Тензорезистивные ПИП

$$\Delta R = R(1 + 2\mu + k)\frac{\Delta l}{l}$$

Материалы и конструкции тензорезистивных ПИП

Материал	Состав, %	Коэффициент тензочувствитель-ности
Константант	45Ni,55Cu	2,1
Карма	74Ni,20Cr,3Al,3Fe	2,0
Изоэластик	36Ni,8Cr,0.5Mo, 55.5Fe	3,6
Нихром V	80Ni,20Cr	2,1
Платиновольфрам	92Pt,8W	4,0
Армюр Д	70Fe,20Cr,10Al	2,0
Ge	*p* - тип	55
	n - тип	-100 (до -150)
Si	*p* - тип	110 (до 170)
	n - тип	-100

Константан – обладает высоким удельным сопротивлением и температурной стабильностью.

Сплав карма – высокие усталостными характеристики; высокая временная стабильность; широкий диапазон температурной компенсации.

Изоластик – обладает высокой тензочувствительностью и наиболее высокими усталостными характеристиками, но характеризуется чувствительностью к температуре.

Нихром V, *платиновольфрам*, *армюр Д* - применяют в узкоспециальных приложениях, связанных с высокими температурами, при которых приобретают существенное значение устойчивости к окислительным процессам.

От вида материала: проводниковые и полупроводниковые.

Проводниковые от *фазового состояния:* твердотельные и жидкостные.

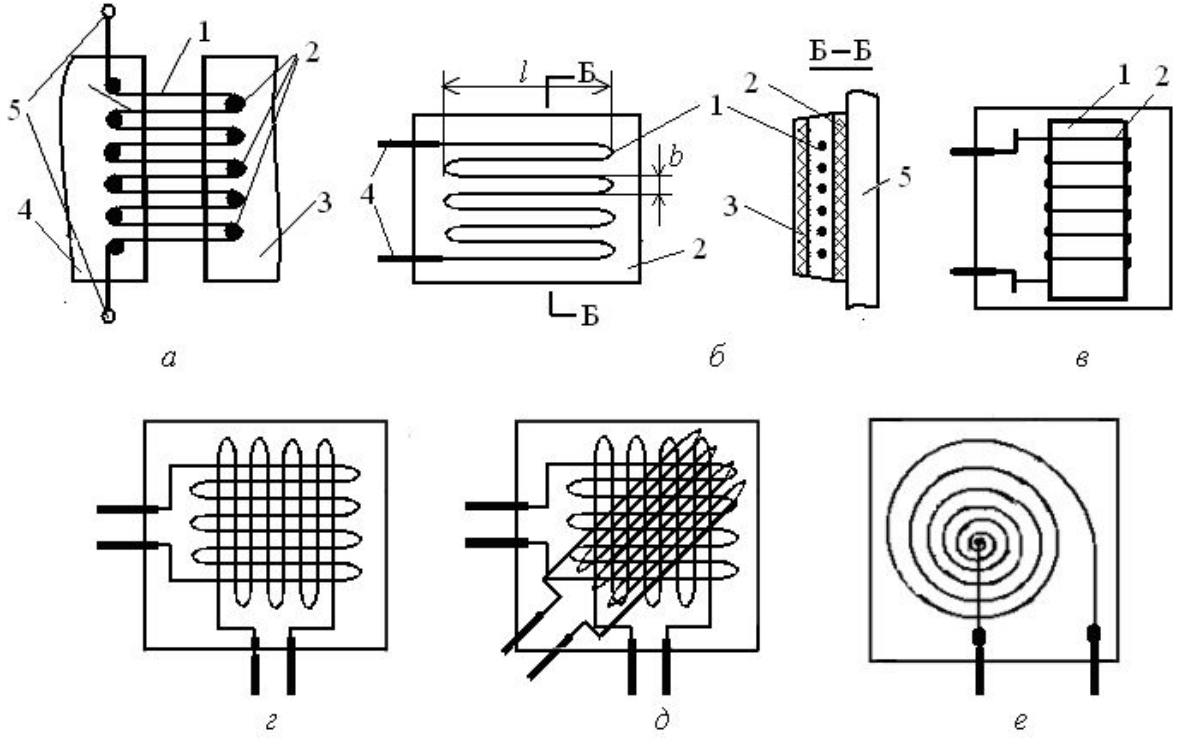
Твердотельные – по конструктивному исполнению: проволочные, фольговые, пленочные.

Проволочные : ненаклеиваемые и наклеиваемые.

