

РАССЛОЕНИЕ ПТКС КЕРАМИКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Шут В. Н., Гаврилов А. В.

ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», Витебск, Беларусь,
shuf@vitebsk.by

Введение

Полупроводниковая керамика на основе титаната бария обладает свойством аномального увеличения удельного сопротивления выше температуры Кюри (T_c). Это явление известно как положительный температурный коэффициент сопротивления (ПТКС). Согласно модели Хейванга, данный эффект связан с формированием барьерных слоев на границах зерен выше температуры Кюри [1]. Термисторы ПТКС-типа (позисторы), на основе полупроводниковой керамики титаната бария широко применяются в качестве устройств защиты, нагревательных элементов, температурных датчиков [2]. В случае воздействия больших токовых нагрузок возможно механическое разрушение терморезисторов, причиной которого являются значительные температурные градиенты в образцах. Известны три основных типа механического разрушения [3–5]: формирование нерегулярной сети трещин, перпендикулярных к основным поверхностям; формирование трещин на боковой поверхности диска или на периферии электродов; разрушение путем распространения трещины по плоскости, параллельной электродам, когда позистор раскалывается на две почти равные половинки. Первые два связаны с неоднородностями и дефектами керамики и, как правило, зависят от качества производства образцов. Последний тип разрушения (его называют эффектом “расслоения”) вызван более фундаментальными причинами, а именно, температурными напряжениями, и может наблюдаться даже в отсутствии неоднородностей керамики.

В ряде работ [5–8] были выполнены теоретические и экспериментальные исследования температурных полей в позисторных элементах. В частности, было показано, что различие температур между центром и поверхностью позистора может достигать 20–40°C. Температурные напряжения наиболее полно описаны в [5]. Согласно результатам, полученным в данной работе, максимальные растягивающие напряжения в однородной керамике составляют порядка 15 МПа, когда терморезистор достигает стационарного состояния. Предельные растягивающие напряжения для позисторной керамики имеют величину порядка 50–100 МПа [9, 10]. Поэтому для объяснения эффекта расслоения необходимо более детальное изучение температурных напряжений, возникающих в терморезисторах, при воздействии значительных токовых нагрузок. Целью данной работы является исследование температурных напряжений в позисторных элементах при воздействии токовых нагрузок.

Теоретическая модель

Для рассматриваемых размеров позисторных элементов перемещения вследствие теплового расширения не значительны. Поэтому силами инерции можно пренебречь и ограничиться рассмотрением квазистатической задачи термоупругости. Влияние деформации, вследствие теплового расширения, на температурное поле также не значительно [11]. Так как защитные позисторы, как правило, имеют форму цилиндров, на

основания которых наносятся электроды, то удобно выбрать цилиндрическую систему координат (z, r, φ) . 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. Причем достаточно рассмотреть половину пьезостора, так как его вторая половина может быть получена зеркальным отражением. Механические напряжения в теории упругости описываются для трехмерного пространства с помощью тензора второго ранга, состоящего из шести компонент. При осевой симметрии ненулевыми будут лишь следующие компоненты: $\tau_r, \tau_z, \tau_{rz} = \tau_{zr}, \tau_\varphi$. Для определения тензора напряжений (а так же четырех ненулевых компонент тензора деформаций $\epsilon_z, \epsilon_r, \epsilon_{rz} = \epsilon_\varphi$ и двух компонент вектора перемещения u_r, u_z) необходимо решить систему десяти уравнений [11–13].

