

УДК 621.316.99+621.319.1

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ЭЛЕКТРОДОВ НА ТЕРМОУПРУГИЕ НАПРЯЖЕНИЯ
В ПТКС-ТЕРМОРЕЗИСТОРАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТОКОВЫХ НАГРУЗОК**

*д-р физ.-мат. наук, доц. В.Н. ШУТ
(Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск)*

Численными методами изучены температурные напряжения в ПТКС-терморезисторах на основе полупроводниковой керамики титаната бария в процессе разогрева электрическим током. Показано, что путем изменения конфигурации (диаметра) электродов терморезисторов можно уменьшать температурные градиенты в керамике и, соответственно, снижать температурные напряжения. В случае если радиус электрода меньше радиуса основания керамического элемента на 200 мкм, температурные напряжения уменьшаются с 80 до 60 МПа. Это позволяет снизить вероятность разрушения терморезисторов по механизму расслоения.

Введение. Терморезисторы с положительным температурным коэффициентом сопротивления (ПТКС) на основе керамики титаната бария, легированной редкоземельными элементами, нашли широкое применение в электротехнике и радиоэлектронике [1; 2]. Физической основой возникновения ПТКС эффекта в таких материалах является изменение высоты зернограницных барьеров Шоттки при фазовом переходе [3]. Во многих случаях ПТКС-терморезисторы (позисторы) используются в силовых цепях в качестве нагревательных, пусковых элементов, в схемах защиты от перегрузок по току и напряжению и др. При этом терморезисторы могут разрушаться в результате воздействий больших токовых нагрузок по механизму расслоения: на две практически равные половинки в плоскости, параллельной электродам [4]. Большие токи вызывают неравномерный разогрев позистора. Причем наибольшие градиенты температур (свыше 40 градусов) реализуются по толщине керамического элемента (вдоль линии тока) и обусловлены аномальным изменением теплоемкости и электросопротивления материала при фазовом переходе, т.е. имеют фундаментальный характер [4; 5]. Вследствие этого в ПТКС-керамике возникают существенные термоупругие растягивающие напряжения (в центре боковой поверхности). Величины этих напряжений могут достигать 100 МПа [6–8], что соизмеримо с пределом прочности полупроводниковой керамики на основе титаната бария 50...100 МПа [9–11].

Важной задачей для разработчиков и производителей ПТКС-терморезисторов является повышение устойчивости позисторов к тепловому удару в процессе нагрева электрическим током. Особый интерес вызывает разработка методов по уменьшению температурных напряжений, так как улучшение механических (прочностных) свойств позисторной керамики без ухудшения электрических характеристик – трудновыполнимая задача. Ранее был предложен способ повышения устойчивости терморезисторов к электрическим нагрузкам, основанный на формировании многослойных структур, в которых приэлектродные слои имеют более высокое удельное сопротивление при температурах ниже фазового перехода, за счет чего обеспечивается выравнивание теплового поля в объеме материала и значительное снижение растягивающих напряжений [12; 13]. Однако для изготовления таких элементов требуется введение дополнительных операций послойного прессования, что усложняет процесс производства.

В данной работе рассмотрен метод коррекции тепловых полей и снижения термоупругих напряжений в ПТКС-терморезисторах, основанный на изменении конфигурации металлических электродов.

Теоретическая модель. Распределение температуры в позисторных элементах рассчитывалось путем совместного решения уравнений теплопроводности и электропроводности [13]. Коэффициент теплоотдачи поверхности принимался равным 50 Вт/(м²·К), температура окружающей среды – 25 °С, приложенное электрическое напряжение – 220 В. Для расчетов температурных напряжений решалась квазистатическая задача термоупругости [6]. Удельное сопротивление позисторной керамики ρ зависит от состава материала, технологических режимов его изготовления, температуры образца и приложенного напряжения (варисторный эффект) [14]. Зависимости удельного сопротивления от температуры и напряженности электрического поля были получены экспериментально (рис. 1).

Исследовались защитные терморезисторы, выпускаемые предприятием ОАО «Витебский завод радиодеталей “МОНОЛИТ”» (температура переключения $T_C = 87$ °С, удельное сопротивление при 25 °С $\rho_{25} = 0,31$ Ом·м). Полученные данные аппроксимировались математическими выражениями и использовались при решении задачи.

