

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 621.382

doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-5

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПАССИВИРУЮЩИХ СТРУКТУР МНОГОСЛОЙНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

В. С. Мамонтов¹, С. А. Гурин², М. Д. Новичков³, Д. В. Агафонов⁴, К. Л. Закирова⁵

^{1,3,4,5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

^{2,3,4} Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, Пенза, Россия

¹kipra@pnzgu.ru, ²teslananoel@rambler.ru, ³novichkov1998maks@gmail.com,

⁴dmitryagafonov@list.ru, ⁵Zakirovacamila@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность данного исследования связана с развитием радиоэлектронной аппаратуры, которая требует улучшения электрических параметров электронных компонентов, в том числе временной и температурной стабильности. *Материалы и методы.* Исследованы процессы, протекающие в структуре тонких пленок, приводящие к изменению сопротивления тонкопленочного резистора с течением времени. *Результаты.* Представлена технология синтеза тонкопленочных резисторов с защитным покрытием и параметры, определяющие материалы тонких пленок и их последовательность. *Выводы.* Разработанная технология позволяет добиться значений ТКС тонкопленочных резисторов в диапазоне ± 3 1/°C.

Ключевые слова: тонкопленочный резистор, сопротивление, временная стабильность, температурная компенсация, пассивирующая структура

Для цитирования: Мамонтов В. С., Гурин С. А., Новичков М. Д., Агафонов Д. В., Закирова К. Л. Технология изготовления пассивирующих структур многослойных тонкопленочных резисторов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 43–48. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-5

SYNTHESIS OF PASSIVATING STRUCTURES OF MULTILAYER THIN-FILM RESISTORS

V.S. Mamontov¹, S.A. Gurin², M.D. Novichkov³, D.V. Agafonov⁴, K.L. Zakirova⁵

^{1,3,4,5} Penza State University, Penza, Russia

^{2,3,4} Scientific Research Institute of Electronic and Mechanical Devices, Penza, Russia

¹kipra@pnzgu.ru, ²teslananoel@rambler.ru, ³novichkov1998maks@gmail.com,

⁴dmitryagafonov@list.ru, ⁵Zakirovacamila@yandex.ru

Abstract. *Background.* The relevance of this study is related to the development of radioelectronic equipment, which requires improvement of the electrical parameters of electronic components, including time and temperature stability. *Materials and methods.* The processes occurring in the structure of thin films leading to a change in the resistance of a thin-film resistor over time are investigated. *Results.* The technology of synthesis of thin-film resistors with a protective coating

and the parameters determining the materials of thin films and their sequence are presented. *Conclusions.* The developed technology makes it possible to achieve values of TCR of thin-film resistors in the range $\pm 3 \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Keywords: thin-film resistor, resistance, temporary stability, temperature compensation, passivating structure

For citation: Mamontov V.S., Gurin S.A., Novichkov M.D., Agafonov D.V., Zakirova K.L. Synthesis of passivating structures of multilayer thin-film resistors. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):43–48. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-5

Введение

Стремительное развитие радиоэлектроники требует усовершенствования электронно-компонентной базы [1, 2]. Одним из самых распространенных компонентов является резистор, который применяется для перераспределения и регулировки электрической энергии в авиационной и автомобильной промышленности, навигационных системах, медицинском оборудовании, средствах связи, системах управления промышленными объектами, бытовой технике и прочих областях [3, 4]. Неуправляемые изменения сопротивления резисторов с течением времени и при воздействии температуры является основными факторами, оказывающими негативное влияние на точность прецизионных тонкопленочных резисторов (ТПР) [5].

Как правило конструкция тонкопленочных резисторов включает в себя такие элементы, как диэлектрическая подложка, резистивный и контактный слои тонких пленок. Добавление дополнительных функциональных слоев, таких как термокомпенсационный и пассивирующий, позволяет изготавливать резисторы с более высокой временной и температурной стабильностью, чем производимые в настоящее время аналоги [6, 7].

