

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 621.316.8

DOI 10.21685/2307-5538-2020-4-7

*К. Э. Уткин, П. А. Колосов, Б. В. Цыпин, И. В. Макаров***ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИМПУЛЬСНО-ТОКОВОЙ
СТАБИЛИЗАЦИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ
РЕЗИСТОРОВ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ***K. E. Utkin, P. A. Kolosov, B. V. Tsy-pin, I. V. Makarov***THEORETICAL ASPECTS OF PULSE-CURRENT
STABILIZATION OF RESISTANCE OF THIN-FILM
RESISTORS OF PRIMARY CONVERTERS**

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Обеспечение высокого и стабильного качества тонкопленочных резисторов является в настоящее время одной из основных задач при изготовлении первичных преобразователей, актуальной остается проблема обеспечения долговременной стабильности их выходных параметров. Одним из способов стабилизации выходных параметров тонкопленочных резисторов является применение импульсно-токовой обработки на этапе изготовления тонкопленочных резисторов. Цель работы – определение оптимальных параметров воздействия на тонкопленочные резисторы импульсно-токовым методом с целью стабилизации их выходных параметров. **Материалы и методы.** Проведено определение основных процессов в структуре тонкопленочного резистора, влияющих на временную стабильность их выходных параметров. Проведено определение соотношения между длительностью импульса и его амплитудой при проведении обработки импульсно-токовым методом. **Результаты.** Определены оптимальные параметры воздействия на тонкопленочные резисторы импульсно-токовым методом. Определена формула соотношения между длительностью импульса и его амплитудой, обеспечивающих достаточную температуру для структурирования тонкой резистивной пленки. Представлены выводы об основных принципах импульсно-токовой стабилизации. **Выводы.** Полученные данные позволяют определить оптимальные параметры для стабилизации тонкопленочных резисторов импульсно-токовым методом.

A b s t r a c t. Background. Ensuring high and stable quality of thin-film resistors is currently one of the main tasks in the manufacture of primary converters; the problem of ensuring long-term stability of their output parameters remains urgent. One of the ways to stabilize the output parameters of thin-film resistors is the use of pulse-current processing at the stage of manufacturing thin-film resistors. The purpose of the work is to determine the optimal parameters of the impact on thin-film resistors by the pulse-current method in order to stabilize their output parameters. **Materials and methods.** The definition of the main processes in the structure of a thin-film resistor, which affect the temporal stability of their output parameters, is car-

ried out. Determination of the ratio between the pulse duration and its amplitude during processing by the pulse-current method is carried out. *Results.* The optimal parameters of the impact on thin-film resistors by the pulse-current method have been determined. The formula for the relationship between the pulse duration and its amplitude is determined, which provides a sufficient temperature for structuring a thin resistive film. Conclusions on the basic principles of pulse-current stabilization are presented. *Conclusions.* The data obtained make it possible to determine the optimal parameters for stabilizing thin-film resistors by the pulse-current method.

К л ю ч е в ы е с л о в а: стабилизация параметров тонкопленочных резисторов, импульсно-токовая стабилизация, тонкопленочная технология, удельная теплоемкость резистивного вещества, длительность импульса, амплитуда импульсов напряжения, диффузия, тонкопленочный резистор, теплопроводность.

К e y w o r d s: stabilization of parameters of thin-film resistors, pulsed current stabilization, thin-film technology, specific heat of a resistive substance, pulse duration, amplitude of voltage pulses, diffusion, thin-film resistor, thermal conductivity.

Качество и стабильность характеристик датчиков-преобразующей аппаратуры всегда являются приоритетными направлениями при ее изготовлении. Стабильность датчиков давления напрямую зависит от стабильности тонкопленочных резисторов. В процессе эксплуатации и хранения датчиков давления происходит естественное «старение» тонкопленочных резисторов. При этом значения резисторов изменяются: увеличиваются или уменьшаются в зависимости от процессов, преобладающих в это время. Известно, что при длительном хранении или эксплуатации в тонкопленочных структурах происходят следующие процессы:

- межзерновая диффузия в резистивном слое;
- взаимодиффузия на границах раздела слоев (резистивного и диэлектрика);
- окисление верхних слоев резистивного слоя.