Первые два уравнения (статические уравнения) могут быть получены из условия равновесия:

$$\frac{\partial \tau_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\tau_r - \tau_\varphi}{r} - F_r = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} - F_z = 0. \quad (2)$$

Закон Гука позволяет получить ещё четыре уравнения (физические уравнения):

$$\tau_z = \lambda(\epsilon_z + \epsilon_r + \epsilon_\varphi) + 2\mu\epsilon_z, \quad (3)$$

$$\tau_r = \lambda(\epsilon_z + \epsilon_r + \epsilon_\varphi) + 2\mu\epsilon_r, \quad (4)$$

$$\tau_\varphi = \lambda(\epsilon_z + \epsilon_r + \epsilon_\varphi) + 2\mu \frac{u_r}{r}, \quad (5)$$

$$\tau_{rz} = \mu\epsilon_{rz}. \quad (6)$$

Компоненты тензора деформаций и вектора перемещения связаны формулами Коши (геометрические уравнения), которые имеют вид:

$$\epsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad (7)$$

$$\epsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad (8)$$

$$\epsilon_\varphi = \frac{u_r}{r}, \quad (9)$$

$$\epsilon_{rz} = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z}. \quad (10)$$

С учетом влияния температуры на механические напряжения вследствие теплового расширения (сжатия) керамики уравнения (3-5) примут вид:

$$\tau_z = \lambda(\epsilon_z + \epsilon_r + \epsilon_\varphi) + 2\mu\epsilon_z - (3\lambda + 2\mu)\epsilon^T, \quad (11)$$

$$\tau_r = \lambda(\epsilon_z + \epsilon_r + \epsilon_\varphi) + 2\mu\epsilon_r - (3\lambda + 2\mu)\epsilon^T, \quad (12)$$

$$\tau_\varphi = \lambda(\epsilon_z + \epsilon_r + \epsilon_\varphi) + 2\mu \frac{u_r}{r} - 3\lambda\epsilon^T. \quad (13)$$

Если зависимость относительного удлинения от температуры не подчиняется линейному закону (что справедливо для керамики титаната бария в области фазового перехода [3]), необходимо использовать следующее выражение [13]:

$$\epsilon^T = \int_{T_0}^T \alpha(T) dT. \quad (14)$$

Распределения температур для позисторных элементов на основе полупроводниковой керамики титаната бария при воздействии токовых нагрузок были получены ранее на основе решения уравнений теплопроводности [7, 8].

Силовые граничные условия выбирались из предположения, что поверхность позисторного элемента не подвергается воздействию внешних сил:

$$\tau_r(z, D/2, t) = f_r = 0, \quad (15)$$

$$\tau_z(h/2, r, t) = f_z = 0, \quad (16)$$

В силу симметрии рассматриваемой задачи, задавались следующие кинематические граничные условия:

$$\text{для оси симметрии } r = 0 \quad u_r(z, 0, t) = 0, \quad (17)$$

$$\text{для плоскости симметрии } z = 0 \quad u_z(0, r, t) = 0. \quad (18)$$

Таким образом, уравнения (1), (2), (6)–(18) позволяют определить механические напряжения в материале. Однако нахождение аналитического решения данной системы уравнений затруднительно. Поэтому для случая позисторной керамики на основе титаната бария, когда в области температуры фазового перехода коэффициент теплового расширения является функцией температуры, использовался метод конечных элементов (система FEMLAB).

Результаты и их обсуждение

Для расчетов температурных напряжений были проведены измерения характеристик защитных позисторных элементов, выпускаемых РУП «Монолит». На рис. 1 приведены температурные зависимости удельного сопротивления для терморезистора с температурой переключения $T_C = 87^\circ\text{C}$ и удельным сопротивлением $\rho_{25} = 0,31 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Видно, что варисторный эффект (изменение удельного сопротивления от напряженности электрического поля) значительно влияет на величину удельного сопротивления и, следовательно, на теплофизические процессы. Поэтому для моделирования аппроксимировались зависимости удельного сопротивления от температуры с учетом данного эффекта.

