

ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕКТРОДОВ НА ТЕРМОУПРУГИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ПТКС ТЕРМОРЕЗИСТОРАХ

Шут В. Н.^{1,2}, Гаврилов А. В.¹, Ильющенко Д. А.³

1) ИТА НАН Беларуси, Витебск

2) Витебский государственный университет им. П.М. Машерова. Витебск

3) ОАО «Витебский завод радиодеталей «МОНОЛИТ»

Введение

Терморезисторы с положительным температурным коэффициентом сопротивления (ПТКС) на основе керамики титаната бария, легированной редкоземельными элементами нашли широкое применение электротехнике и радиоэлектронике [1, 2]. Физической основой возникновения ПТКС эффекта в таких материалах является изменение высоты зерно-границных 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 позисторной керамике возникает существенные термоупругие растягивающие напряжения. 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 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 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 $50 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, температура окружающей среды 25°C , 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. Исследовались защитные терморезисторы,

выпускаемые предприятием ОАО «Витебский завод радиодеталей «МОНОЛИТ»» (температура переключения $T_C = 87^\circ\text{C}$, удельное сопротивление при 25°C $\rho_{25} = 0.31 \text{ Ом м}$). 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 [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 Ом и 120 Ом, что соответствует ограничению максимального тока в цепи до 2 А 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].

Позисторные элементы, как правило, имеют форму цилиндров, на основания которых нанесены электроды. Поэтому удобно выбрать цилиндрическую систему координат (z, r, φ) (рис. 1). 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 рассмат-

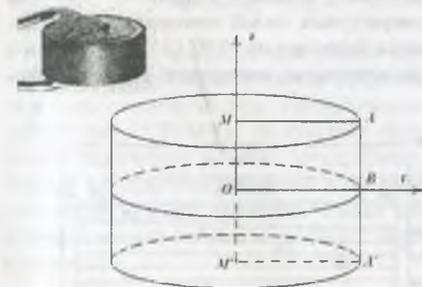


Рис. 1. Схематическое изображение позисторного элемента.

риваемой 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. 2. В классическом случае электрод полностью покрывает основание керамического элемента. Модифицированный терморезистор имеет круглые электроды с радиусом MC меньшим радиуса MA основания керамического элемента. Обозначим $h = AC$.

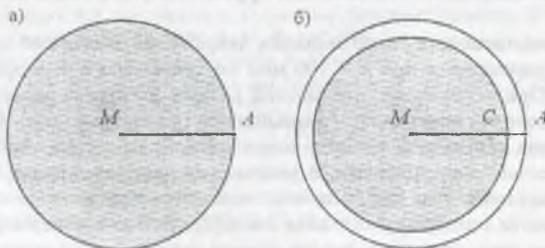


Рис. 2. Вид электродов терморезисторов (а – классический вариант, б – модифицированный термистор).

На рис. 3а 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. 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. 3б). Это приводит к снижению максимальных напряжений в центре боковой поверхности на 20%.

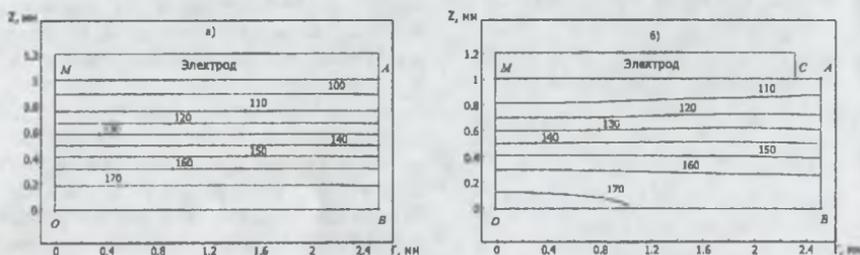


Рис. 3. Распределение температуры T в терморезисторе в момент времени $t = 0.195$ с после приложения напряжения (а – классический вариант, б – модифицированный термистор), цифры у изотерм – значения $T(^\circ\text{C})$, $R_d = 90$ Ом.

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

Величина максимальных растягивающих напряжений зависит от параметра h и начинает заметно уменьшаться при $h > 100$ мкм по сравнению с терморезисторами стандартной формы. 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 16А. 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.

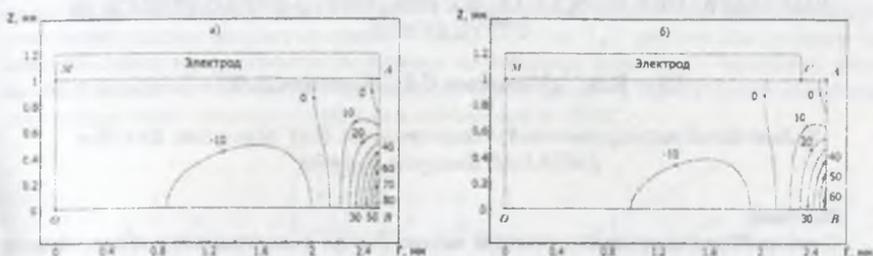


Рис. 4. Распределение температурных напряжений τ_z в терморезисторе в момент времени $t = 0.195$ с после приложения напряжения (а – классический вариант, б – модифицированный терморезистор), цифры у линий – значения τ_z (МПа), $R_{\Sigma} = 90$ Ом.

Отметим, что в каждом конкретном случае (номинал терморезистора, величина нагруженного 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 терморезисторов предложенный принцип не рассматривался.

Закключение

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, добиваясь значительного снижения температурных напряжений (более 20%) и повышения устойчивости к электрическим нагрузкам по сравнению с терморезисторами классической формы. Эффективность предложенного метода подтверждена экспериментально.

Список литературы

1. И.Т. Шефтель. Терморезисторы. – М. «Наука», 1973.
2. В. Huybrechts, K. Ishizaki, M. Takata. J. Mater. Sci. 1995. V 30. P. 2463–2474.
3. W. Heywang. J. Mater. Sci. – 1971. – Vol. 6. – P. 1214–1226.
4. C. Dewitte, R. Elst, F. Delannay. J. European Ceramic Society. 1994. Vol. 14. P. 481–492.
5. V.N. Shut, S.R. Syrtsov, E.L. Gavrilenko, A.V. Gavrilov. Science of materials. 2005. № 2. P. 12–16.
6. В.Н. Шут, А.В. Гаврилов. ИФЖ. 2008. Т 81, № 3. С. 596–601
7. P. Supancic. J. Europ. Ceram. Society. 20 (2000). P. 2009–2024.
8. P. Moetakef, Z.A. Nemati. Materials Science and Engineering. B 133 (2006). P. 157–166.
9. J.M Blamey, T.V Parry. J. Mater. Sci. 1993. Vol. 28. P. 4311–4316.
10. J.M Blamey, T V Parry. J. Mater. Sci. 1993. Vol. 28. P. 4317–4324.
11. S.W. Freiman, R.C. Pohanka. J. Am. Ceram. Soc. 1989. V 72, № 12. P. 2258–2263.
12. В.Н. Шут, А.В. Гаврилов. ИФЖ. 2009. Т 82, № 5. С. 981–983.
13. V.N. Shut, A.V. Gavrilov. Technical Physics. 2008. Vol. 53, № 11. P. 1508–1512.
14. А. Н. Павлов, И. П. Раевский. ЖТФ. 1997. Т 67, № 12. С. 21–25.