

Влияние конфигурации электродов на термоупругие напряжения в ПТКС терморезисторах

В.Н. Шут*, А.В. Гаврилов*, Д.А. Ильющенко**

**Институт технической акустики НАН Беларуси*

***ОАО «Витебский завод радиодеталей «МОНОЛИТ»*

Численными методами изучены температурные напряжения в ПТКС терморезисторах на основе полупроводниковой керамики титаната бария при воздействии токовых нагрузок. Показано, что путем изменения площади электрода можно добиваться значительного снижения максимальных растягивающих температурных напряжений по сравнению с терморезисторами классической формы.

Ключевые слова: титанат бария, терморезистор, температурное напряжение.

Influence of electrode configuration on thermoresistant stresses in PTC thermoresistors

V.N. Shut*, A.V. Gavrilov*, D.A. Ilyushchenko**

**The Institute of Technical Acoustics of NASB*

***PLC «Vitebsk Plant of Radio Components «MONOLIT»»*

The investigation of temperature stresses in PTC thermistors based on semiconducting ceramics of barium titanate under current loading was carried out. The way of reduction of temperature non-uniformities and temperature stresses is offered. This is based on the proper electrode design. The significant decrease (>20%) of the maximal stresses can be obtained by the optimization of electrode design.

Key-words: barium titanate, thermoresistors, temperature stress.

Терморезисторы с положительным температурным коэффициентом сопротивления (ПТКС) на основе керамики титаната бария, легированной редкоземельными элементами, нашли широкое применение в электротехнике и радиоэлектронике [1]. Физической основой возникновения ПТКС эффекта в таких материалах является изменение высоты зернограницных барьеров Шоттки при фазовом переходе [2]. 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 [3]. 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]. Вследствие этого в позисторной керамике возникают существенные термоупругие растягивающие напряжения. Величины этих напряжений могут дости-

гать 50–80 МПа [5], что соизмеримо с пределом прочности полупроводниковой керамики на основе титаната бария 50–100 МПа [6–8].

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 является трудно выполнимой задачей. 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 обеспечиваются выравнивание теплового поля в объеме материала и значительное снижение растягивающих напряжений [9, 10]. Однако для изготовления таких элементов требуется введение дополнительных операций послойного прессования, что усложняет процесс производства. Целью данной работы является разработка метода коррекции тепловых полей и снижения термоупругих напряжений в ПТКС терморезисторах, основанного на изменении конфигурации металлических электродов.

Теоретическая модель. Распределение температуры в позисторных элементах рассчитывалось путем совместного решения уравнений теплопроводности и электропроводности [10]. Коэффициент теплоотдачи поверхности принимался равным $50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, температура окружающей среды 25°C , приложенное электрическое напряжение 220 В . Для расчетов температурных напряжений решалась квазистатическая задача термоупругости [5]. Удельное сопротивление позисторной керамики ρ зависит от состава материала, технологических режимов его изготовления, температуры образца и приложенного напряжения (варисторный эффект) [11]. Зависимости удельного сопротивления от температуры и напряженности электрического поля были получены экспериментально (рис. 1).

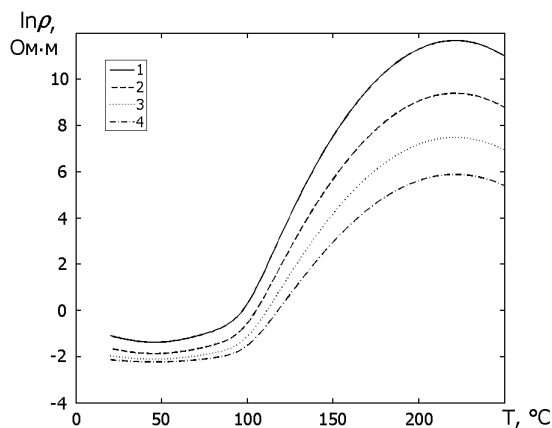


Рис. 1. Температурная зависимость удельного сопротивления позисторной керамики:

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

Исследовались защитные терморезисторы, выпускаемые предприятием ОАО «Витебский завод радиодеталей «МОНОЛИТ»» (температура переключения $T_C = 87^\circ\text{C}$, удельное сопротивление при 25°C $\rho_{25} = 0.31 \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Полученные данные аппроксимировались математическими выражениями и использовались при решении задачи.