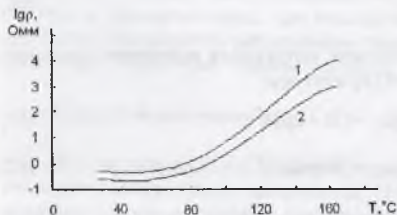


Рис. 1. Температурная зависимость удельного сопротивления защитной позисторной керамики: 1 — нулевая напряженность электрического поля; 2 — напряженность электрического поля 100 В/мм

Известно, что механическая прочность сегнетоэлектрической керамики при растяжении практически на порядок меньше, чем при сжатии [9]. Поэтому причиной разрушений керамических образцов, как правило, являются растягивающие напряжения. На рис. 2 приведено распределение механических напряжений τ_z для момента времени $t = 0,13$ с, когда растягивающие напряжения максимальны.

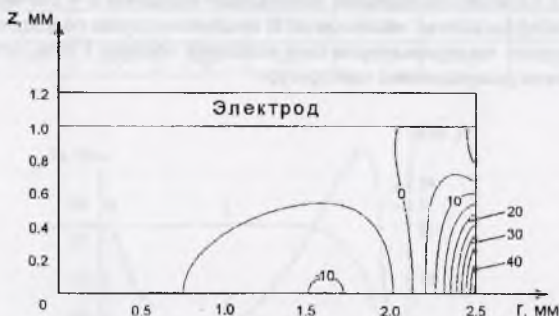


Рис. 2. Распределение температурных напряжений τ_z по образцу

Видно, что максимальные растягивающие напряжения концентрируются у центра боковой поверхности терморезистора, а их величина может достигать 50 МПа. Критические растягивающие напряжения для полупроводниковой керамики на основе титаната бария составляют 50–100 МПа [9, 10], что соизмеримо с рассчитанными значениями.

Как правило, терморезисторы разрушаются по механизму расслоения за несколько циклов включения–выключения. После каждого цикла фиксируется увеличение сопротивления при комнатной температуре. При этом на боковой поверхности наблюдается образование трещин (рис. 3), что согласуется с результатами расчетов.

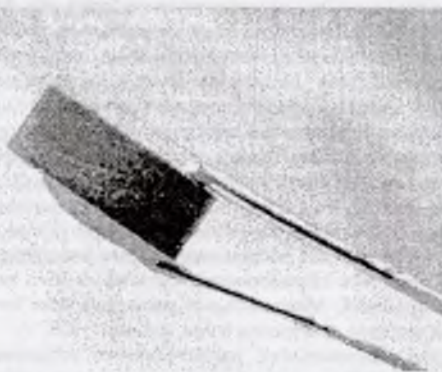


Рис. 3. Фотография боковой поверхности с трещиной для позистора после нескольких циклов включения-выключения

Величина растягивающих напряжений τ_z зависит от ряда факторов: толщины электродов, интенсивности теплообмена с окружающей средой (коэффициента теплоотдачи поверхности), геометрии и свойств керамики (температуры переключения T_C и удельного сопротивления ρ). На рис. 4 приведены значения напряжений τ_z в центре боковой поверхности в различные моменты времени после приложения напряжения для терморезисторов с оловянно-свинцовыми электродами толщиной $d = 200$ мкм и без них при различных коэффициентах теплоотдачи. В последнем случае подразумевается наличие тонкопленочного токопроводящего слоя толщиной порядка 1 мкм, который не оказывает влияния на распределение температур.

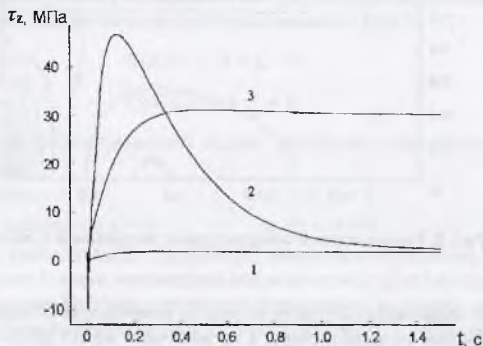


Рис. 4. Зависимость величины температурных напряжений от времени в центре боковой поверхности терморезистора: 1 – для безэлектродного позистора ($\sigma = 50$ Вт/(м²·К); 2 – для позистора с электродом ($\sigma = 50$ Вт/(м²·К); 3 – для безэлектродного позистора ($\sigma = 800$ Вт/(м²·К);