Терморезисторы, как правило, являются элементами защиты от перегрузок по току и мощности, которые включаются в электрические схемы последовательно с некоторым нагрузочным (ограничивающим) сопротивлением. Однако наличие ограничивающего сопротивления способствует увеличению тем-

пературных напряжений [12]. Поэтому в настоящей работе рассматривался случай воздействия напряжения 220 В на электрическую цепь, состоящую из терморезистора, последовательно соединенного с балластным сопротивлением. При расчетах значение балластного сопротивления R_d принималось равным 90 и 120 Ом, что соответствует ограничению максимального тока в цепи до 2 и 1,5 А (согласно нормам испытаний термисторов на заводе-изготовителе). При данных значениях балластного сопротивления достигаются максимальные растягивающие напряжения в классическом варианте исполнения ПТКС-термисторов [12].

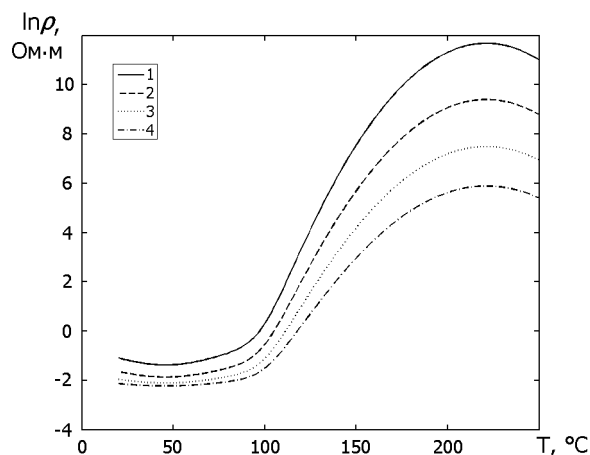


Рис. 1. Температурная зависимость удельного сопротивления позисторной керамики:

- 1 – нулевая напряженность электрического поля;
2 – напряженность электрического поля 100 В/мм; 3 – 200 В/мм; 4 – 300 В/мм

Позисторные элементы, как правило, имеют форму цилиндров, на основания которых нанесены электроды, поэтому удобно выбрать цилиндрическую систему координат (z, r, φ) (рис. 2).

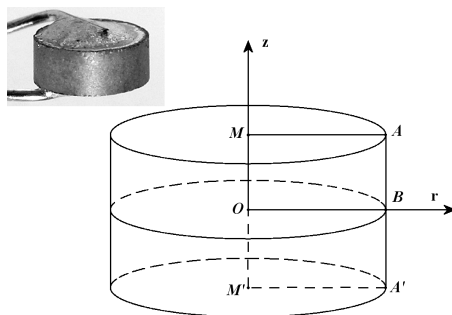


Рис. 2. Схематическое изображение позисторного элемента

При этом вследствие симметрии элемента (свойства не зависят от координаты φ и симметричны относительно плоскости, параллельной электродам и проходящей через центр ($z = 0$)) можно ограничиться рассмотрением случая осевой симметрии (двухмерный случай). Кроме того, симметрия рассматриваемой задачи позволяет провести анализ только для положительных значений координаты z , поскольку результаты для отрицательных значений z могут быть получены зеркальным отражением.

Результаты и их обсуждение. В классическом случае электрод полностью покрывает основание керамического элемента. В настоящей работе рассматривается случай, когда радиус электрода меньше радиуса MA основания керамического элемента. Расстояние от боковой поверхности терморезистора до края электрода принимаем равным h .

На рисунке 3, а приведено распределение температур для классического терморезистора в момент времени, когда достигаются максимальные растягивающие напряжения (для компоненты тензора напряжений τ_z). Процесс нагрева происходит следующим образом. В начальный момент времени происходит быстрый разогрев позистора. Так как температура центральной области превышает температуру на границах, переключение в центре происходит раньше. Экспоненциальная зависимость сопротивления от температуры способствует максимальной теплогенерации в центре элемента, при этом имеет место интенсивный отток тепла из керамики в электрод, что обуславливает формирование высокого температур-

ного градиента ($\Delta T \sim 75^\circ\text{C}$). В дальнейшем, с ростом сопротивления керамики, генерируемая мощность уменьшается, электрод прогревается и температурное поле по толщине терморезистора выравнивается.