Позисторы, 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 температурных напряжений [9]. Поэтому в настоящей работе рас-

сматривался 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 Ом и 120 Ом , что соответствует ограничению максимального тока в цепи до 2 А и 1.5 А (согласно нормам испытаний терморезисторов на заводе-изготовителе). При данных значениях балластного сопротивления достигаются максимальные растягивающие напряжения в классическом варианте исполнения ПТКС-терморезисторов [9].

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

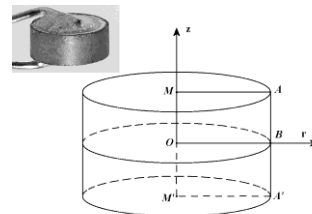


Рис. 2. Схематическое изображение позисторного элемента.

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. Вид электродов терморезисторов, исследованных в настоящей работе, приведен на рис. 3. В классическом случае электрод полностью покрывает основание керамического элемента. Модифицированный терморезистор имеет круглые электроды с радиусом MC , меньшим радиуса MA основания керамического элемента. Обозначим $h = AC$.

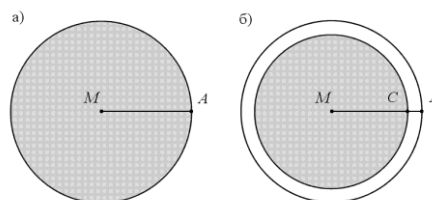


Рис. 3. Вид электродов терморезисторов (а – классический вариант, б – модифицированный терморезистор).

На рис. 4а 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 температурного 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. Теплогенера-

ция 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. 4б). Это приводит к снижению максимальных напряжений в центре боковой поверхности на 20%.

Распределение термоупругих напряжений (компоненты тензора напряжений τ_z) для двух типов терморезисторов (для моментов времени, когда величины τ_z максимальны) приведено на рис. 5. Из данного 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 рис. 6 приведены изменения напряжений τ_z в центре боковой поверхности (точка В) от величины параметра h . Величина максимальных растягивающих напряжений начинает заметно уменьшаться уже при $h > 100$ мкм по сравнению с терморезисторами стандартной формы.

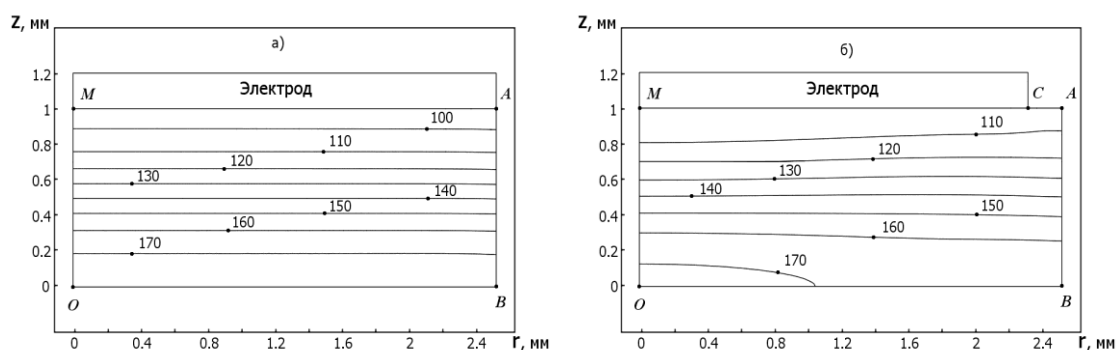


Рис. 4. Распределение температуры T в терморезисторе в момент времени $t = 0.195$ с после приложения напряжения (а – классический вариант, б – модифицированный терморезистор), цифры у изотерм – значения $T(^{\circ}\text{C})$, $R_d = 90$ Ом.