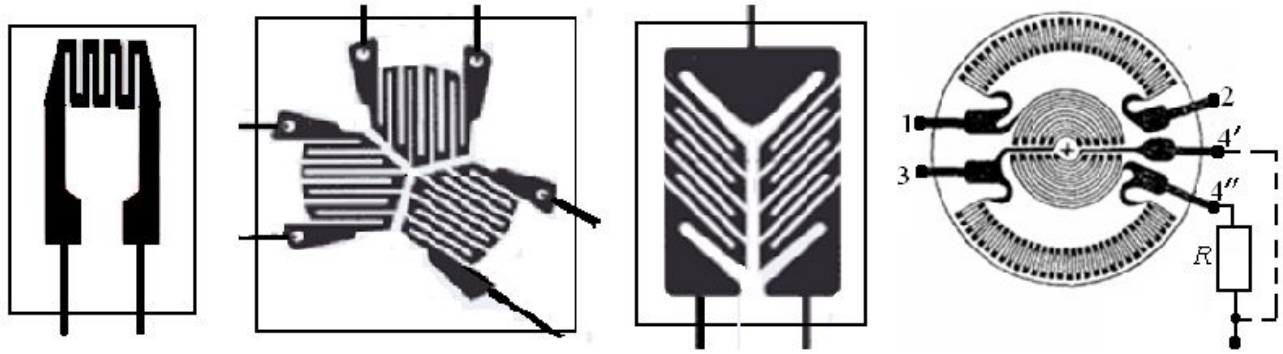
Ненаклеиваемые (свободные) тензорезистивного ПИП (рис. *а*): обладают простотой и большим диапазоном измерения 12–15 %.

Ненаклеиваемые - менее чувствительны, имеют большие габариты.

Наклеваемые (рис. *б*) - решетка из проволоки диаметром 0,0–0,04 мм.



Ненаклеиваемые менее чувствительны, имеют большие габариты.
Наклеиваемые: проволока диаметром 0,01–0,04 мм.
Наиболее распространенная конструкция (рис. *б*)
Фольговые: из металлической фольги толщиной 4–12 мкм

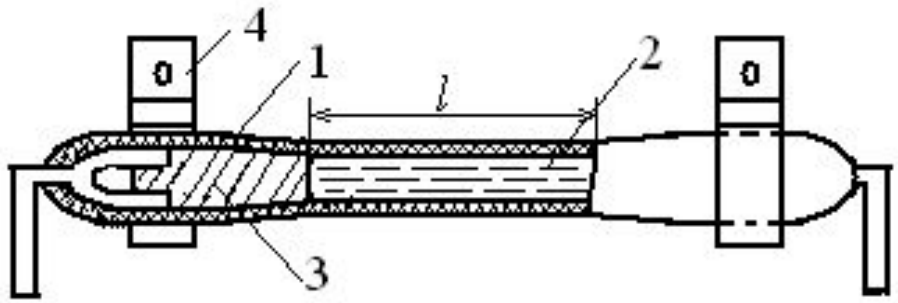


а *б* *в* *г*

Пленочные: изготавливают путем вакуумной возгонки тензочувствительного материала с последующей конденсацией его на подложку через маску (толщина менее 1 мкм).
Материалы: металлические материалы (например, титаноалюминиевые сплавы), полупроводниковые материалы (Ge, Si)
Достоинства: возможность получения заданную форму.
Некоторые пленочные (на основе висмута, титана, кремния или германия) могут быть в виде одной проводящей полоски, у них нет поперечной тензочувствительности.

Жидкостные (*эластичные*) - резиновый капилляр с внутренним диаметром 0,1–0,5 мм, заполненный электролитом или ртутью и снабженный проволочными выводами.

Эластичные с ртутью имеют К = 2 и позволяют измерять весьма большие относительные деформации материалов (до 30–60 %). Особенности: малое номинальное сопротивление, ограниченный температурный и частотный диапазон, низкое начальное сопротивление (до единиц Ом), большой ТКС.



1- каучуковая трубка диаметром 1 мм; 2 – электролит (1,2 Н водный раствор $CuSO_4$); 3 – электроды; 4 – зажимы для крепления.

Достоинства: возможность использования больших напряжений питания (до 500В), можно применять при измерении деформации деталей, находящихся в воде и других жидких средах, не разрушающих каучук.

