

КЕРАМИЧЕСКИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕЗИСТОРЫ

Ф.Медведев, П.Никитин,
Г.Текстер-Проскуракова,
С.Тесленко

Нелинейные полупроводниковые резисторы (НПР), чувствительные к температуре окружающей среды и величине приложенного напряжения, находят широкое применение в разнообразных современных электронных и электротехнических системах и оборудовании. В ряде случаев такой прибор может заменить достаточно сложную электронную схему или существенно её упростить. Поскольку характеристики этих изделий определяются, в первую очередь, свойствами используемых для их изготовления поликристаллических материалов, они отличаются простотой конструкции (обычно это керамический диск), высокой надёжностью, стабильностью характеристик и экономичностью. Немалых успехов в развитии этого направления добились отечественные предприятия, в первую очередь ОАО "НИИ "Гириконд". Каковы же система параметров и области применения создаваемых в ОАО НПР? Каковы новые разработки специалистов предприятия?

ОБЩИЕ ДАННЫЕ

К классу нелинейных полупроводниковых резисторов относятся:

- **терморезисторы с положительным температурным коэффициентом сопротивления (ПТКС), или позисторы.** Для температурной зависимости сопротивления таких НПР характерен резкий, на несколько порядков, скачок сопротивления, при этом температуру скачкообразного изменения сопротивления можно задавать от значений ниже 0°C до 240°C. Используются они в качестве нагревательных элементов, термостабилизаторов, встроенных элементов температурной защиты, для защиты от токовых перегрузок, в пусковых устройствах, а также в качестве элементов задержки. В зависимости от назначения диапазон рабочих температур позисторов лежит в интервале -40...+240°C, рабочих напряжений – 12–680 В, номинальных токов – 3–300 мА;
- **терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ОТКС).** Они имеют экспоненциальную температурную зависимость сопротивления, при этом значения номинального сопротивления можно изменять в очень широких пределах (от единиц ом до нескольких мегаом), а ТКС – практически в пределах порядка величины (примерно на -1,5...-6% при 25°C). Предназначены терморезисторы с ОТКС для измерения и регулирования температуры (в частно-

сти, в качестве высокостабильных датчиков температуры) и температурной компенсации в диапазоне -60...+180°C, а также для ограничения пусковых токов систем (например, в источниках вторичного электропитания) на рабочий ток 0,2–15 А;

- **резисторы с симметричной высоконелинейной пороговой вольт-амперной характеристикой (ВАХ) – варисторы.** Их пороговое (или классификационное) напряжение, измеряемое при токе 1 мА, составляет ~10...10³ В. Используются варисторы в электронной и электротехнической аппара-

Представляем авторов статьи

МЕДВЕДЕВ Федор Константинович. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Окончил Ленинградский электротехнический институт им. В.И.Ульянова (Ленина). Специальность – физика диэлектриков и полупроводников. Начальник научно-производственного отделения нелинейных полупроводниковых резисторов, фотоприёмников и датчиков ОАО "НИИ "Гириконд".

НИКИТИН Павел Валерьевич. Окончил химический факультет Санкт-Петербургского Государственного университета по специальности химия. Начальник лаборатории ОАО "НИИ "Гириконд". Главный конструктор направления "Терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления".

ТЕКСТЕР-ПРОСКУРЯКОВА Гали Николаевна. Кандидат технических наук. Окончила физический факультет Ленинградского государственного университета им. А.А.Жданова по специальности физика. Старший научный сотрудник ОАО "НИИ "Гириконд". Главный конструктор направления "Терморезисторы с положительным температурным коэффициентом сопротивления – позисторы".

ТЕСЛЕНКО Сергей Петрович. Окончил Ленинградский политехнический институт им. М.И.Калинина по специальности экспериментальная ядерная физика. Старший научный сотрудник ОАО "НИИ "Гириконд". Главный конструктор направления "Варисторы". Тел. (812) 552-24-50.

туре для защиты от импульсного перенапряжения (грозовые разряды, коммутационные и электромагнитные импульсы). Их рабочее напряжение – от ~10 В до нескольких киловольт (при последовательном соединении), допустимый импульсный ток достигает нескольких килоампер при защитном отношении $U_{\text{макс}}/U_{\text{кл}} \sim 1,5-2,5$.