При межзерновой диффузии значения резисторов уменьшаются, при окислении резистивного слоя и при взаимодиффузии резистивного слоя и диэлектрика значения резисторов увеличиваются. Эти процессы происходят постоянно и одновременно, при увеличении температуры более активно, при понижении температуры активность падает, но не останавливается, поэтому в зависимости от того, какой процесс преобладает в данный момент, значение резистора может увеличиваться или уменьшаться [1–3]. Если значения резисторов, образующих «измерительный мост Уитстона», изменяются одинаково, то значение начального выходного сигнала не изменяется, изменяется только потребляемый ток. Если значения резисторов изменяются с разной скоростью, то происходит изменение начального выходного сигнала, и чем больше разница в скоростях изменения значений сопротивлений, тем больше изменение начального выходного сигнала. Если значения резисторов изменяются в разные стороны (значения одних резисторов увеличиваются, а значения других уменьшаются), то происходит резкое скачкообразное изменение начального выходного сигнала [1, 4].

Стабилизация параметров тонкопленочных резисторов предполагает остановку или замедление указанных выше процессов. Стабилизация осуществляется с помощью термообработки (отжига в вакууме и на воздухе при высокой температуре), после подобных операций устраняются дефекты тонкопленочной структуры [5].

Импульсно-токовая стабилизация является одной из разновидностей термотоковой обработки. Основной комплексной задачей импульсно-токовой стабилизации является предотвращение окисления верхнего резистивного слоя в процессе хранения и эксплуатации, предотвращение взаимодиффузии на границах раздела слоев (резистивного и диэлектрического) и устранение межзерновой диффузии [6]. Эти задачи решаются путем:

- образования защитного оксидного слоя, препятствующего дальнейшему окислению резистивного слоя;
- образования слоя силицидов на границах раздела слоев, препятствующего взаимодиффузии резистивного слоя и слоя диэлектрика;
- сращивания кристаллитов в один монокристалл, что предотвращает межзерновую диффузию в процессе хранения и эксплуатации [4].

При проведении импульсно-токовой стабилизации сам тонкопленочный резистор является нагревательным элементом. Так как тонкопленочный резистор неподвижен, а электрический ток постоянен, то работа сторонних сил расходуется на нагревание резистора. Энергия W , выделяющаяся за время t в объеме тонкопленочного резистора [7, 8]:

$$W = JUt,$$

где J – сила тока; U – напряжение, приложенное к резистору.

При этом количество теплоты, необходимое для нагревания резистора массой M от температуры T_0 до температуры T , можно вычислить по формуле

$$Q_{\text{рез}} = cM\Delta T,$$

где c – удельная теплоемкость резистивного вещества; M – масса резистора; ΔT – изменение температуры.

В нашем случае теплота возникает внутри тонкопленочного резистора за счет прохождения по нему электрического тока. Поскольку объемное тепловыделение может быть не только равномерным, но и неравномерным, для таких процессов важным является понятие мощности внутренних источников теплоты. Эта величина, обозначаемая q_v , определяет собой количество теплоты, выделяемое единицей объема тела в единицу времени ($\text{Вт}/\text{м}^3$).

При наличии внутренних источников теплоты основной задачей является расчет температурного поля внутри тонкопленочного резистора. Представим поперечный разрез тонкопленочного резистора в виде однородной плоской стенки толщиной 2δ , коэффициент теплопроводности стенки λ . Внутри этой стенки имеются равномерно распределенные источники теплоты q_v . Выделившаяся теплота через боковые поверхности стенки, верхнюю и нижнюю поверхности резистора, передается в окружающую среду: вверх – в атмосферу, вниз – к диэлектрику. Относительно площади стенки в среднем сечении процесс теплопроводности будет протекать симметрично, поэтому именно здесь целесообразно разместить начало координат, а ось x направить перпендикулярно боковым стенкам резистора (рис. 1) [7, 9].

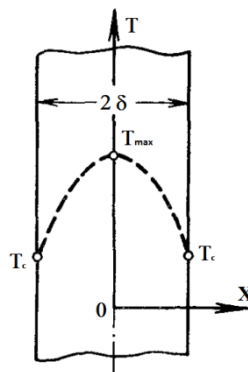


Рис. 1. Теплопроводность плоской стенки при наличии внутренних источников теплоты

Из уравнения теплового баланса следует, что при наличии внутренних источников теплоты плотность теплового потока q_x в плоской стенке линейно возрастает с увеличением расстояния x от центра стенки:

$$q_x = q_v x.$$

Из этого следует, что плотность теплового потока в плоской стенке будет равна нулю в центре (начало координат), а на боковых поверхностях достигает своего максимального значения.

Согласно закону теплопроводности Фурье [7, 8]

$$q_x = q_v x = -\lambda \frac{dT}{dx},$$

где $\frac{dT}{dx}$ – скорость изменения температуры.

