

А.И. Ивон, В.Ф. Истушкин, В.Р. Колбунов, И.М. Черненко  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ  
КРИТИЧЕСКИХ ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ**

*Аннотация. Исследована кинетика переключения критических терморезисторов на основе диоксиднованадиевой стеклокерамики в состоянии с низким сопротивлением. Время задержки переключения стремится к бесконечности, когда приложенное к терморезистору напряжение  $U_T$  стремится к напряжению порогового переключения  $U_S$ , и монотонно уменьшается с ростом напряжения при  $U_T > U_S$ . В рамках модели „критической температуры“ найдена связь между временем задержки переключения и напряжением. Результаты расчета адекватно описывают экспериментальные данные.*

*Ключевые слова: критический терморезистор; диоксиднованадиевая стеклокерамика; время задержки переключения.*

Введение. Критические терморезисторы создаются на основе оксидных полупроводниковых материалов с фазовым переходом металл-полупроводник (ФПП) [1,2]. Такие терморезисторы сочетают свойства обычных полупроводниковых терморезисторов с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления и термического реле. При температуре фазового перехода металл-полупроводник  $T_t$  они скачком изменяют электрическое сопротивление на несколько порядков [1]. В частности, критические терморезисторы, реализованные на основе диоксиднованадиевой стеклокерамики [3], переключаются в состояние с низким сопротивлением при температуре  $T_t = 343$  К (сопротивление уменьшается в сто раз). В таком состоянии они способны пропускать электрический ток до десятка ампер. Такое поведение дает возможность использовать критические терморезисторы на основе диоксиднованадиевой стеклокерамики для защиты центрального процессора компьютера от перегрева [4] и блока питания компьютера от тока включения [5]. Для указанных применений важен учет задержки переключения, которая возникает при разогреве критических терморезисторов электрическим током. Однако, такая задержка

для терморезисторов на основе диоксиднованадиевой стеклокерамики практически не исследовалась.

Постановка задачи. Цель настоящей работы – экспериментальное исследование времени задержки переключения критических терморезисторов на основе диоксиднованадиевой стеклокерамики.

Анализ полученных результатов в рамках модели „критической температуры”.

Методика исследования. Исследования выполнены на критических терморезисторах, изготовленных из керамики состава (вес. %) 55VO<sub>2</sub>-25SnO<sub>2</sub>-5Cu-15(ванадиево-фосфатное стекло). Рабочее тело терморезистора имеет форму диска с диаметром основания  $D = 10$  мм и высотой  $L = 2,2$  мм. В качестве электродного материала использовали индий галлиевую эвтектику. Электроды, созданные на основаниях рабочего тела терморезистора, имели площадь  $S = 0,4$  см<sup>2</sup>. В табл. 1 представлены типичные значения параметров терморезисторов.

Таблица 1

Параметры критических терморезисторов на основе диоксиднованадиевой стеклокерамики

Сопротивление при температуре 298 К ( $R_Q$ ), Ом	162
Сопротивление при температуре 373 К ( $R_{on}$ ), Ом	0,58
Температура фазового перехода металл-полупроводник, $T_t$ , К	343
Напряжение порогового переключения $U_S$ , В	5,5
Ток порогового переключения $I_S$ , мА	65
Энергия активации электропроводности ниже температуры $T_t$ $\Delta E$ , эВ	0,11
Тепловая постоянная времени $\tau_T$ , с	30

Для исследования использовали схему, показанную на рис. 1. Резистор  $R_{огр}$  с сопротивлением 20,6 Ом ограничивает ток критического терморезистора  $R_T$  после его переключения в состояние с низким сопротивлением. Ток через терморезистор находили по падению напряжения на прецизионном резисторе  $R_0$  с сопротивлением  $0,104 \pm 0,001$  Ом. Напряжения измеряли с относительной погрешностью  $\pm 1\%$  цифровым мультиметром Hexagon 510. Временные зависимости падения напряжения на терморезисторе и резисторе  $R_0$  реги-

стрировали мультиметром Hexagon 510 с шагом квантования по времени 0,05 с. В качестве источника постоянного напряжения ИН (рис. 1) использовали стабилизированный регулируемый источник напряжения ТЕС 14 НТР 30.5. Измерения выполняли при температуре 298 К после установления термодинамического равновесия терморезистора с окружающей средой.