Временная нестабильность тонких пленок

В нормальных условиях со временем в тонких резистивных пленках происходит ряд процессов, приводящих к «дрейфу» сопротивления. С одной стороны, это «залечивание» и упорядочение дефектов, снятие напряжений, рекристаллизация и рост зерен, приводящие к снижению значения сопротивления с течением времени, с другой – поверхностное и объемное окисление, приводящее к росту сопротивления резистивной пленки [8]. Так, например, в пленках нихрома дрейф сопротивления имеет положительное направление и свидетельствует о доминирующей роли окисления. Добавки алюминия в сплавы на основе нихрома усиливают роль процессов рекристаллизации. Известно, что температура рекристаллизации алюминия (150°C) значительно ниже, чем нихрома. Тем самым при оптимальном процентном составе сплава возможна взаимная компенсация роста сопротивления вследствие окисления снижением сопротивления за счет рекристаллизации, что схоже с возможными теоретическими проработками получения металлосилицидных резистивных пленок. Но на сегодня, учитывая большое множество режимов формирования резистивной структуры, в производстве достичь прогнозируемых значений не удастся [9].

Кинетика процессов деградации тонких пленок керметов так же, как и нихрома, имеет двойственный характер. С течением времени возможны окончательное формирование фаз и рекристаллизация, с одной стороны, и окисление хрома, с другой. Скорость первого процесса зависит от оптимальных режимов термостабилизации и минимальна при отработанной технологии, а второго – от содержания хрома в резистивном слое [10]. При этом временной «дрейф» сопротивления таких пленок имеет отрицательное направление.

Помимо этого, слабым звеном тонких резистивных пленок является их чувствительность к влаге, под воздействием которой дорожки резистивного слоя вытравливаются в ходе электрохимической коррозии, а также низкая устойчивость к механическим воздействиям. Уменьшение ширины рисунка резистивного слоя при подобных воздействиях приводит к увеличению сопротивления и снижению максимальной рассеиваемой мощности, зачастую приводящее к перегоранию ТПР.

Учитывая вышеизложенные закономерности, представляется возможным повышение временной стабильности параметров за счет внедрения в конструкцию резистора дополнительных функциональных и защитных слоев тонких пленок.

Конструкция высокостабильного тонкопленочного резистора

Тонкопленочную резистивную структуру с дополнительным компенсационным резистивным слоем можно условно представить в виде эквивалентной схемы с параллельным

включением резисторов, тогда суммарное относительное изменение значения сопротивления будет определяться следующим уравнением:

$$\delta_{\text{пар.}} = R \left(\frac{\delta_1}{R_1} + \frac{\delta_2}{R_2} \right), \quad (1)$$

где R – общее сопротивление составного резистора; R_1 и R_2 – сопротивления резистивных пленок; δ_1 и δ_2 – относительные изменения величины сопротивления резистивных пленок во времени.

Из этого уравнения следует, что для полной компенсации временного отклонения, значения сопротивлений тонких пленок, при заранее известных δ_1 и δ_2 , должны удовлетворять уравнению

$$R_1 \delta_1 = -R_2 \delta_2. \quad (2)$$

Добавление дополнительных тонких пленок в значительной степени затрудняет проникновение активных газов, в том числе кислорода, ко всем слоям резистивной структуры, таким образом изменяя кинетику деградации. В особенности это проявляется для тонких пленок ни хрома, кинетика деградации которого в большей степени определяется именно процессом окисления. Поэтому нижний слой рекомендуется формировать из металлосилицидного сплава, представляющего собой металлическую фазу в оксидной матрице SiO, в связи с чем изменение сопротивления с течением времени определяется процессами рекристаллизации.

Для защиты резистивной пленки широко применяются различные методы пассивации [11]. Под пассивацией в данном случае понимается нанесение защитных пленок из химически стойкого соединения на поверхность резистивного слоя, например, карбида кремния, обладающего высокими изолирующими и теплопроводящими свойствами. Полученная конструкция представлена на рис. 1.