Разделив переменные, можно определить приращение температуры при минимальном увеличении расстояния от центра стенки как дифференциал:

$$dT = -\frac{1}{\lambda} q_v dx.$$

Проведя интегрирование этого уравнения по x , получим

$$T_x = -\frac{1}{2\lambda} q_v x^2 + C. \quad (1)$$

Постоянную интегрирования C находим из граничных условий. При $x = 0$ $T = T_{\max} = C$, и уравнение (1) примет вид

$$T_x = T_{\max} - \frac{1}{2\lambda} q_v x^2.$$

При $x = \delta$ $T = T_C$, при этом разность температур $T_{\max} - T_C$ определяется как

$$T_{\max} - T_C = q_v \frac{\delta^2}{2\lambda} = q_\delta \frac{\delta}{2\lambda}.$$

Разность $T_{\max} - T_C$ – это перепад температур между серединой и внешними поверхностями тонкопленочного резистора, а $q_\delta = q_v \delta$ – плотность теплового потока на этих поверхностях (при $x = \delta$).

Учитывая вышеизложенное, тепловой поток $Q_{\text{рез}}$, необходимый для нагревания тонкопленочного резистора, можно представить в виде [2, 6, 10]

$$Q_{\text{рез}} = cm \left(\frac{T_{\max} + T_C}{2} - T_0 \right),$$

где $cm = C$ – теплоемкость тела, определенная как произведение удельной теплоемкости вещества на массу тела.

Как было указано выше, теплота внутри тонкопленочного резистора с теплопроводностью λ распространяется перпендикулярно плоскости резистора в направлении от максимальной температуры T_{\max} к минимальной температуре T_C .

При прохождении через резистор импульса тока длительностью Δt происходит нагрев не только середины резистора до температуры T_{\max} , но и внешних поверхностей резистора до температуры T_C , большей чем температура окружающей среды.

Согласно закону теплопроводности Фурье, количество тепла $\Delta Q_{\text{пер}}$, передаваемое за время Δt через площадку S :

$$\Delta Q_{\text{пер}} = -\lambda \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right) S \Delta t = -\Delta P_{\text{пер}} \Delta t,$$

где λ – коэффициент теплопроводности; $\Delta T / \Delta x$ – градиент температуры вдоль нормали (x) к площадке S ; $\Delta P_{\text{пер}}$ – мощность, передаваемая от резистора подложке (основанию, на котором расположен резистор).

Тело, нагретое до температуры большей, чем температура окружающей среды, отдает теплоту в виде излучения электромагнитных волн (непрерывный спектр). Количество теплоты $\Delta Q_{\text{изл}}$, излучаемое единицей поверхности тела S в единицу времени Δt по всем длинам волн, определяется как

$$\Delta Q_{\text{изл}} = -RS \Delta t = -\Delta P_{\text{изл}} \Delta t,$$

где R – светимость или излучательная способность тела; $\Delta P_{\text{изл}}$ – мощность, рассеиваемая поверхностью резистора в окружающую среду.

При этом теплота, передаваемая в тонкопленочном резисторе вверх, путем конвективного переноса и излучения, распространяется в атмосферу. А теплота, передаваемая вниз, расходуется на разогрев нижележащего слоя диэлектрика.

Знак (–) в выражениях показывает, что тепло передается в направлении убывания температуры вдоль нормали x к площадке S .

Формула баланса энергии для импульсно-токовой стабилизации выглядит следующим образом [3, 4, 11]:

$$\frac{U^2}{R} \Delta t = Q_{\text{рез}} + \Delta P_{\text{пер}} \Delta t + \Delta P_{\text{изл}} \Delta t. \quad (2)$$

Из данного уравнения следует: чтобы энергия W , получаемая за счет прохождения электрического тока, использовалась на разогрев резистора для устранения скрытых дефектов и структурные преобразования в резистивном слое, надо уменьшить величины $Q_{\text{пер}}$ и $Q_{\text{изл}}$. Этого можно достичь, уменьшая величину Δt времени воздействия. Однако если мы уменьшим Δt , при этом уменьшится и величина энергии W , которую можно сохранить на прежнем уровне, увеличив величину напряжения, прикладываемого к тонкопленочному резистору.