Характеристики нелинейных полупроводниковых резисторов в первую очередь зависят от свойств поликристаллического полупроводникового материала, на базе которого они изготовлены [1–3]. Чтобы исключить процессы электролиза на постоянном токе и, следовательно, изменения состава материала при прохождении тока, материал резистора должен иметь чисто электронную проводимость. Кроме того, материал должен быть химически стабилен в заданном интервале рабочих температур и, по возможности, нечувствителен к технологическим загрязнениям. К материалу предъявляется также требование обеспечения определенного сочетания электрических характеристик (электропроводности и ТКС) в соответствии с назначением резистора, причем желательно иметь возможность выполнять это требование путем изменения соотношения компонентов, составляющих материал, и технологических режимов, т.е. оставаясь в рамках одной и той же химической системы.

Позисторная и варисторная керамика – материал с межзерновыми барьерными слоями, свойства которого в основном зависят от свойств границ зерен: объемная электронная проводимость зерен керамики высокая, а на их границах формируются потенциальные барьеры. Кроме того, зерна могут разделять тончайшие прослойки высокоомной фазы.

Позисторные материалы синтезируются на основе титаната бария – сегнетоэлектрика при комнатной температуре, переходящего в параэлектрическое состояние при температуре, равной примерно 123°C. Следствие такого фазового перехода – позисторный эффект (увеличение электрического сопротивления материала на несколько порядков в узком температурном интервале). Изменение температуры перехода обеспечивается введением добавок, образующих с материалом основы твердые растворы ($\text{BaTiO}_3\text{-PbTiO}_3$, -CaTiO_3 , -SrTiO_3 , -BaSnO_3 и др.) и смещающих его температуру Кюри [4]. Например, частичное замещение ионов бария ионами свинца повышает температуру Кюри, а замещение бария ионами стронция – понижает ее [4].

Для получения высокой объемной проводимости титанат бария (и твердые растворы на его основе) легируют примесями донорного типа (ниобий, сурьма, иттрий, лантан и др.). Примеси акцепторного типа (марганец, медь и др.) способствуют формированию межзерновых потенциальных барьеров. Примеси обоих типов вводят в количестве десятых-сотых долей атомного процента. Кроме того, для регулирования процесса жидкофазного спекания, в ходе которого необходимо сформировать однородную микроструктуру с требуемым средним размером зерен, обеспечивается сверхстехиометрическое содержание TiO_2 в керамике в количестве ~0,5% мол., вводятся легкоплавкие добавки, а также добавки, стимулирующие или ингибирующие рост зерен. Важную роль в процессе формирования требуемой микроструктуры и электрических свойств керамики играют парциальное давление кислорода в печи, а также скорость нагрева и, в особенности, режим охлаждения [1,2].

Аналогичные проблемы (обеспечение требуемой микроструктуры, высокой объемной проводимости зерен керамики, формирование межзерновых потенциальных барьеров и прослойчатой фазы) стоят и перед разработчиками варисторов, для изготовле-

ния которых используется материал на основе оксида цинка. Решаются они выбором температурного режима спекания и введением соответствующих добавок [3], таких как донорные примеси (Al, Ga, In); примеси, влияющие на спектр поверхностных состояний, от которого зависит вид ВАХ в области нелинейности (Co, Mn); Bi_2O_3 – основной добавки, регулирующей процесс жидкофазного спекания и формирующей межкристаллитную прослойчатую фазу, и др. В ходе спекания варисторной керамики протекают сложные процессы фазообразования, в регулировании которых важную роль играют такие добавки, как Sb_2O_5 (составы для высоковольтных варисторов) и TiO_2 (для низковольтных приборов). Изменяя режим спекания и состав легирующих добавок, можно регулировать рабочий градиент электрического поля в керамике в пределах от менее 20 до ~250 В/мм.

Материалы для терморезисторов с ОТКС синтезируются в основном из смесей окислов Mn, Co, Ni, Cu, Cr [1]. В образующихся в процессе синтеза шпинельных структурах, содержащих разновалентные ионы 3d-металлов, реализуется перескоковый механизм проводимости.