Скачок напряжений в первые десятки миллисекунд связан с изменением знака коэффициента теплового расширения титаната бария при фазовом переходе и не превышает минус 10 МПа. При отсутствии оловянно-свинцовых электродов величина растягивающих напряжений существенно зависит от коэффициента теплоотдачи и практически не изменяется после достижения максимального значения. Даже при больших значениях коэффициента теплоотдачи поверхности $\sigma = 800$ Вт/(м²·К) (что соответствует случаю работы терморезисторов в составе тепловентиляторов) величина $\tau_z \sim 30$ МПа.

Растягивающие напряжения τ_z в позисторах с электродами достигают максимальной величины во временном интервале 100–200 мс после приложения электрического напряжения. Это связано с интенсивным отбором тепла из керамики в электрод, способствующим формированию высокого температурного градиента. В стационарном состоянии после прогрева достаточно толстого электрода температурное поле по толщине терморезистора выравнивается, следствием чего является уменьшение растягивающих напряжений. Максимальные растягивающие напряжения могут превышать 50 МПа при толщине электродов более 200 мкм (табл. 1).

Значение максимального растягивающего напряжения τ_z определяется так же свойствами полупроводниковой керамики (температурой переключения, величиной удельного сопротивления). С увеличением удельного сопротивления напряжения уменьшаются (рис. 5).

Таблица 1. Величина максимальных температурных напряжений τ_z (МПа) позисторов с температурой переключения 87°C .

d , мкм	0	25	50	100	150	200	250	300
ρ_{25} , Ом·м								
0,62	1,86	20,1	27,6	35,4	40,6	44,4	47,4	52,8
0,31	1,90	22,9	29,4	37,1	44,0	46,7	50,0	54,6
0,16	1,95	24,4	30,8	38,5	47,8	49,9	52,3	58,6

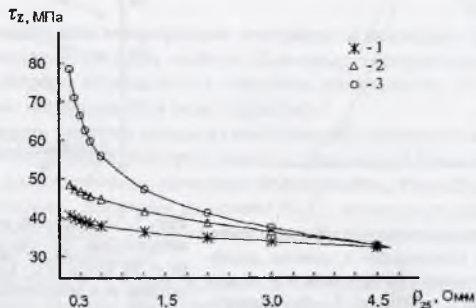


Рис. 5. Зависимость величины температурных напряжений от удельного сопротивления: 1 – для позистора без электрода ($\sigma = 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$); 2 – для позистора с электродом ($\sigma = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$); 3 – для позистора с электродом и с добавочным сопротивлением ($\sigma = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$)

Обычно терморезисторы ПГКС-типа являются элементами защиты от перегрузок по току и мощности. Поэтому они включаются в электрические схемы последовательно с некоторым нагрузочным сопротивлением. Аналогично, при испытаниях в электрическую цепь последовательно с защитным позистором включается балластное сопротивление ($R = 90 \text{ Ом}$), ограничивающее ток до 2 А. Наличие ограничивающего сопротивления способствует увеличению температурных напряжений (рис. 5, кривая 3). Эффект добавочного сопротивления заключается в следующем: при ограничении тока в цепи процесс разогрева терморезистора замедляется, в результате увеличивается неоднородность температурного поля вследствие оттока тепла из более глубоких приэлектродных областей керамики (рис. 6). Большая неоднородность температурного поля приводит к большим значениям температурных напряжений.

С увеличением температуры переключения перепад температур по толщине образцов возрастает [7], что приводит к росту максимальных растягивающих напряжений (рис 7).