Из выражения (2) можно вывести соотношение между длительностью импульса $t_{\text{имп}}$ и его амплитудой $U_{\text{имп}}$, создающее количество теплоты, достаточное для структурирования тонкой резистивной пленки

$$t_{\text{имп}} = \frac{Q_{\text{рез}}}{\frac{U_{\text{имп}}^2}{R_{\text{н}}} - P_{\text{пер}} - P_{\text{изл}}},$$

где $U_{\text{имп}}$ – амплитуда импульсов напряжения; $R_{\text{н}}$ – начальное сопротивление резистора; $Q_{\text{рез}}$ – количество теплоты, полученное резистором за время прохождения импульса длительностью $t_{\text{имп}}$; $P_{\text{пер}}$ – мощность, передаваемая от резистора подложке (основанию, на котором он расположен); $P_{\text{изл}}$ – мощность, рассеиваемая поверхностью резистора в окружающую среду.

Расчеты показывают, что при выбранной длительности импульса в 10 мкс температура в центре резистора может достигать (300 ÷ 350) °С в течение импульса. При этом температура на границах раздела слоев увеличится лишь на (1,5 ÷ 1,7) °С. Чтобы вывести соотношение между длительностью импульса $t_{\text{имп}}$ и его амплитудой $U_{\text{имп}}$, обеспечивающими достаточную температуру для образования слоя силицидов на границе раздела слоев и образование оксидного слоя, необходимо учитывать количество теплоты, полученное диэлектриком от резистора за время прохождения импульса длительностью $t_{\text{имп}}$, а также учитывать не только мощность рассеиваемого резистора, но и мощность, рассеиваемую поверхностью диэлектрика в окружающую среду, и мощность, передаваемую от диэлектрика расположенному ниже основанию.

С учетом изложенного, соотношение будет выглядеть следующим образом:

$$t_{\text{имп1}} = \frac{Q_{\text{рез}} + Q_{\text{диэл}}}{\frac{U_{\text{имп1}}^2}{R_{\text{н}}} - (P_{\text{пер}}^1 + P_{\text{изл}}^1 + P_{\text{изл}}^1)},$$

где $t_{\text{имп1}}$ – длительность импульса при проведении третьего этапа обработки; $Q_{\text{диэл}}$ – количество теплоты, полученное диэлектриком от резистора за время прохождения импульса длительностью $t_{\text{имп1}}$; $U_{\text{имп1}}$ – амплитуда импульсов при проведении третьего этапа обработки; $R_{\text{н}}$ – значение сопротивления резистора, полученное после проведения второго этапа обработки; $P_{\text{изл}}^1$ – мощность, рассеиваемая поверхностью диэлектрика в окружающую среду; $P_{\text{пер}}^1$ – мощность, передаваемая от диэлектрика нижерасположенному основанию.

Согласно расчетам, при выбранной длительности импульса в 10 мс температура в центре резистора достигает (270 ÷ 400) °С в течение импульса. При этом температура на границе раздела слоев достигает (220 ÷ 330) °С, которой достаточно для образования силицидов.

Из изложенного можно сделать вывод об основных принципах импульсно-токовой стабилизации: чтобы теплота оставалась внутри тонкопленочного резистора и расходовалась только на структурирование резистивного материала и устранение внутренних дефектов, надо прикладывать напряжение к резистору на короткое время, т.е. импульсом короткой величины, но при этом амплитуду этого импульса надо устанавливать большой. Чтобы образовывать

промежуточный слой силицидов, необходимо увеличить длительность импульсов, но при этом амплитуду импульса уменьшить.

Библиографический список

1. Чебурахин, И. Н. Способ повышения стабильности тонкопленочных тензорезисторов / И. Н. Чебурахин, П. А. Колосов // Датчики и системы. – 2012. – № 10. – С. 23–25.
2. Патент RU 2722213. Способ стабилизации резисторов / Уткин К. Э., Колосов П. А., Торгашин С. И., Степанов С. В. – 2020.
3. Аверин, И. А. Влияние переходных процессов в тонкопленочной гетероструктуре на надежность чувствительных элементов тензорезисторных датчиков давления / И. А. Аверин, И. В. Волохов, Е. А. Мокров, Р. М. Печерская // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 2. – С. 123–124.
4. Поута, Дж. Тонкие пленки, взаимная диффузия и реакции / Дж. Поута, К. Ту, Дж. Мейера. – Москва : Мир, 1982. – 576 с.
5. Болгарский, А. В. Термодинамика и теплопередача / А. В. Болгарский, Г. А. Мухачев, В. К. Щуки. – Москва : Высш. шк., 1975. – 496 с.
6. Кандыба, П. Е. Повышенные импульсные электрические нагрузки в производстве тонкопленочных резисторов / П. Е. Кандыба, П. А. Фоменко // Электронная техника. Сер. VI, Микроэлектроника. – 1971. – Вып. 8 (34). – С. 115–120.
7. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – Изд. 2-е, стереотип. – Москва : Энергия, 1977. – 344 с.
8. Mikhaylov, P. G. Microelectronic Sensors for the Aircraft and Space-Rated Equipment / P. G. Mikhaylov, A. O. Kassimov, M. A. Khizirova // International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJBR). – 2017. – Vol. 8, iss. 4. – P 123–151.
9. Чебурахин, И. Н. Оборудование для пакетной импульсно-токовой стабилизации тонкопленочных тензорезисторов / И. Н. Чебурахин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 14–17.
10. Ozhikenov, K. A. Development of Technologies, Methods and Devices of the Functional Diagnostics of Microelectronic Sensors Parts and Components / K. A. Ozhikenov, P. G. Mikhailov, R. S. Ismagulova // 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (A PEIE). – 2016. – Vol. 1. – P. 62–79.
11. Belozubov, E. M. Problems and basic research directions in the field of thin-film nanoand microelectromechanical systems of pressure sensors / E. M. Belozubov, V. A. Vasil'ev, N. V. Gromkov // Automation and Remote Control. – 2010. – Vol. 72, № 11. – P. 312–344.