Сегодня одна из актуальных задач развития керамических НПР – оптимизация составов и технологических режимов, используемых в производстве, с целью перехода на сырье, выпускаемое отечественной промышленностью. Для производства позисторов интерес представляют материалы с температурой переключения выше 240°C, повышенной электрической прочностью (более 200 В/мм) и объемным удельным сопротивлением ≤ 5 Ом·см. Для создания следующих поколений терморезисторов с ОТКС, в том числе и в чип-исполнении, необходимы материалы с повышенной стабильностью. А чтобы удешевить продукцию, нужны материалы, не содержащие кобальт или с его пониженным содержанием. Расширение областей применения варисторов требует, в первую очередь, получения материалов с пониженным градиентом электрического поля при повышенной нелинейности ВАХ и освоения технологии изготовления чип-варисторов. Это позволит снизить классификационное напряжение с нынешнего уровня ~20 В до 4–8 В. Представляет интерес и разработка эффективных технологических приемов введения в оксид цинка добавок донорного типа, что приведет к улучшению защитного отношения $U_{\text{макс}}/U_{\text{кл}}$. Рассмотрим каждый тип нелинейных полупроводниковых резисторов подробнее.

ПОЗИСТОРЫ

Характеристики

и параметры

Основная характеристика позистора – температурная зависимость сопротивления (рис.1), определяемая, как правило, при так называемой "нулевой" мощности, т.е. при мощности, не вызывающей дополнительного разогрева прибора. Выделенные на рис.1 особые точки этой характеристики показывают основные параметры позистора:

- R_H – номинальное сопротивление, измеряемое, как правило, при 25°C;

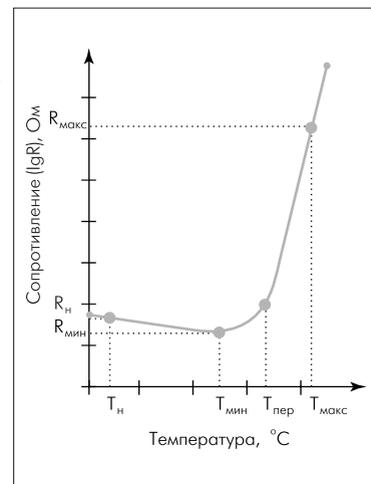


Рис.1. Типичная температурная зависимость сопротивления позисторов

- $R_{мин}$ – минимальное сопротивление;
- $T_{пер}$ – температура переключения, соответствующая началу области положительного ТКС (ее определяют как температуру, при которой сопротивление увеличивается в два раза по отношению к R_n или $R_{мин}$);
- $T_{макс}$ ($T_{макс} > T_{пер}$) – максимальная температура, точка в верхней части области резкого увеличения сопротивления, зависит от конструктивных особенностей изделия (типа используемого припоя, наличия и типа изоляционного покрытия и т.п.).

Важное значение имеют и такие параметры, как кратность изменения сопротивления $K = R(T_{макс})/R_n$ и температурный коэффициент сопротивления

$$\alpha_{R} = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{R} = \frac{\ln(R_2/R_1)}{T_2 - T_1}$$

где R_1 и R_2 – значения сопротивления при T_1 и T_2 , соответственно ($T_1 \geq T_{пер}$, $T_2 \leq T_{макс}$). Все параметры задаются с определенным допуском, который оговаривается при описании конкретных типов позисторов.

Другая важная характеристика позистора – статическая ВАХ, описывающая его поведение под воздействием электрической нагрузки в условиях теплового равновесия с окружающей средой (рис.2). Поведение позисторов в этом случае характеризуют следующие параметры (определяемые при температуре 25°C):

- ток опрокидывания $I_{опр}$ (trip current) – максимальный ток ВАХ, при котором выделяемая в позисторе мощность достаточна для его разогрева выше температуры фазового перехода $T_{пер}$;
- номинальный ток $I_{ном}$ (rated current), $I_{ном} < I_{опр}$, обычно $I_{ном} \approx (0,50 - 0,65) \cdot I_{опр}$; при токах $I \leq I_{ном}$ сопротивление позистора низкое, так как он не разогрев до температуры фазового перехода;
- ток срабатывания $I_{сраб}$ (switching current), $I_{сраб} > I_{опр}$, обычно $I_{сраб} \approx 1,4 \cdot I_{опр}$; при токах $I \geq I_{сраб}$ сопротивление позистора резко возрастает с увеличением температуры;
- максимальный ток $I_{макс}$ – максимально допустимый пусковой ток, при превышении которого позистор может разрушиться;
- максимальное напряжение $V_{макс}$, или напряжение, которое может быть приложено к позистору в течение длительного времени;
- остаточный ток $I_{ост}$ – ток позистора при максимальном напряжении $V_{макс}$;
- время срабатывания t – время спада тока, протекающего через позистор (в области вольт-амперной характеристики, где $I > I_{сраб}$), в два раза.