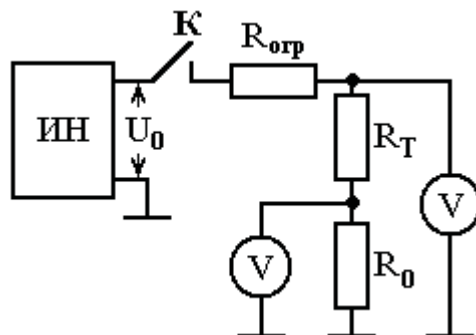


Рисунок 1 - Схема для исследования времени задержки переключения критических терморезисторов

Полученные результаты и их обоснование. Типичные временные зависимости падения напряжения  $U_T$  на терморезисторе и протекающего через него электрического тока  $I$ , зарегистрированные при подаче ступеньки напряжения  $U_0 = 10$  В, показаны на рис. 2.

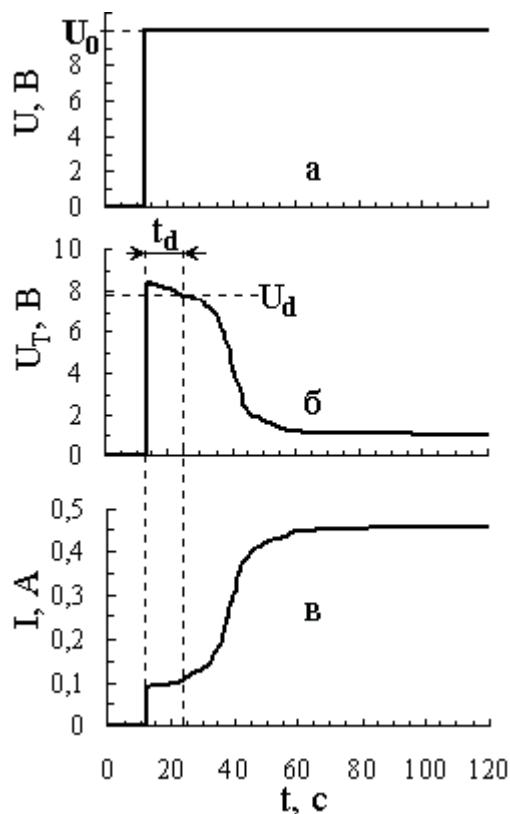


Рисунок 2- Кинетика напряжения (б) и тока через терморезистор (в) после подачи ступеньки напряжения  $U_0 = 10$  В(а)

Как видно, после подачи постоянного напряжения  $U_0$ , в начале, за счет разогрева терморезистора, ток медленно возрастает и напряжение падает. В этом интервале времени кристаллиты  $VO_2$  стеклокерамики находятся в полупроводниковой фазе, и сопротивление стеклокерамики изменяется с температурой так же, как для полупроводниковых терморезисторов с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления. Через интервал времени  $t_d$  с начала процесса терморезистор нагревается до температуры ФПМП  $T_t \sim 343$  К и переключается в состояние с низким электрическим сопротивлением. Происходит резкое уменьшение падения напряжения на терморезисторе, сопровождающееся столь же резким увеличением электрического тока. В терморезисторе формируется шнур тока, в пределах которого кристаллиты  $VO_2$  находятся в проводящей металлической фазе [6]. Через некоторое время диаметр шнура тока достигает равновесного значения, определяемого термодинамическим равновесием с окружающей средой. Поэтому падение напряжения  $U_T$  и ток  $I$  критического терморезистора перестают изменяться (рис. 2б, в).