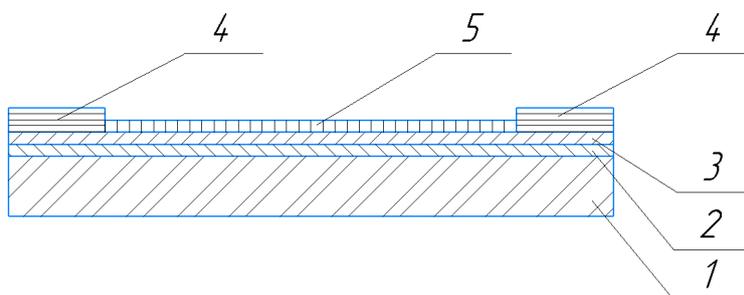


Рис. 1. Структура многослойного тонкопленочного резистора:

1 – диэлектрическая подложка; 2 – пленка из металлосилицидного сплава;
3 – пленка из нихрома; 4 – контактные площадки; 5 – пленка из карбида кремния

Стоит отметить, что для металлосилицидных сплавов и нихрома противоположными являются не только направления кривых старения, но и значения температурного коэффициента сопротивления, что позволяет добиться не только высокой временной стабильности, но и устойчивости к воздействию температуры, определяемой уравнением

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

где α_1 – ТКС первого (нижнего) слоя двухслойной структуры; α_2 – ТКС второго (верхнего) слоя двухслойной структуры; ΔT – диапазон изменения температуры.

Синтез многослойного тонкопленочного резистора

Диэлектрическая подложка из оксида алюминия проходит операции подготовки поверхности – жидкостная и плазмохимическая очистка. С учетом рассчитанных по формуле (1) значений сопротивлений напыляются резистивные пленки и кермета К-20С, имеющего отрицательный ТКС, и нихрома Х20Н75Ю, имеющего положительный ТКС, а также контактного слоя алюминия по режимам, приведенным в табл. 1.

Таблица 1

Режимы напыления резистивных и контактных тонких пленок

Слой	Ток испарителя $I_{\text{испар}}, \text{ А}$	Начальное остаточное давление в камере $P_{\text{ост нач}}, \text{ мм рт. ст.}$	Конечное остаточное давление в камере $P_{\text{ост кон}}, \text{ мм рт. ст.}$	Температура подложки $T_{\text{подл}}, \text{ }^\circ\text{C}$	Время напыления, $t, \text{ с}$
X20H80	280–350	$2 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	350	60
K-20C	480–500	$2 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	400	200–280
Al	300–350	$2 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	250	180

Далее методом прямой фотолитографии формируется топология тонкопленочного резистора и производится напыление тонкой пленки карбида кремния методом магнетронного распыления в среде аргона при мощности 610 Вт в течение 20 мин, при этом температура подложек поддерживалась на уровне 320–340 °С. После чего производится высокотемпературный отжиг при температуре 350 °С в течение 6 ч.

Согласно проведенным испытаниям, температурный коэффициент сопротивления полученных тонкопленочных резисторов в диапазоне минус 60...+150 °С не превышал $\pm 3 \text{ 1}^\circ\text{C} \cdot 10^{-6}$, временная нестабильность сопротивления худшего после выдержки в печи при температуре 150 °С в течение 45 сут составила 0,15 %.

Заключение

Определены основные процессы, протекающие в структуре резистивных тонких пленок, приводящие к дрейфу сопротивления с течением времени. На основе установленных закономерностей разработана тонкопленочная структура, состоящая из тонких пленок нихрома и кермета К-20С, имеющих противоположное направление кривых старения, и пассивирующего слоя карбида кремния, защищающего резистор от электролитической коррозии и механических воздействий. Полученная структура обладает высокой временной стабильностью, а также температурной устойчивостью благодаря компенсации ТКС.