Области применения

По областям применения позисторы делятся на две группы:

- резисторы, работающие в условиях воздействия электрической нагрузки и используемые в качестве: предохранителей в схемах защиты от перегрузок по току и напряжению; переключателей в схемах пусковых устройств; автостабилизирующих нагревательных элементов в схемах размагничивания и задержки;

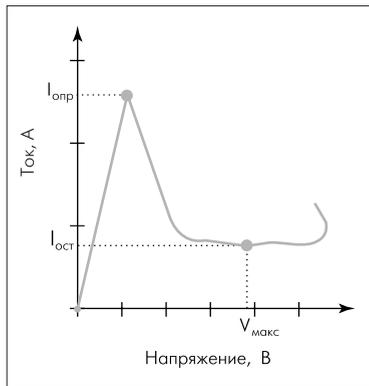


Рис.2. Статическая ВАХ позисторов

- датчики температуры, предназначенные для схем защиты от перегрева; измерения и контроля температуры; температурной защиты электрических машин и систем пожарной сигнализации.

Сегодня существует свыше 60 типонаименований отечественных позисторов, созданных для решения конкретных задач в различных областях техники, например для размагничивания масок цветных телевизоров, температурной защиты электрических машин, ограничения тока в электронных системах, для бесконтактных пусковых устройств, нагревательных устройств [5–8].

Рассмотрим новые серии отечественных позисторов, предназначенных для работы в качестве предохранителей в схемах защиты от перегрузок, а также для термостатирования различных элементов радиоаппаратуры.

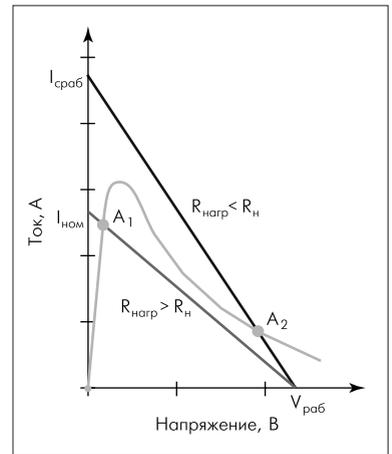


Рис.3. Работа позистора в качестве предохранителя: A1 – нормальный режим, A2 – режим перегрузки

Позисторы для защиты от перегрузок (серии ТРП-19, ТРП-27)

Позисторы этих серий имеют форму керамических дисков различного диаметра с однонаправленными припаянными проволочными выводами. В ряде случаев корпус позисторов этого типа имеет защитное покрытие (эмаль).

В нормальном режиме работы в схеме защиты ток через позистор не превышает $I_{ном}$ (рабочая точка A_1 на рис.3). При перегрузке или коротком замыкании нагрузки мощность на позисторе увеличивается, его сопротивление растет, ток уменьшается (точка A_2). Позистор принимает на себя все напряжение, низкое значение тока сохраняется до устранения причин перегрузки. Определяющие параметры при выборе позистора для конкретной схемы защиты – максималь-

Табл.1. Основные параметры позисторов серии ТРП-19* (АДПК 434121.006 ТУ)

Параметр	Номинальное сопротивление R_n , Ом				
	270	470	750	1000	1500
Допуск по R_{25} , %	±30				
Максимальное напряжение $V_{макс}$, В	300				
Ток опрокидывания $I_{опр}$, мА	30	25	15	12	10
Номинальный ток $I_{ном}$, мА	15	13	8	6	5
Ток срабатывания $I_{сраб}$, мА	42	35	20	17	14
Остаточный ток $I_{ост}$, мА, не более	4				
Максимальный пусковой ток $I_{макс}$, А	0,1				
Температура переключения $T_{пер}$, °C	60±10				
Кратность изменения сопротивления в диапазоне 25...120°C, не менее	10³				
Температурный коэффициент сопротивления, %/°C, не менее	12				
Габариты, см					
диаметр	4				
толщина	5				
Выводы, мм					
диаметр	0,6±0,1				
длина	25				