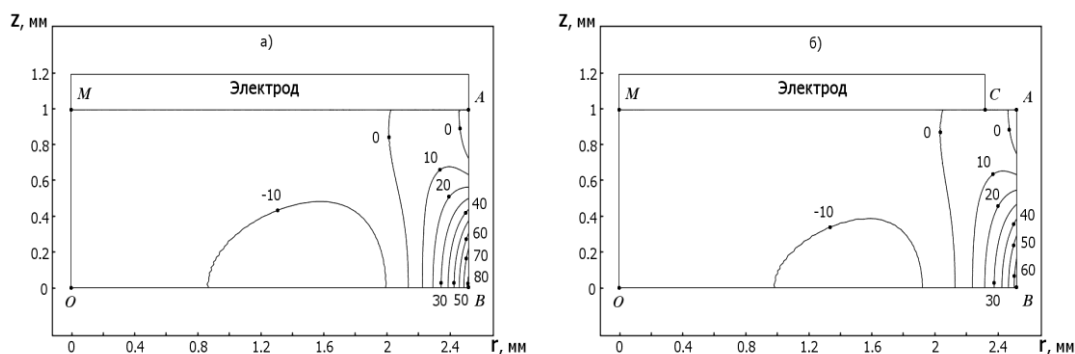


Рис. 5. Распределение температурных напряжений τ_z в терморезисторе в момент времени $t = 0.195$ с после приложения напряжения (а – классический вариант, б – модифицированный терморезистор), цифры у линий – значения τ_z (МПа), $R_d = 90$ Ом.

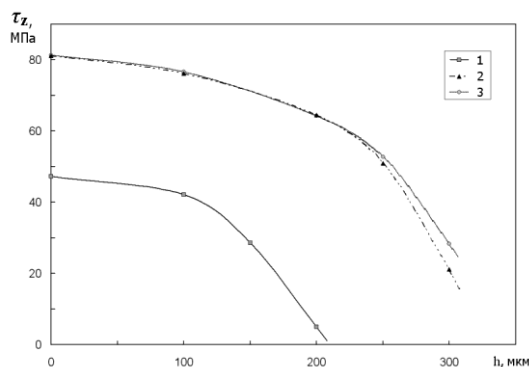


Рис. 6. Зависимость максимума температурных напряжений τ_z в центре боковой поверхности терморезистора от величины параметра h : 1 – для терморезистора без добавочного (балластного) сопротивления R_d , 2 – для терморезистора с $R_d = 90$ Ом, 3 – для терморезистора с $R_d = 120$ Ом.

При дальнейшем уменьшении радиуса электрода растягивающие напряжения в центре боковой поверхности уменьшаются (в несколько раз). Однако при этом может существенно измениться характер переключения позистора, особенно при малых значениях балластного сопротивления. В режиме короткого замыкания (без добавочного сопротивления) величина тока, протекающего через позистор, может достигать 16 А. При этом неоднородности температурного поля непосредственно в приэлектродных областях значительно возрастают, поскольку 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.

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 при-

меняется для повышения пробивного напряжения и устранения краевых эффектов. Однако для снижения температурных напряжений в низкоомных полупроводниковых ПТКС терморезисторов предложенный принцип не рассматривался.

Заключение. Численными методами изучены температурные напряжения в ПТКС терморезисторах на основе полупроводниковой керамики титаната бария при воздействии токовых нагрузок. Показано, что путем изменения конфигурации (диаметра) электродов терморезисторов можно эффективно корректировать рельеф теплового поля, добиваться значительного снижения температурных напряжений (более 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. Heywang, W. Semiconducting barium titanate / W. Heywang // J. Mater. Sci. – 1971. – Vol. 6. – P. 1214–1226.
3. Dewitte, C. On the mechanism of delamination fracture of Ba-TiO₃-based PTC thermistors / C. Dewitte, R. Elst, F. Delannay // J. European Ceramic Society. – 1994. – Vol. 14. – P. 481–492.
4. Shut, V.N. Temperature fields in temperature-sensitive resistors on basis of barium titanate / V.N. Shut, S.R. Syrtsov, E.L. Gavrilenko, A.V. Gavrilov // Science of materials. – 2005. – № 2. – P. 12–16.
5. 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.
6. Blamey, J.M. The effect of processing variables on the mechanical and electrical properties of barium titanate positive temperature coefficient of resistance ceramics. I. Additives and processing prior to sintering / J.M. Blamey, T.V. Parry // J. Mater. Sci. – 1993. – Vol. 28. – P. 4311–4316.
7. 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.
8. 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. – Vol. 72, № 12. – P. 2258–2263.
9. 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.
10. 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.
11. Павлов, А.Н. Варисторный эффект в полупроводниковой сегнетокерамике / А.Н. Павлов, И.П. Раевский // ЖТФ. – 1997. – Т. 67, № 12. – С. 21–25.

Поступила в редакцию 15.04.2010

Адрес для корреспонденции: e-mail: ita@vitebsk.by – Шут В.Н.