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. Волков В. С., Баринов И. Н. Компенсация температурной погрешности чувствительности высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2013. № 1. С. 30–36.
3. Лугин А. Н. Конструкторско-технологические основы проектирования тонкопленочных прецизионных резисторов : монография. Пенза : Инф.-изд. центр ПГУ, 2009. 287 с.
4. Асташенкова О. Н., Корляков А. В. Контроль физико-механических параметров тонких пленок // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 2. С. 24–29.
5. Сергеев В. Е., Воротынцев В. М. Разработка модифицированной технологии термостабилизации тонкопленочных резистивных элементов // Проектирование и технология электронных средств. 2021. № 1. С. 4–9.
6. Chen C., Zhu J., Chen Y., Wang G. Unveiling structural characteristics for ultralow resistance drift in BiSb-Ge₂Sb₂Te₅ materials for phase-change neuron synaptic devices // Journal of Alloys and Compounds. 2022. Vol. 892. P. 162148.
7. Pecherskaya E. A., Gurin S. A., Novichkov M. D. Combined Thin-Film Resistive and Strain-Resistant Structures with Temperature Self-Compensation // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2022. Vol. 16, № 6. P. 1074–1080. doi: 10.1134/s1027451022060209
8. Сергеев В. Е., Воротынцев В. М. Разработка модифицированной технологии термостабилизации тонкопленочных резистивных элементов // Проектирование и технология электронных средств. 2021. № 1. С. 4–9.
9. Аверин И. А., Печерская Р. М. Управление параметрами резистивных структур посредством отжига // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2008. Т. 2. С. 144–145.
10. Печерская Е. А., Гуринов С. А., Новичков М. Д. Высокотемпературный отжиг многослойных резистивных структур // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 1. С. 56–61. doi: 10.21685/2307-5538-2023-1-7
11. Гуринов С. А. Исследование и разработка тонкопленочных гетерогенных структур чувствительных элементов датчиков давлений с экстремальными условиями эксплуатации : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2016. 157 с.

References

1. Luchinin V.V., Mal'tsev P.P. Nanotechnology in a new technological order. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and microsystem engineering*. 2021;23(1):3–5. (In Russ.)
2. Volkov V.S., Barinov I.N. Compensation of temperature error sensitivity of high-temperature semiconductor pressure sensors. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2013;(1):30–36. (In Russ.)
3. Lugin A.N. *Konstruktorsko-tehnologicheskie osnovy proektirovaniya tonkoplenochnykh pretsizionnykh rezistorov: monografiya = Design and technological principles of designing thin-film precision resistors : monograph*. Penza: Inf.-izd. tsentr PGU, 2009:287. (In Russ.)
4. Astashenkova O.N., Korlyakov A.V. Control of physico-mechanical parameters of thin films. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and microsystem engineering*. 2013;(2):24–29. (In Russ.)
5. Sergeev V.E., Vorotyntsev V.M. Development of a modified technology for thermal stabilization of thin-film resistive elements. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and technology of electronic devices*. 2021;(1):4–9. (In Russ.)
6. Chen C., Zhu J., Chen Y., Wang G. Unveiling structural characteristics for ultralow resistance drift in BiSb-Ge₂Sb₂Te₅ materials for phase-change neuron synaptic devices. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022;892:162148.
7. Pecherskaya E.A., Gurin S.A., Novichkov M.D. Combined Thin-Film Resistive and Strain-Resistant Structures with Temperature Self-Compensation. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2022;16(6):1074–1080. doi: 10.1134/s1027451022060209
8. Sergeev V.E., Vorotyntsev V.M. Development of a modified technology for thermal stabilization of thin-film resistive elements. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and technology of electronic devices*. 2021;(1):4–9. (In Russ.)
9. Averin I.A., Pecherskaya R.M. Control of the parameters of resistive structures by annealing. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2008;2:144–145. (In Russ.)
10. Pecherskaya E.A., Gurin S.A., Novichkov M.D. High-temperature annealing of multilayer resistive structures. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2023;(1):56–61. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-1-7
11. Gurin S.A. *Research and development of thin-film heterogeneous structures of sensitive elements of pressure sensors with extreme operating conditions*. PhD dissertation. Saint Petersburg, 2016:157. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Виталий Сергеевич Мамонтов

доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Vitaly S. Mamontov

Associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сергей Александрович Гурин

кандидат технических наук,
начальник лаборатории,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: teslananoel@rambler.ru

Sergey A. Gurin

Candidate of technical sciences, head of the laboratory,
Scientific Research Institute of Electronic
and Mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Максим Дмитриевич Новичков

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
инженер-технолог,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: novichkov1998maks@gmail.com

Maksim D. Novichkov

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
process engineer,
Scientific Research Institute of Electronic
and Mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Дмитрий Вячеславович Агафонов

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: dmitryagafonov@list.ru

Dmitry V. Agafonov

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
design engineer,
Scientific Research Institute of Electronic
and Mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Камила Ленаровна Закирова

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: Zakirovacamila@yandex.ru

Kamila L. Zakirova

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 29.11.2024

Поступила после рецензирования/Revised 25.12.2024

Принята к публикации/Accepted 16.01.2025