

$\|P(z)\| = \left\| \frac{1}{z} + c \right\|$ на произвольном прямоугольнике, не содержащем точку $z = 0$.

Список литературы

1. Дзядык, В.К. Введение в теорию равномерного приближения функций полиномами. – Наука, 1977. – 511 с.
2. Иоффе, А.Д. Теория экстремальных задач /А.Д. Иоффе, В.М. Тихомиров. – М.: Наука, 1976. – 480 с.

МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПТКС ТЕРМОРЕЗИСТОРАХ

В.Н. Шут^{1, 2}, А.В. Гаврилов¹, Д.А. Ильющенко³

¹Витебск, ИТА НАН Беларуси

²Витебск, ВГУ имени П.М. Машерова

³Витебск, ОАО ВЗРД «МОНОЛИТ»

Терморезисторы с положительным температурным коэффициентом сопротивления (ПТКС) на основе керамики титаната бария, легированной редкоземельными элементами нашли широкое применение электротехнике и радиоэлектронике [1]. Физической основой возникновения ПТКС эффекта в таких материалах является изменение высоты зернограницных барьеров Шоттки при фазовом переходе. 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 [2]. 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. Вследствие этого, в позисторной керамике возникают существенные термоупругие растягивающие напряжения. Величины этих напряжений могут достигать 100 МПа [3, 4], что соизмеримо с пределом прочности полупроводниковой керамики на основе титаната бария 50-100 МПа [5].

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 [6]. 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 напряже-

ний в ПТКС терморезисторах, основанный на изменении конфигурации металлических электродов.

Результаты и их обсуждение. Распределение температуры в позисторных элементах рассчитывалось путем совместного решения уравнений теплопроводности и электропроводности [6]. Коэффициент теплоотдачи поверхности принимался равным $50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, температура окружающей среды $25 \text{ }^\circ\text{C}$, приложенное электрическое напряжение 220 В . Для расчетов температурных напряжений решалась квазистатическая задача термоупругости. Удельное сопротивление позисторной керамики ρ зависит от состава материала, технологических режимов его изготовления, температуры образца и приложенного напряжения (варисторный эффект). 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 $\rho_{25} = 0.31 \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Полученные данные аппроксимировались математическими выражениями и использовались при решении задачи.

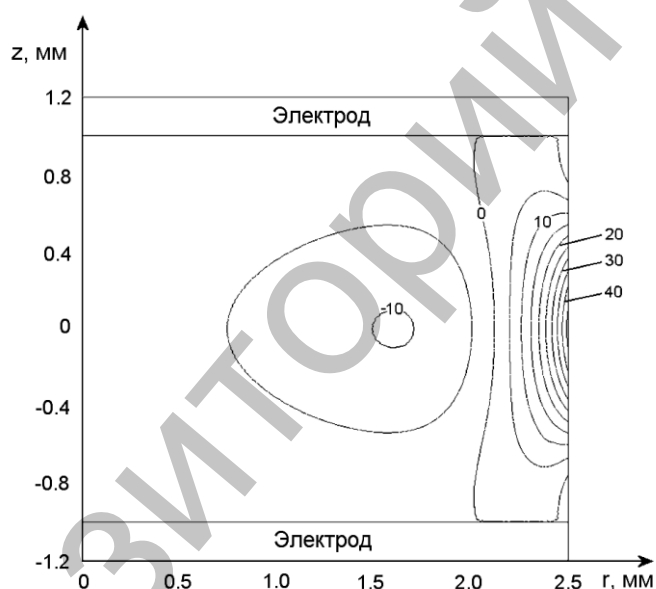


Рис. 1. Распределение температурных напряжений τ_z (МПа) в терморезисторе

На рисунке 1 приведено распределение растягивающих напряжений в терморезисторе при воздействии напряжения 220 В [31].

Видно, что максимальные растягивающие напряжения концентрируются у центра боковой поверхности терморезистора, а их величина достигает 50 МПа . При включении в цепь балластного сопротивления τ_z возрастает до 70 МПа . Критические растягивающие напряжения для полупроводниковой керамики на основе титаната бария составляют $50\text{-}100 \text{ МПа}$, что соизмеримо с рассчитанными значениями.

Величина растягивающих напряжений τ_z зависит от ряда факторов: толщины электродов, интенсивности теплообмена с окружающей средой (коэффициента теплоотдачи поверхности), свойств керамики [3]. Напряжения возрастают с увеличением толщины электродов и уменьшением удельного сопротивления образцов (таблица 1).

Таблица 1. Максимальные растягивающие напряжения τ_z (МПа) в однородных терморезисторах ($T_C = 87^\circ\text{C}$)

ρ при 25°C , (Ом·м)	Толщина электрода, мкм							
	1.0	25	50	100	150	200	250	300
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

Из данных, приведенных в таблице видно, что толщина электрода, является ключевым параметром, определяющим значение растягивающих напряжений.