В модифицированном варианте терморезистора за счет уменьшения площади электродов позистора в приэлектродных областях плотность электрического тока выше. Теплогенерация в приэлектродных областях керамического элемента в процессе разогрева увеличивается. Вследствие этого характер температурных полей изменяется, а максимальный перепад температур по толщине снижается более чем на 10°C ($\Delta T \sim 60^\circ\text{C}$) при $h = 200$ мкм (рис. 3, б). Это приводит к снижению максимальных напряжений в центре боковой поверхности.

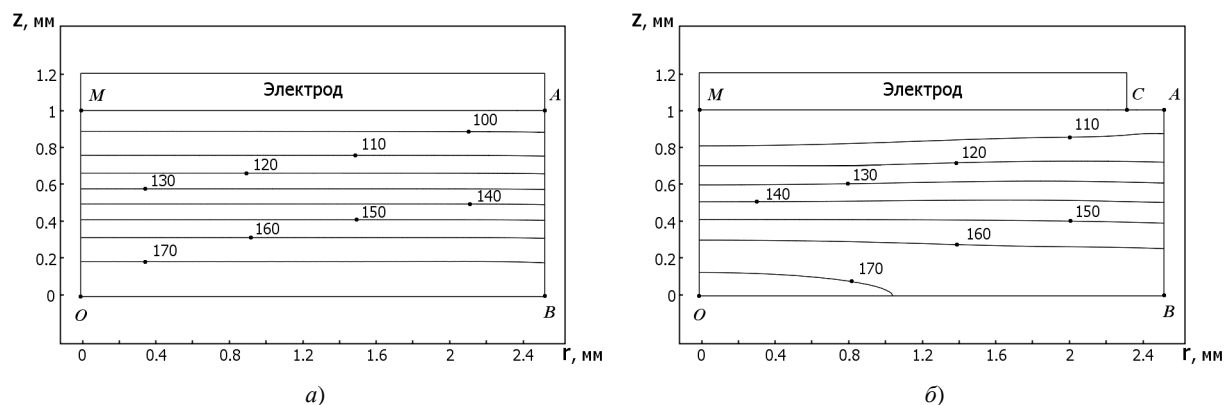


Рис. 3. Распределение температуры T в терморезисторе в момент времени $t = 0,195$ с после приложения напряжения: а – классический вариант; б – модифицированный термистор (цифры у изотерм – значения T ($^\circ\text{C}$), $R_d = 90$ Ом)

Распределение термоупругих напряжений (компоненты тензора напряжений τ_z) для двух типов терморезисторов (для моментов времени, когда величины τ_z максимальны) приведены на рисунке 4.

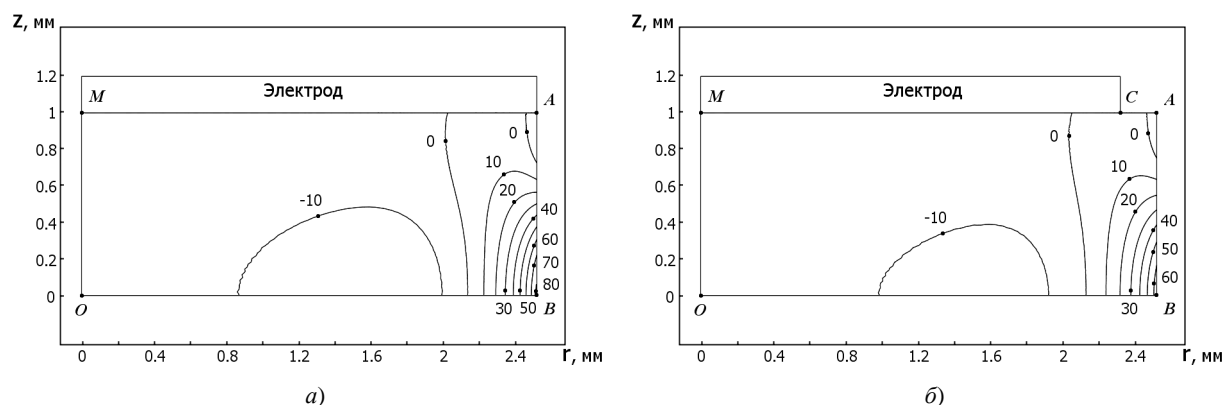


Рис. 4. Распределение температурных напряжений τ_z в терморезисторе в момент времени $t = 0,195$ с после приложения напряжения: а – классический вариант; б – модифицированный термистор (цифры у линий – значения τ_z (МПа), $R_d = 90$ Ом)

Из рисунка видно, что в модифицированных терморезисторах растягивающие напряжения существенно снижаются.