* При заказе указывается номинальное сопротивление R_n , например ТРП-19-470

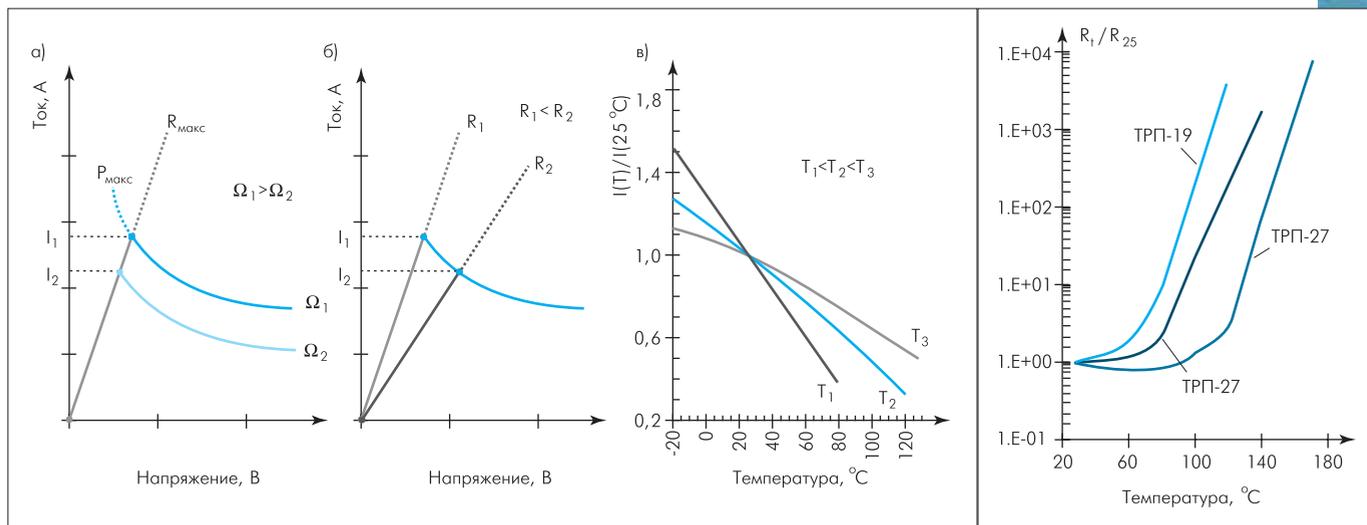


Рис.4 Зависимость тока опрокидывания позисторов от габаритов (объема) изделия (а), сопротивления (б) и температуры переключения (в)

Рис.5. Приведенные температурные зависимости сопротивления позисторов

ное напряжение позистора $V_{\text{макс}}$, ток опрокидывания $I_{\text{опр}}$ и максимально допустимый пусковой ток $I_{\text{макс}}$. Эти параметры приводятся в ТУ на изделие. Ток опрокидывания зависит от габаритов позистора, величины его сопротивления, температуры переключения, коэффициента рассеяния и температуры окружающей среды (рис.4). Следует иметь в виду, что гарантированное срабатывание схемы происходит при токах $I_{\text{сраб}} \geq 1,4 \cdot I_{\text{опр}}$. Если при коротком замыкании нагрузки ток может превысить $I_{\text{макс}}$, в схеме необходимо предусмат-

ривать дополнительный резистор, включаемый последовательно с позистором.

Основные параметры позисторов серий ТРП-19, ТРП-27 приведены в табл. 1 и 2. На рис. 5 и 6 представлены их температурные и вольт-амперные характеристики. Значение температуры переключения $T_{\text{пер}}$, определяющей положение приведенной характеристики $R_t/R_{25} = f(t)$ на температурной шкале, зависит от состава материала основы. ВАХ для отдельных типонаименований, так же как и все