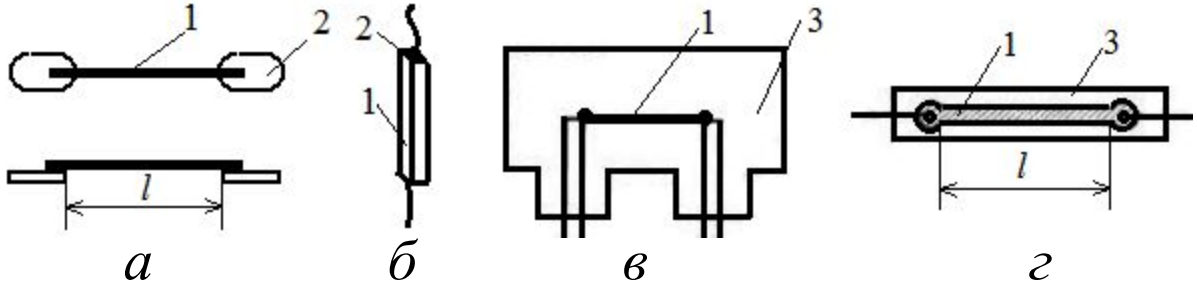
Полупроводниковые: монокристаллические, поликристаллические, интегральные.

Наклеиваемые и ненаклеиваемые.

Монокристаллические: ЧЭ вырезаны из монокристалла; игольчатые кристаллы, полученные выращиванием из газовой фазы и др.

Поликристаллические: тензолиты -искусственные смеси, например, угля (или сажи) и бакелитового лака.

ЧЭ наклеиваемых: полоски толщиной 0,02–0,05 мм, шириной до 0,5 мм и длиной 2–12 мм (вырезаются вдоль определенных направлений). Например, из кремния *p*- типа вырезаются в направлении <111>, а из кремния *n*- типа – в направлении <110>.



1 – ЧЭ; 2 – контактные площадки; 3 - подложка

а, *б* – стержневой; *в* – из игольчатых кристаллов; *г* – пленочный

Основные характеристики статическая характеристика преобразования, коэффициент тензочувствительности, измерительная база, номинальное (начальное) сопротивление, погрешности.

Статическая характеристика для проводниковых в ограниченном диапазоне (изменение сопротивления не превышает 2%):

$$R = R_0(1 + K\varepsilon_l)$$

Коэффициент тензочувствительности К

$$K = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l} \qquad K = 1 + 2\mu + k$$

Для большинства проводниковых твердотельных - К $\approx 1 + 2\mu \approx 2$ ($\mu \approx 0{,}24$-$0{,}4$)

Для никеля К = 12

Для жидкостных $К_{ЖИД} = 2 - \alpha_\varepsilon = 0$, $\mu = 0{,}5$.

Для полупроводниковых: $К \approx \alpha_\varepsilon$

Для проволочных $К_l/К_b$ определяется отношением l/b.

$К_b$ = составляет (0,0025–0,01) $К_l$.

Измерительная база L - длина детали, занимаемая чувствительным элементом тензорезистивного преобразователя.

У проволочных база (1,0 ÷ 100)

У фольговых может быть менее 1 мм.

У полупроводниковых – (2 – 12) мм.

Номинальная (*измерительная*) *база l* определяется как длина детали, занимаемая чувствительным элементом тензорезистивного преобразователя.

Выбирается из ряда: 0,3; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0; 10,0; 15; 20,0; 50,0; 100,0; 200, 0 мм.

На практике могут использоваться тензорезисторы с базами менее 0,3 мм и более 200 мм.

Номинальное (*начальное) сопротивление* R_0 – это сопротивление в отсутствии деформации.

Для проводниковых номинальное сопротивление из ряда: 50, 100, 200, 400, 800 Ом или из ряда: 60, 120, 350, 700, 1000 Ом.

Значения R_0 меньшие чем 50 Ом и большие 1000 Ом устанавливаются соответствующими ТУ.

R_0 полупроводниковых тензорезисторов может достигать десятков килоом.

Допустимая деформация $\varepsilon_{l\ доп}$ – максимальная деформация, при которой отсутствует остаточная деформация и разрушение тензорезистора.

Для большинства тензорезисторов $\varepsilon_{l\ доп} = (3 \div 5) \cdot 10^{-3}$ мкм/м.

Диапазон зависит от длины базы и достигает единиц процентов.

У ненаклеиваемых (свободных) проволочных и жидкостных может достигать 15 % и 60 %.

Для полупроводниковых составляет (0,1–0,2) %.

Основные характеристики некоторых тензорезисторов

Тип тензорезистора	База, мм	R_0, Ом	К	Примечание
КС-120-120-А1-11	120	120	2,1	Проволочный
КС-60-120-А1-11	60	120	2,1	
КФ5П1-0,5-1О0	0,5	100	1,9–2,2	Фольговый
КФ5П2-5-400	5	400	1,9–2,2	
КФ5Р4-15-200	15	200	2,0–2,3	
КМ-10-120	10	120	≈120	Полупроводниковый
КМ-5-12	5	12	≈124	

Факторы погрешностей: изменение температуры, явление ползучести, нелинейность и гистерезис характеристики преобразования.