Температурным рельефом и, соответственно, термоупругими напряжениями можно эффективно управлять за счет изменения радиуса электрода.

На рисунке 5 приведены изменения напряжений τ_z в центре боковой поверхности (точка B) от величины параметра h . Величина максимальных растягивающих напряжений начинает заметно уменьшаться уже при $h > 100$ мкм.

При дальнейшем уменьшении радиуса электрода растягивающие напряжения в центре боковой поверхности уменьшаются (в несколько раз). Однако при этом может существенно измениться характер пере-

ключения позистора, особенно при малых значениях балластного сопротивления. Без добавочного сопротивления величина тока, протекающего через позистор, может достигать 16 А, при этом плотность тока максимальна в точке контакта края электрода с керамикой. Соответственно, данная область керамического материала первой достигает температуры T_c . Это приводит к возникновению больших напряжений (более 50 МПа), способных инициировать зарождение и распространение трещин в области электродов.

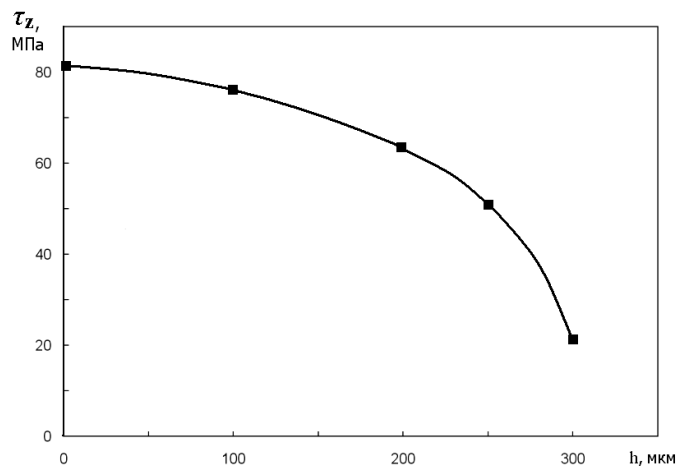


Рис. 5. Зависимость максимума температурных напряжений τ_z в центре боковой поверхности терморезистора от величины параметра h ($R_d = 90$ Ом)

В соответствии с предложенным способом изготовлено 200 терморезисторов (100 – с обычными электродами; 100 – с электродами меньшего диаметра, $h = 200$ мкм). Проведены испытания терморезисторов к воздействию токовых нагрузок.

Методика испытаний

Терморезистор включался последовательно с сопротивлением 90 Ом (сопротивление изготавливалось из нихромовой проволоки). Перед проведением испытаний точно измерялось сопротивление терморезистора. На позисторы (с последовательно включенным сопротивлением) в течение 30 секунд подавали напряжение 220 и 300 В, затем они остывали в нормальных условиях в течение 10 минут. После этого измеряли сопротивление образцов и сравнивали с первоначальным. Отказавшими считали позисторы, сопротивление которых увеличивалось более чем на 10 %.

Последующие исследования таких образцов подтверждали образование в них микротрещин. При повторных электрических нагрузках данные терморезисторы разрушались по механизму расслоения. Для каждого терморезистора испытательный цикл повторялся 100 раз. Результаты испытаний приведены в таблице.

Количество разрушений терморезисторов по механизму расслоения

Терморезисторы	220 В	300 В
	Количество разрушений	
Терморезистор со сплошным электродом	18	29
Терморезистор с электродом меньшего диаметра ($h = 200$ мкм)	11	19

Отметим, что в каждом конкретном случае (номинал терморезистора, величина нагрузочного сопротивления, условия теплообмена и т.д.) возможно оптимизировать размер электрода терморезистора, обеспечивающий снижение напряжений до значений ниже критических (< 50 МПа).

Необходимо подчеркнуть, что в производстве сегнетоэлектрических керамических изделий (конденсаторов, пьезоэлектрических элементов) рассматриваемый технологический прием применяется для повышения пробивного напряжения и устранения краевых эффектов. Однако для снижения температурных напряжений в низкоомных полупроводниковых ПТКС-терморезисторах предложенный принцип не рассматривался.