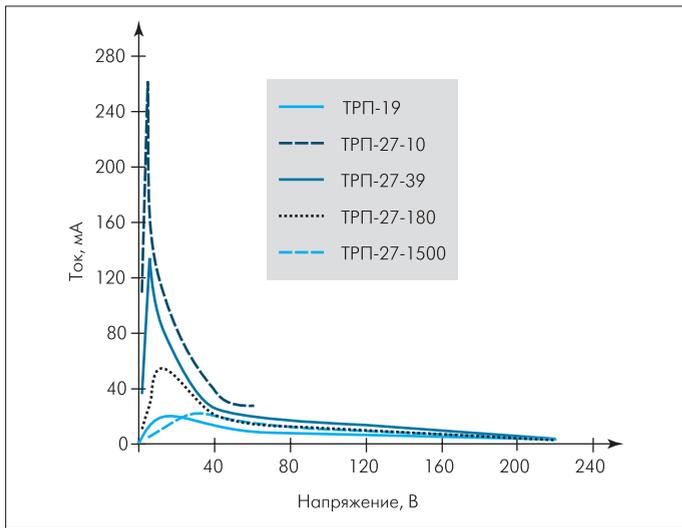


Рис.6. Статические вольт-амперные характеристики позисторов

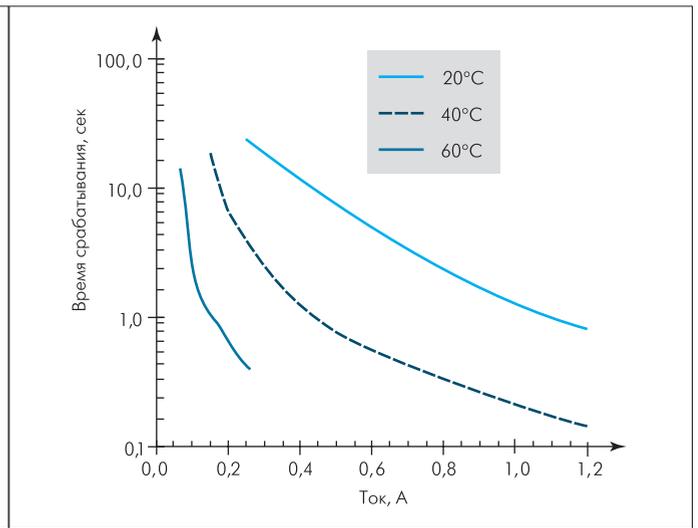


Рис.9. Зависимость времени опрокидывания от тока позисторов TRP-24

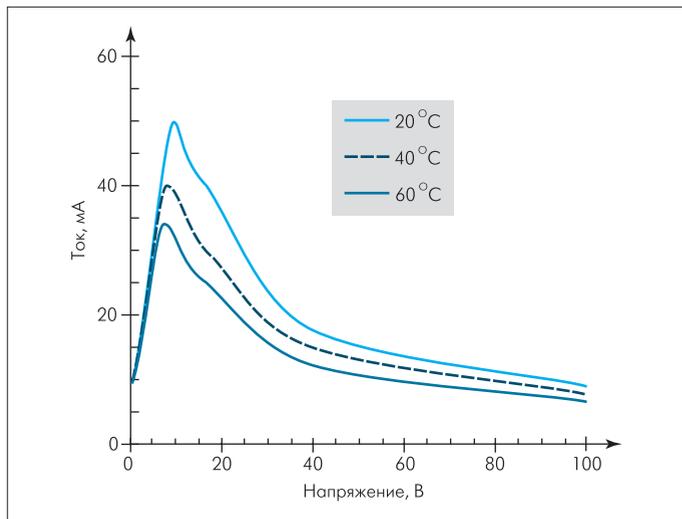


Рис.7. ВАХ TRP-27-180 при различных значениях температуры окружающей среды

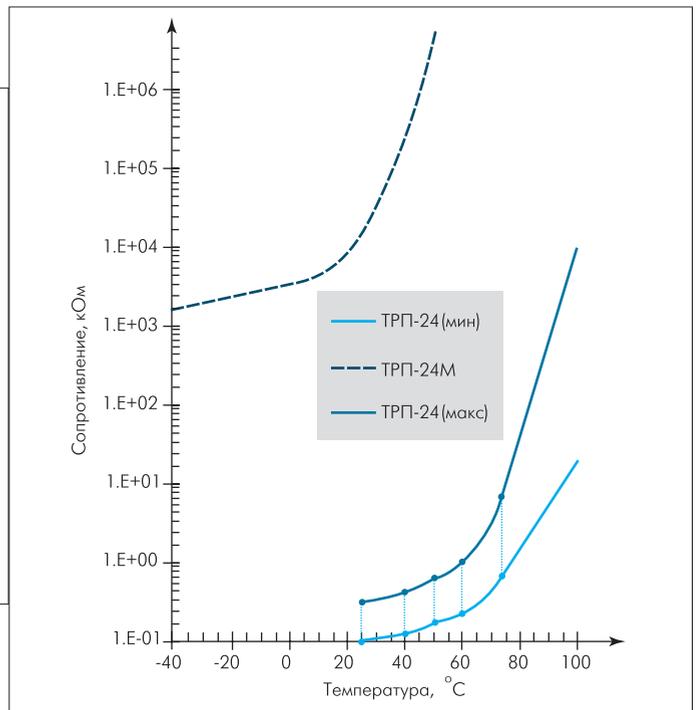


Рис.10. Температурные зависимости сопротивления позисторов серии TRP-24

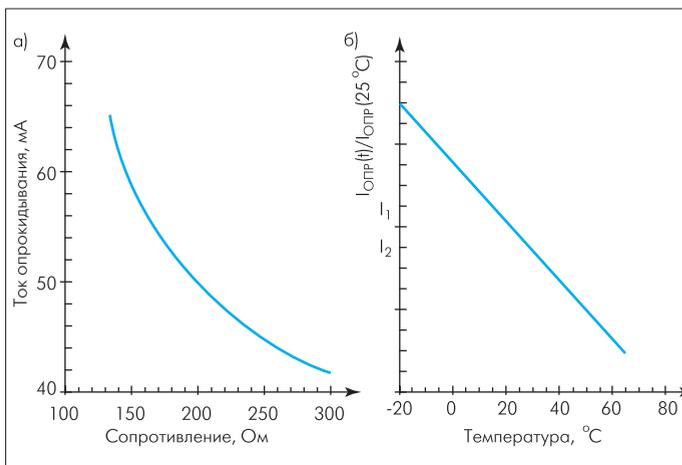


Рис.8. Зависимость $I_{опр}$ позисторов TRP-27-180 от сопротивления при 25°C (длина выводов $l = 20$ мм) (а) при различных значениях температуры окружающей среды (б) и различной длине выводов (в)

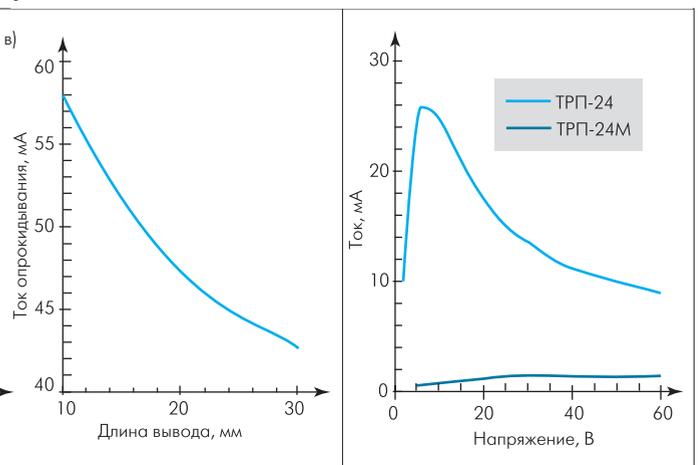


Рис.11. ВАХ позисторов серии ТЗТ-24



Табл.2. Основные параметры позисторов серии ТРП-27*

Параметр	Номинальное сопротивление $R_{нр}$, Ом (АДПК 434121.017 ТУ)									Номинальное сопротивление $R_{нр}$, Ом (АДПК 434121.013 ТУ)				
	10	18	39	62	91	180	300	470	1500	22	27	33	47	75
Допуск по R_{25} , %	+25									+25				