В настоящее время защитные терморезисторы выпускаются, в основном, в «выводном варианте». Электродные композиции формируются следующим образом. На керамический терморезистор наносится тонкий слой серебряной пасты (10-20 мкм) с последующим ее вжиганием – омические контакты. Затем к заготовке прикрепляются выводные контакты из металлической проволоки, и производится кратковременное погружение изделия в расплав оловянно-свинцового припоя. После застывания припоя суммарная толщина электрода составляет порядка 150-200 мкм. Т.е. при воздействии электрических нагрузок в таких терморезисторах температурные напряжения соизмеримы с критическими, при которых велика вероятность расслоения.



Рис.2. Терморезисторы с двухслойными контактами

На основании приведенных результатов был предложен следующий способ уменьшения напряжений в терморезисторах. Омические контакты имеют двухслойную структуру (рис.2). Первый подслой, контактирующий с поверхностью термочувствительного элемента, выполнен из материала, не смачиваемого припоем. На него наносится основной электрод, вжиганием пасты на основе Ag. Паста на основе Ag наносилась по трафарету в виде круга и по площади меньше подслоя. В этом случае при формировании выводных контактов путем погружения изделия в расплав оловянно-свинцового припоя, припоем смачивается только серебряная паста. Соответственно суммарная толщина электрода на периферийной части терморезистора определяется только толщиной первого подслоя.

Растягивающие напряжения в предложенной конструкции не превышают 20 МПа. Изготовление терморезистора по предлагаемой модели позволило устранить брак, вызванный температурными напряжениями в процессе нагрева электрическим током и довести выход годных терморезисторов до 100 %.

Растягивающие напряжения в предложенной конструкции не превышают 20 МПа. Изготовление терморезистора по предлагаемой модели позволило устранить брак, вызванный температурными напряжениями в процессе нагрева электрическим током и довести выход годных терморезисторов до 100 %.

Закключение. Разработан терморезистор, содержащий терморезистивный чувствительный элемент, выполненный из полупроводниковой керамики на основе титаната бария и двухслойные омические контакты, сформированные из подслоя, контактирующего с поверхностью термочувствительного элемента (подслой выполнен из материала, не смачиваемого припоем) и основного электрода нанесенного на подслой. Изготовление терморезистора по предлагаемой модели поз-

волило устранить расслоение (растрескивание) терморезисторов, вызываемое температурными напряжениями в процессе нагрева электрическим током.

Список литературы

1. Huybrechts B., Ishizaki K., Takata M.. Mater J. Sci. 1995. V. 30. P. 2463–2474.
2. Dewitte C., Elst R., Delannay F. J. European Ceramic Society. 1994. Vol. 14. P. 481–492.
3. Шут В.Н., Гаврилов А.В ИФЖ. 2008. Т. 81, № 3. С. 596–601.
4. Supancic P. J. Europ. Ceram. Society. 20 (2000). P. 2009-2024.
5. Freiman S.W., Pohanka R.C.. J. Am. Ceram. Soc. 1989. V. 72, № 12. P. 2258–2263.
6. Шут В.Н., Гаврилов А.В.. ИФЖ. 2009. Т. 82, № 5. С. 981–983.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОИСТЫХ КРИСТАЛЛОВ ТГС - ТГС:Сr

В.Н. Шут^{1,2}, С.Е. Мозжаров¹, И.Ф. Кашевич²
¹Витебск, ВГУ имени П.М. Машерова
²Витебск, ИТА НАН Беларуси

Исследования процессов переключения в сегнетоэлектрических кристаллах под действием внешнего переменного поля позволяют получить данные о величине спонтанной поляризации, коэрцитивного поля, а также дают возможность косвенно судить о характере и динамике доменной структуры. Например, униполярность доменной структуры проявляется в несимметричности процессов переключения по отношению к знаку приложенного поля (петли диэлектрического гистерезиса смещены или искажены относительно осей приложенного поля и поляризации), в наличии внутреннего поля смещения и т.п. Увеличение коэрцитивного поля E_c , снижение величины переключаемой поляризации P_s свидетельствуют о повышении «жесткости» доменной структуры и закреплении доменных границ.

Целью данной работы явилось изучение процессов переполяризации и температурных зависимостей диэлектрической проницаемости и тангенса потерь слоистых кристаллов ТГС-ТГС:Сr.

Материал и методы. Для исследования переполяризационных характеристик кристаллов ТГС-ТГС:Сr использовался модифицированный вариант схемы Сойера- Тауэра для наблюдения петель гистерезиса с включением в измерительную схему фазовращающей цепочки для компенсации сквозной проводимости. Емкость C , тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ измеряли в слабых электрических полях частотой 1 кГц с помощью цифрового измерителя L,C,R E7-8.

Результаты и их обсуждение. На рисунке 1 приведены данные для образца, представляющего собой пластинку кристалла, включающую (по длине) только одну границу раздела между областью с примесью (ТГС:Сr) и чистым ТГС. Видно (рис. 1а), что эта граница является также границей между двумя компонентами доменной структуры и достаточно неоднородна. Правая часть представляет собой монодоменную область, а левая часть (по рис.1а) - полидоменную униполярную область. Соответственно, перегибы на петле диэлектрического гистерезиса для всего образца (рис.1б) связаны с указанной доменной структурой и свидетельствуют о наличии больших униполярных участков. Коэффициенты униполярности отдельных областей образца достигают 100%. Согласно этим данным, переключаемая часть спонтанной поляризации резко уменьшается, свидетельствуя о