Закключение. Численными методами изучены температурные напряжения в ПТКС-термисторах на основе полупроводниковой керамики титаната бария при воздействии токовых нагрузок. Показано, что путем изменения конфигурации (диаметра) электродов терморезисторов можно эффективно корректиро-

вать рельеф теплового поля, добиваться значительного снижения температурных напряжений (более чем на 20 %) и повышения устойчивости к электрическим нагрузкам по сравнению с терморезисторами классической формы. Эффективность предложенного метода подтверждена экспериментально.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шефтель, И.Т. Терморезисторы / И.Т. Шефтель. – М.: Наука, 1973.
2. Huybrechts, B. The positive temperature coefficient of resistivity in barium titanate / B. Huybrechts, K. Ishizaki, M. Takata // J. Mater. Sci. – 1995. – V. 30. – P. 2463–2474.
3. Heywang, W. Semiconducting barium titanate / W. Heywang // J. Mater. Sci. – 1971. – Vol. 6. – P. 1214–1226.
4. Dewitte, C. On the mechanism of delamination fracture of BaTiO₃-based PTC thermistors / C. Dewitte, R. Elst, F. Delannay // J. European Ceramic Society. – 1994. – Vol. 14. – P. 481–492.
5. Temperature fields in temperature-sensitive resistors on basis of barium titanate / V.N. Shut [et al.] // Science of materials. – 2005. – № 2. – P. 12–16.
6. Шут, В.Н. Температурные напряжения в полупроводниковой керамике на основе титаната бария / В.Н. Шут, А.В. Гаврилов // ИФЖ. – 2008. – Т. 81, № 3. – С. 596–601.
7. Supancic, P. Mechanical stability of BaTiO₃-based PTC thermistor components: experimental investigation and theoretical modeling / P. Supancic // J. Europ. Ceram. Society. 20 (2000). – P. 2009–2024.
8. Moetakef, P. Electrothermal simulation of barium titanate based PTC thermistor / P. Moetakef, Z.A. Nemati // Materials Science and Engineering. B 133 (2006). – P. 157–166.
9. Blamey, J.M. The effect of processing variables on the mechanical and electrical properties of barium titanate positive temperature coefficient of resistance ceramics / J.M. Blamey, T.V. Parry; I. Additives and processing prior to sintering // J. Mater. Sci. 1993. – Vol. 28. – P. 4311–4316.
10. Blamey, J.M. The effect of processing variables on the mechanical and electrical properties of barium titanate positive temperature coefficient of resistance ceramics. II. Sintering atmospheres / J.M. Blamey, T.V. Parry // J. Mater. Sci. – 1993. – Vol. 28. – P. 4317–4324.
11. Freiman, S.W. Review of Mechanically Related Failures of Ceramic Capacitors and Capacitor Materials / S.W. Freiman, R.C. Pohanka // J. Am. Ceram. – Soc. 1989. – V. 72, № 12. – P. 2258–2263.
12. Шут, В.Н. Температурные напряжения в неоднородных терморезисторах на основе титаната бария / В.Н. Шут, А.В. Гаврилов // ИФЖ. – 2009. – Т. 82, № 5. – С. 981–983.
13. Shut, V.N. Thermal Stresses in Layered Barium Titanate – Based Semiconductor Ceramic / V.N. Shut, A.V. Gavrilov // Technical Physics. – 2008. – Vol. 53, № 11. – P. 1508–1512.
14. Павлов, А.Н. Варисторный эффект в полупроводниковой сегнетокерамике / А.Н. Павлов, И.П. Раевский // ЖТФ. – 1997. – Т. 67, № 12. – С. 21–25.

Поступила 31.07.2014

**INFLUENCE OF ELECTRODE GEOMETRY ON THE TEMPERATURE STRESSES
IN PTC THERMORESISTORS AT CURRENT LOADINGS**

V. SHUT

Temperature stresses in barium-titanate-based thermoresistors in the process of heating by electric current have been investigated by numerical methods. It is shown that by optimizing the electrode design one can decrease temperature gradients and temperature stresses in ceramics. When the electrode radius is less than radius of ceramic element on 200 microns, temperature stresses decrease from 80 to 60 MPa. It allows to reduce probability of mechanical failure of PTC thermistors.