Максимальное напряжение $V_{МАКС}$, В	60	60	220	265	265	300	300	300	300	220	265	265	265	265
Ток опрокидывания $I_{ОПР}$, мА	300	250	125	100	80	50	40	30	26	130	110	95	75	55
Номинальный ток $I_{НОМ}$, мА	180	150	80	60	50	30	24	18	15	85	75	60	50	35
Ток срабатывания $I_{СРАБ}$, мА	400	350	170	140	110	705	55	40	35	180	150	130	105	80
Остаточный ток $I_{ОСТ}$, мА, не более	50	40	15	10	10	10	5	4	4	10	10	10	10	10
Максимальный пусковой ток, А	0,6	0,6	1,0	1,0	0,4	0,2	0,2	0,2	0,1			1		
Температура переключения $T_{ПЕР}$, °С	120±10									80±10				
Кратность изменения сопротивления в диапазоне 25–($T_{ПЕР}+60$)°С, не менее	10 ²			10 ³						10 ³				
Температурный коэффициент сопротивления, %/°С, не менее	12			13						12				
Габариты, мм														
диаметр	6,8				4,8				12		8,5			
толщина	5,0				5,0				5		5,0			
Выводы, мм														
диаметр	0,6+0,1									0,6+0,1				
длина	25									25				

* При заказе указывается номинальное сопротивление $R_{нр}$, например ТРП-27-470.

значения тока ($I_{опр}$, $I_{ном}$, $I_{сраб}$), указанные в таблицах, получены в условиях спокойного воздуха при 25°С.