Таким образом, для разогрева критического терморезистора электрическим током до температуры  $T_t$ , при которой происходит переключение в состояние с низким сопротивлением, требуется некоторое время  $t_d$ . Это время определяет задержку переключения критических терморезисторов и пороговых переключателей на основе материалов с фазовым переходом металл-полупроводник. Значение  $t_d$  можно найти по временным зависимостям напряжения и тока (рис. 2б, в), если учесть, что переключение начинается, когда сопротивление терморезистора достигает величины  $R_S = U_S/I_S$ , определяемой пороговыми значениями тока  $I_S$  и напряжения  $U_S$  (табл. 1). Значения  $I_S$  и  $U_S$  для исследуемых терморезисторов находили по пороговой точке вольтамперной характеристики, в которой температура рабочего тела терморезистора достигает значения  $T_t$  [6]. Для напряжения на терморезисторе  $U_T = U_d$  (рис. 2б), с которого начинается пороговое переключение, с учетом схемы, показанной на рис. 1, пренебрегая малым сопротивлением  $R_0$ , несложно получить следующее соотношение:

$$U_d = U_0 R_S / (R_S + R_{орп}), \quad (1)$$

которое в нормализованном виде можно записать как

$$U_d / U_0 = 1 / (1 + R_{орп} / R_S). \quad (2)$$

Соотношение (2) определяет уровень, позволяющий по временным зависимостям относительного падения напряжения на терморезисторе  $U_T/U_0$  найти время задержки переключения критического терморезистора  $t_d$  при любом значении ступеньки напряжения  $U_0$ . На рис. 3 показаны такие временные зависимости, зарегистрированные при разных значениях напряжения  $U_0$ . Уровень, определяемый соотношением (2), показан на рис. 3 пунктирной линией. Он рассчитан для  $R_{орп} = 20,6$  Ом и значения сопротивления  $R_S$ , которое в соответствии с параметрами  $U_S, I_S$  представленными в табл. 1 равно 84,6 Ом.

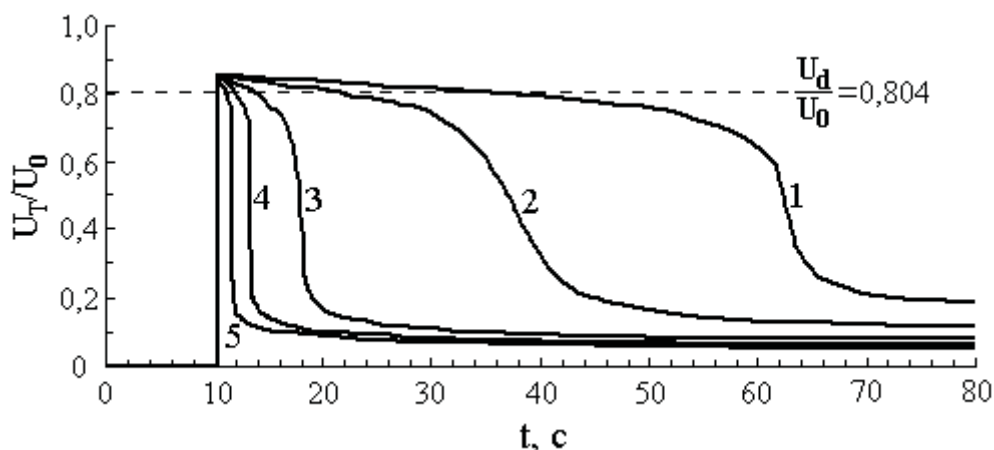


Рисунок 3 - Относительное падение напряжения на критическом терморезисторе на основе диоксиднованадиевой стеклокерамики как функция времени при значениях  $U_0, В$ :  
1 – 8, 2 – 10, 3 – 15, 4 – 20, 5 - 25

На рис. 3 абсциссы точек пересечения пунктирной линии с кинетическими кривыми определяют значения времени задержки переключения критического терморезистора  $t_d$  при разных значений напряжения  $U_0$ .