Заключение

Изучены температурные напряжения в терморезисторах ПГКС-типа в процессе разогрева электрическим током. Установлено, что максимальное растягивающее напряжение концентрируется у центра боковой поверхности терморезистора, а их вели-

чина возрастает с уменьшением удельного сопротивления и ростом температуры переключения. В случае наличия оловянно-свинцовых электродов (толщиной 200 мкм и более) значения растягивающих напряжений могут превышать 50 МПа, что соизмеримо с критическими значениями для полупроводниковой керамики на основе титаната бария. Таким образом, на основании численных экспериментов дано объяснение причин разрушения терморезисторов по механизму расслоения.

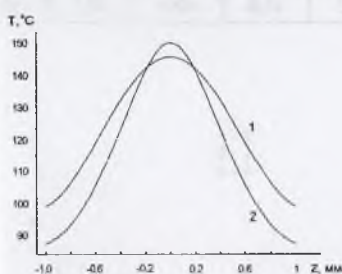


Рис. 6. Распределение температуры по толщине позистора с электродами в момент достижения максимальных растягивающих напряжений ($D = 5\text{ мм}$; $d = 200\text{ мкм}$): 1 – без балластного сопротивления ($t = 0,13\text{ с}$); 2 – с балластным сопротивлением 90 Ом ($t = 0,2\text{ с}$)

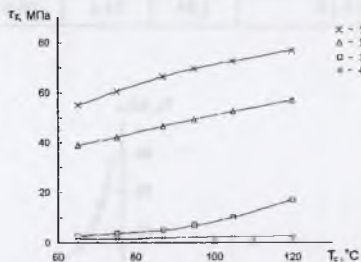


Рис. 7. Зависимость величины температурных напряжений от температуры переключения ($\sigma = 50\text{ Вт}/(\text{м}^2\text{ К})$): 1 – для позистора с электродом и с добавочным сопротивлением; 2 – для позистора с электродом и без добавочного сопротивления; 3 – для позистора без электрода и с добавочным сопротивлением; 4 – для позистора без электрода и без добавочного сопротивления

Список литературы

1. W. Heywang. Semiconducting Barium Titanate// J.Mater. Science. 1971. Vol. 6. Pp.1214-1226.
2. Полупроводники на основе титаната бария. М.: Энергоиздат, 1982.
3. Kulwicki В. М. Instabilities in PTC resistors// In Proc. 6th Internat. Symposium on the Applications of Ferroelectrics. IEEE, Bethlehem, PA, 1986. Pp. 656-664.
4. Ford R. and Kahn M., Positive temperature coefficient resistor as high power pulse switches// In Proc. 6th Internat. Symposium on the Applications of Ferroelectrics. IEEE, Bethlehem, PA, 1986. Pp. 669-672.
5. Dewitte C., Elst R., and Delannay F. On the mechanism of delamination fracture of BaTiO₃-based PTC thermistors// J. European Ceramic Society. 1994. Vol. 14. Pp. 481-492.
6. Smith D.S., Ghayoub N., Charissou I., Bellon O., Abelard P. Transient Thermal Gradients in barium titanate positive temperature coefficient (PTC) Thermistors// J. Am. Ceram. Soc. 1998. Vol. 81, №7. Pp.1789-1796.
7. Шут В. Н., Гавриленко Е. Л., Гаврилов А. В. Температурные поля в терморезисторах на основе титаната бария// Материаловедение. 2005. № 2. С. 12-16.
8. Шут В. Н., Гаврилов А. В. Распределение температуры в окрестности дефектов в полупроводниковой керамики на основе титаната бария// ИФЖ. 2007. Т. 80, № 4. С.
9. Писаренко Г. Г. Прочность пьезокерамики. Киев: Наук. думка, 1987.
10. Freiman S. W., Pohanka R. C. Review of Mechanically Related Failures of Ceramic Capacitors and Capacitor Materials// J. Am. Ceram. Soc. 1989. Vol. 72, № 12, Pp 2258-2263.
11. Боли Б. и Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. М.: Мир, 1964.
12. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1975.
13. Подстригач Я. С. Неустойчившиеся температурные поля и напряжения в тонких пластинках. К.: Наук. думка, 1972.