Рис.7 иллюстрирует зависимость вольт-амперной характеристики от температуры окружающей среды. На рис.8 показана зависимость тока опрокидывания от значения сопротивления при комнатной температуре R_{25} , а также влияние на этот параметр условий теплоотвода.

Для позисторов этого функционального назначения важную роль играют динамические характеристики, показывающие изменение тока в режиме перегрузки со временем. Критерий для оценки поведения позистора в этих условиях – время срабатывания t (время уменьшения тока в два раза), которое зависит от величины тока перегрузки (рис.9).

Нагревательные элементы и датчики температуры (серия ТРП-24)

Благодаря высокой температурной чувствительности и положительному температурному коэффициенту сопротивления позисторы серии ТРП-24 могут одновременно выполнять функции нагрева-

тельного элемента и термомодатчика. В серию входят позисторы типа ТРП-24, мини-ТРП-24 и ТРП-24М (табл.3, рис.10 и 11). Компоненты серии отличаются повышенной надежностью и стабильностью, их минимальная наработка на отказ составляет 40 тыс.ч (типичное значение для позисторов других серий – 20 тыс.ч). Конструктивно позисторы типа ТРП-24 и ТРП-24М представляют собой диски диаметром ~5 мм, мини-ТРП-24 – диски диаметром ~2 мм с металлизированными торцевыми поверхностями.

Позисторы ТРП-24

предназначены в основном для термостатирования кварцевых резонаторов. Отличительная особенность изделий такого назначения – нормированная температурно-варисторная характеристика. Это достигается нормированием сопротивления в рабочем режиме при 72°С и напряжении 13 В (рабочий режим позисторов ТРП-24 при термостатировании кварцевых резонаторов). С учетом информации об этом параметре можно подобрать необходимый комплект элементов для обеспечения требуемой мощности нагревательного блока. Основное назначение позисторов ТРП-24М – датчики температуры в электронагревателях с автоматической регулировкой температуры.

Хотя в статье дано четкое разграничение назначения позисторов новых серий (ТРП-19 и ТРП-27 – в качестве предохранителей, а ТРП-24 – для термостатирования), не исключена возможность использования их и для других целей в различных областях техники. В частности, ТРП-27 находят применение в светотехнике в схемах пусковых устройств люминесцентных ламп.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шефтель И.Т. Терморезисторы. Электропроводность 3d-окислов. Параметры, характеристики и области применения. – М.: Наука, главная редакция ФМЛ, 1973. – 416 с.
2. Полупроводники на основе титаната бария. – М.: Энергоиздат, 1982. – 328 с.
3. Грязнов Ю.В., Медведев Ф.К. Оксидно-полупроводниковые резисторы. Применение. Система параметров. Свойства. – Обзоры электронной техники. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты, 1989, вып. 2 (1446), с. 48.
4. Окадзак К. Технология керамических диэлектриков. – М.: Энергия, 1975. – 320 с.
5. Текстер-Проскуряков Г.Н., Гусев Ю.А. и др. – Приборы и системы управления, 1991, №5, с. 30.
6. Текстер-Проскуряков Г.Н., Гусев Ю.А. и др. – Приборы и системы управления, 1991, №6, с. 22.
7. Текстер-Проскуряков Г.Н., Дружинина М.Б. и др. – Приборы и системы управления, 1995, №1, с. 38.
8. Текстер-Проскуряков Г.Н. и др. – Приборы и системы управления, 1995, №5, с. 27.

Табл.3. Основные параметры позисторов серии ТРП-24 (АДЯР 434121.002 ТУ)

Параметр	ТРП-24						Мини ТРП-24	ТРП-24М
	1	2	3	4	5	6		
Сопротивление при 25°С R_{25} , Ом	100–400							(13–30)·10 ³
Сопротивление при 72°С R_{72} , Ом	400–690	691–1200	1201–2000	2001–3500	3501–6000	>6000	–	–
Температура переключения $T_{пер}$, °С	60							5*
Кратность изменения сопротивления R_{25}/R_5	–							Не менее 3
R_{50}/R_{25}	–							Не менее 10
R_{100}/R_{25}	10 ² –10 ⁴							–
ТКС, %/°С, в диапазоне 25–50°С	–							Не менее 10
70–90°С	10–15							–
Рабочее напряжение $V_{раб}$, В	13							–
Максимальное напряжение $V_{макс}$, В	60							60

* По отношению к $R_{мин}$, т.е. $R_5/R_{(40)}=2$.