Кинетика относительного падения напряжения  $U_T/U_0$  для критических терморезисторов на основе диоксиднованадиевой стеклокерамики была исследованы при разных значениях напряжения  $U_0$  для определения зависимости времени задержки переключения  $t_d$  от напряжения. Такая зависимость показана на рис. 4, где кружки соответствуют экспериментальным данным. На рис. 4 представлены относительные значения времени задержки переключения  $t_d/\tau_T$ , где  $\tau_T$  тепловая постоянная времени терморезистора  $\tau_T$  (табл. 1).

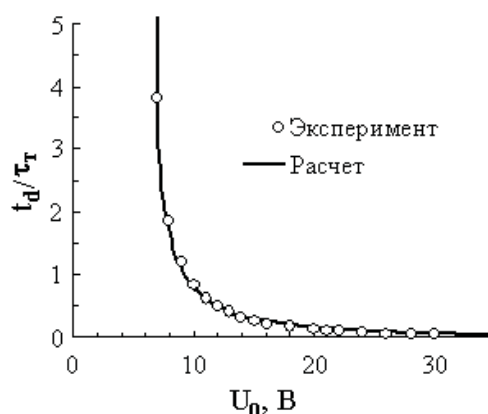


Рисунок 4 - Экспериментальные и расчетные зависимости нормированного времени задержки переключения критических терморезисторов на основе диоксидно-надиевой стеклокерамики от напряжения

Как видно, с ростом  $U_0$  время задержки монотонно уменьшается. Когда падение напряжения на критическом терморезисторе приближается к пороговому напряжению  $U_S \sim 5,5$  В, время задержки резко возрастает, стремясь к бесконечности. Это согласуется с тем, что при напряжениях меньших  $U_S$  критический терморезистор не может быть переключен в состояние с низким сопротивлением.

Для определения связи между временем задержки переключения  $t_d$  и напряжением  $U_0$  воспользуемся моделью „критической температуры” [6]. Запишем уравнение теплового баланса критического терморезистора, включенного в цепь, представленную на рис. 1:

$$C_T \frac{dT}{dt} + k(T - Q) = \frac{U_0^2 R_T}{(R_{\text{орп}} + R_T)^2}, \quad (3)$$

где  $C_T$ ,  $T$ ,  $k$  – теплоемкость, температура и коэффициент теплового рассеивания терморезистора, соответственно;  $t$  – время;  $Q$  – температура окружающей среды.

Уравнение (3) не учитывает распределение температуры в терморезисторе и окружающей среде. Однако такое приближение достаточно хорошо оправдывается на практике при анализе электрических цепей с терморезисторами [7].

Ниже температуры ФПМП  $T_t$  зависимость сопротивления критического терморезистора от температуры описывается формулой:

$$R_T = R_{\infty} \exp\left(\frac{\Delta E}{k_B T}\right),$$

где  $\Delta E$  – энергия активации электропроводности;  $R_\infty$  – сопротивление терморезистора при  $T \rightarrow \infty$ ;  $k_B$  – постоянная Больцмана. Если  $R_Q$  – сопротивление терморезистора при температуре окружающей среды  $Q$ , а  $\Delta T = T - Q$ , то зависимость сопротивления терморезистора от температуры можно представить в виде:

$$R_T = R_Q \exp\left(-\frac{\Delta E \Delta T}{k_B Q(Q + \Delta T)}\right). \quad (4)$$

Входящий в уравнение (3) коэффициент теплового рассеивания  $k$  выразим через пороговое напряжение  $U_S$  и сопротивление  $R_S$  критического терморезистора, учитывая, что в пороговой точки вольтамперной характеристики баланс выделяемой и рассеиваемой мощности в статическом режиме определяется соотношением  $k(T_t - Q) = U_S^2/R_S$ . Из этого соотношения следует:

$$k = U_S^2/(R_S \Delta T_t), \quad (5)$$

где  $\Delta T_t = (T_t - Q)$ .