References

1. Cheburakhin I. N., Kolosov P. A. *Datchiki i sistema* [Sensors and systems]. 2012, no. 10, pp. 23–25. [In Russian]
2. Patent RU 2722213. *Sposob stabilizatsii rezistorov* [Patent RU 2722213. Method for stabilizing resistors]. Utkin K. E., Kolosov P. A., Torgashin S. I., Stepanov S. V. 2020. [In Russian]
3. Averin I. A., Volokhov I. V., Mokrov E. A., Pecherskaya R. M. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [News of higher educational institutions. Volga region. Technical science]. 2008, no. 2, pp. 123–124. [In Russian]
4. Pouta Dzh., Tu K., Meyera Dzh. *Tonkie plenki, vzaimnaya diffuziya i reaktzii* [Thin films, mutual diffusion and reactions]. Moscow: Mir, 1982, 576 p. [In Russian]
5. Bolgarskiy A. V., Mukhachev G. A., Shchuki V. K. *Termodinamika i teploperedacha* [Thermodynamics and heat transfer]. Moscow: Vyssh. shk., 1975, 496 p. [In Russian]
6. Kandyba P. E., Fomenko P. A. *Elektronnaya tekhnika. Ser. VI, Mikroelektronika* [Electronics. Ser. VI, Microelectronics]. 1971, iss. 8 (34), pp. 115–120. [In Russian]
7. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. *Osnovy teploperedachi* [Basics of heat transfer]. 2nd ed. stereotip. Moscow: Energiya, 1977, 344 p. [In Russian]
8. Mikhaylov P. G., Kassimov A. O., Khizirova M. A. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJBR)*. 2017, vol. 8, iss. 4, pp. 123–151.
9. Cheburakhin I. N. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2017, no. 2 (20), pp. 14–17. [In Russian]
10. Ozhikenov K. A., Mikhailov P. G., Ismagulova R. S. *13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (A PEIE)*. 2016, vol. 1, pp. 62–79.
11. Belozubov E. M., Vasil'ev V. A., Gromkov N. V. *Automation and Remote Control*. 2010, vol. 72, no. 11, pp. 312–344.

Уткин Кирилл Эдуардович

аспирант,
заместитель начальника цеха микроэлектроники,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: utkin.kirill.niifi@gmail.ru

Колосов Павел Александрович

ведущий инженер-технолог,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: pavel.kolosov.54@bk.ru

Цыпин Борис Вульфович

доктор технических наук, профессор,
кафедра ракетно-космического
и авиационного приборостроения
при АО «НИИФИ»,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: cypin@yandex.ru

Макаров Иван Васильевич

аспирант, инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: niifi@sura.ru

Utkin Kirill Eduardovich

postgraduate student,
deputy head of the microelectronics workshop,
Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarsky street, Penza, Russia)

Kolosov Pavel Alexandrovich

leading process engineer,
Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarsky street, Penza, Russia)

Tsypin Boris Vulfovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of rocket-space
and aviation instrument engineering
at JSC "SRIPM",
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Makarov Ivan Vasilievich

postgraduate student, design engineer,
Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarsky street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Уткин, К. Э. Теоретические аспекты импульсно-токовой стабилизации сопротивления тонкопленочных резисторов первичных преобразователей / К. Э. Уткин, П. А. Колосов, Б. В. Цыпин, И. В. Макаров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 4 (34). – С. 58–64. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-4-7.