>
7. Лучкин А.Г., Лучкин Г.С. // Вестн. Казан. технолог. ун-та. 2012. Т. 15. С. 208.
8. Piganov M.N., Novomeyeisky D.N. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1096 P. 012183.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1096/1/012183>
9. Лугин А.Н. Конструкторско-технологические основы проектирования тонкопленочных прецизионных резисторов. Пенза: Информационно-издательский центр ПензГУ, 2009. 287 с.
10. Антонов Ю.Н. Индуктивное моделирование лазерной подгонки пленочных резисторов. Ульяновск: УЛГТУ, 2009. 215 с.
11. Zhao Y., Liu J., Ying Y., Chen H., Wang W., Zhang S., Hai Z., Sun D. // J. Mater. Chem. C. 2024. V. 12. P. 12491.
<https://doi.org/10.1039/D4TC01645A>
12. Gurin S., Pecherskaya E., Novichkov M., Safronova O. // J. Phys.: Conf. Ser. 2022. V. 2373. P. 032028.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/3/032028>
13. Температурные измерения. Справочник / Ред. Геращенко О.А. и др. Киев: Наукова думка, 1989. 704 с.
14. Недорезов В.Г. Феноменологическая модель температурной стабильности металлофольговых резисторов с учетом влияния сопротивления выводов. // Тр. Междунар. симп. “Надежность и качество”. Пенза, 23–31 мая, 2011. С. 75.
15. Гурин С.А. Исследование и разработка тонкопленочных гетерогенных структур чувствительных элементов датчиков давлений с экстремальными условиями эксплуатации: Дис. ... канд. тех. наук: 05.27.01. Пенза: ПГУ, 2016. 157 с.
16. Васильев В.А., Юлоськов Р.В. // Современная техника и технологии. 2017. № 5.
<https://technology.snauka.ru/2017/05/13452>
17. Baranova T.A., Chubenko A.K., Mamaev A.I., Mamaeva V.A., Kovalskaya Ya.B. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2016. V. 156. P. 012013.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/156/1/012013>
18. Mamaev A.I., Долгова Ю.Н., Белецкая Е.Ю., Мамаева В.А., Баранова Т.А. // Изв. вузов. Физика. 2020. Т. 63. № 9 (753). С. 141.
<https://doi.org/10.17223/00213411/63/9/141>
19. Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Karpanin O.V., Shepeleva Y.V., Zinchenko T.O., Artamonov D.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 917. P. 092021.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/917/9/092021>

Design and Technological Solution Providing Temperature Self-Compensation of Thin-Film Chip Resistors

E. A. Pecherskaya^{1,*}, S. A. Gurin¹, S. V. Konovalov^{1,2}, A. E. Shepeleva¹, M. D. Novichkov¹

¹*Penza State University, Penza, 400026 Russia*

²*Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, 654007 Russia*

**e-mail: pea1@list.ru*

This work is aimed at solving the problem of increasing the accuracy of thin-film resistors. The main cause of this problem is the uncontrolled change in the resistance of resistors over time and under the influence of temperature, which makes it difficult to achieve better resistance stability. To solve this problem, it is proposed to use compensation layers with temperature coefficients of resistance of different signs. A design and technological solution has been developed for ultra-precision multilayer and combined thin-film resistive structures with temperature self-compensation made of metal-silicide alloys and nichrome-based alloys, as well as from K-30S cermet and nickel, respectively. The choice of combining films made of Kh20N75Yu alloy and K-30S cermets is due to the selection of the ratio of layer thicknesses. The structure and topology of combined and multilayer thin-film resistors have been developed. A technological process for manufacturing thin-film chip resistors has been developed, deposition modes and obtaining topology by photolithography with subsequent temperature stabilization have been worked out. Functional tests of a pilot batch of samples have been carried out, for which technological equipment has been additionally developed. The developed technology makes it possible to achieve a temperature coefficient of resistance of $\pm 5 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ in the operating temperature range from -60 to $+125^\circ\text{C}$. The scientific novelty of the work lies in the possibility of combining thin films Kh20N75Yu/K-30S for multilayer and K-30S/Ni for combined resistive structures in the proposed design in order to achieve temperature compensation and improve stability indicators.

Keywords: temperature compensation, thin-film resistors, temperature coefficient of resistance, resistance, multilayer and combined resistive structures, ultra-precision resistors.