Время задержки переключения критического терморезистора  $t_d$  определяется временем необходимым для его разогрева от температуры окружающей среды  $Q$  до „критической”, при которой происходит переключение терморезистора в состояние с низким сопротивлением. Такой температурой является температура фазового перехода металл-полупроводник  $T_t$ . Поэтому, выполнив интегрирование (3) в интервале  $0 \leq \Delta T \leq \Delta T_t$ , с учетом соотношения (5) и  $T = Q + \Delta T$ , для относительной величины времени задержки переключения  $t_d/\tau_T$  получим следующее выражение:

$$\frac{t_d}{\tau_T} = \int_0^{\Delta T_t} \frac{d\Delta T}{\left(\frac{U_0}{U_S}\right)^2 \frac{R_T R_S \Delta T_t}{(R_{орп} + R_T)^2} - \Delta T}, \quad (6)$$

где тепловая постоянная времени терморезистора равна  $\tau_T = C_T/k$  [7].

Выражение (6) определяет связь между относительным временем задержки переключения критических терморезисторов и постоянным напряжением  $U_0$ , приложенным к терморезистору в момент времени, начиная с которого отсчитывается время задержки.

Для расчета зависимости  $t_d/\tau_T$  от напряжения  $U_0$  была написана программа на языке Паскаль, исходными данными для которой являются: шаг интегрирования, диапазон напряжений  $U_0$ , шаг изме-

нения  $U_0$ , температура окружающей среды  $Q$ , величина ограничивающего резистора  $R_{огр}$  и параметры терморезистора. Вычисление интеграла в программе реализовано методом трапеций, значения  $R_T$  при разных температурах рассчитываются по формуле (4).

Результаты расчета для исследованного в работе критического терморезистора (табл. 1), выполненные в диапазоне напряжений  $7 \text{ В} \leq U_0 \leq 35 \text{ В}$  с шагом  $0,1 \text{ В}$  при  $Q = 298 \text{ К}$ ,  $R_{огр} = 20,6 \text{ Ом}$  и шаге интегрирования  $0,01 \text{ К}$ , представлены на рис. 4 сплошной линией. Эти результаты позволяют найти напряжение  $U_0 = 8 \text{ В}$ , при котором время задержки переключения критического терморезистора совпадает с его тепловой постоянной времени  $\tau_T$  ( $t/\tau_T = 1$ ). По временной зависимости относительного падения напряжения на терморезисторе, найдено значение тепловой постоянной времени  $\tau_T = 30 \text{ с}$ , к которой нормированы экспериментальные значения  $t_d$ , представленные кружками на рис. 4. Как видно, имеет место хорошее соответствие между результатами расчета и эксперимента, что подтверждает применимость модели „критической температуры” для описания кинетики переключения критических терморезисторов и пороговых переключателей на основе диоксиднованадиевой стеклокерамики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шефтель И.Т. Терморезисторы (Электропроводность 3d –окислов. Параметры, характеристики и области применения).–М.:Наука,1973.–416 с.
2. Терморезистор прямого подогрева ТРП68-01 // Индустрон – 2007 – Режим доступа: <http://www.industron.ru/catalog/relsib/uzt/uzt.htm>.
3. Деклараційний патент 40748А Україна, МКИ С 04 В 35/495, Н 01 В 01/08. Спосіб одержання напівпровідникової кераміки на основі діоксиду ванадію: О.І. Івон, В.Р. Колбунов, І.М. Черненко (Україна); ДНУ. – № 99031402; Заявл. 16.03.99; Опубл. 15.08.2001. Бюл. №7. – 2 с.
4. Івон А.І., Істущікин В.Ф. Управление кулером с помощью критических терморезисторов // Системные технологии.-2009, 1(60). - С. 93 – 99.
5. Івон А.І., Колбунов В.Р., Черненко І.М. Защита блока питания компьютера от тока включения//Системные технологии.-2009,1(60).-с.80–88.
6. Бугаев А.А., Захарченя Б.П., Чудновский Ф.А. Фазовый переход металл-полупроводник и его применение.– Л.: Наука, 1979. – 183 с.
7. Шашков А.Г. Терморезисторы и их применение.– М.: Энергия, 1967.– 319с.

Получено 15.01.2011г.