При изменении температуры наблюдается так называемая *кажущаяся деформация*:

$$\Delta\varepsilon_l = \left[\frac{\alpha_R}{K} + \left(\beta_{\text{Д}} - \beta_{\text{Т}}\right)\right]\Delta t$$

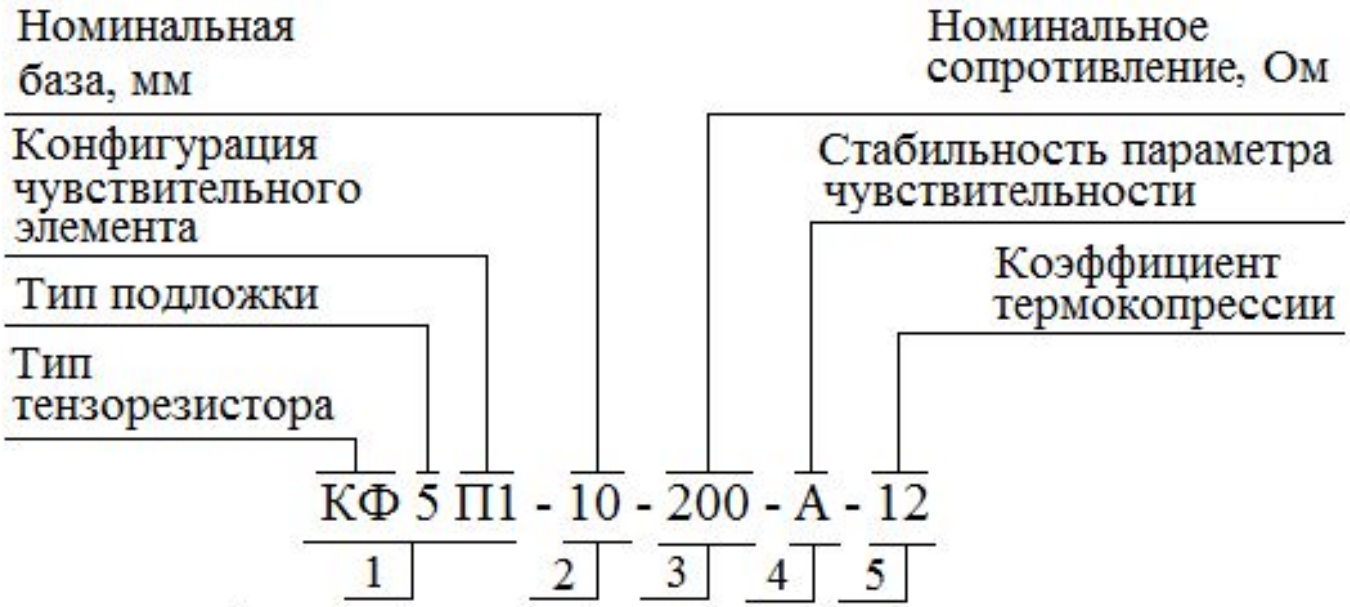
$$\alpha_R \cong \left(\beta_{\text{Т}} - \beta_{\text{Д}}\right)K$$

Термокомпенсированные тензорезисторы, когда материал ЧЭ имеет значение температурного коэффициентом линейного расширения близкое к коэффициенту расширения материала детали.

Термокомпенсированные тензорезисторы изготавливаются для установки на материалы с различными температурными коэффициентами линейного расширения, например выбираемыми из ряда $12 \cdot 10^{-6}$, $17 \cdot 10^{-6}$, $23 \cdot 10^{-6}$, $65 \cdot 10^{-6}$ ^{o}C.

Второй способ уменьшения температурной погрешности - самоком-пенсирующих тензорезисторов, состоящих из двух частей.
Одна часть обладает положительным температурным коэффициентом сопротивления, вторая – отрицательным.
Ползучесть - явление изменения сопротивления тензорезистора во времени при ε_l = const.
Погрешность до (0,05–0,2) %.
Погрешность линейности обусловлена зависимостью коэффициента тензочувствительности от приложенных механических напряжений. Погрешность от сотых долей до единиц процентов.
Суммарная погрешность от десятых (0,1–0,2) % до единиц (1–5) %.

Условное обозначение тензорезисторов - буквенно-цифровой код



КФ – константановая фольга, 5 – армированная бумага, пропитанная клеем, П1 – одиночные прямоугольные; 10 - номинальная база 10 мм; 200 – номинальное сопротивление 200 Ом; А – высокостабильные; 12 – сталь, материал при установке на который тензорезистор является термокомпенсированным, $^{o}C^{-1}$;

Проволочные тензорезисторы - буква – П, например обозначение 2ПКП-10-100В: ПК – проволока из константана; 10 – номинальная база 10 мм; 100 – номинальное сопротивление 100 Ом и т.д.