

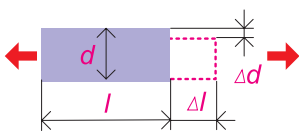
# Что следует знать о тензорезисторах

Тесленко В.А., НТУУ "КПИ", г.Киев

Десятилетиями тензорезисторы остаются основными измерительными преобразователями деформации при исследовании физических свойств материалов и конструкций, в частности, при прочностных испытаниях в различных отраслях науки и техники. И не только. Во многих датчиках силы, веса, давления, перемещения, момента силы, вибрации и т.д. используются тензорезисторы, так как деформация неотъемлемо присутствует при действии перечисленных физических величин. Многими фирмами выпускаются специальные устройства, приборы и системы, предназначенные для работы с тензорезисторами. Однако, начинающих разработчиков и пользователей тензометрической аппаратуры ожидает немало технических проблем.

**П**овторение - мать учения. Давайте-ка вспомним некоторые основные понятия и характеристики из словаря (сопротивления материалов).

**Деформацией** называется изменение формы, размеров или объема тела под действием внешних сил. Деформация, полностью исчезающая после прекращения действия на тело внешних сил, называется **упругой**, а деформация, частично и полностью сохраняющаяся - называется **пластической**. Различают **деформации растяжения** (или **сжатия**), **изгиба**, **кручения** и **сдвига**.



Чаще всего рассматривают линейную деформацию растяжения или сжатия. В этом случае под деформацией понимается отношение приращения размера  $\Delta l$  к первоначальному значению этого размера  $l$ :  $\epsilon = \Delta l / l$ . Как гласит закон Гука, сила упругости, возникающая при деформации тела, пропорциональна удлинению этого тела. Другими словами, в области упругости - деформация пропорциональна механическому напряжению. Механическое напряжение - это отношение действующей силы  $F$  к площади поперечного сечения  $S$ :  $\sigma = F / S$ . Не будет лишним напомнить и о модуле Юнга (модуле упругости), который определяет деформацию в направлении действия силы  $E = \sigma / \epsilon$ , и численно равен механическому напряжению, при котором длина образца изменится в два раза. Соотношение между деформацией  $\epsilon_d$ , перпендикулярной действующей силе (поперечной), и деформацией  $\epsilon$ , совпадающей с направлением действующей силы (продольной), называется коэффициентом Пуассона  $\gamma = -\epsilon_d / \epsilon = -(\Delta d / d) / (\Delta l / l)$ . И, наконец, предел упругости - одна из основных механических характеристик материала. Это напряжение, при котором остаточная деформация не превышает определенного значения, устанавливаемого техническими условиями (например, 0,001; 0,005; 0,03%). Предел упругости ограничивает область упругих деформаций и обозначается  $\sigma_y$ .

После такого напоминания можно перейти и к сути.

**ТЕНЗОРЕЗИСТОР** (от лат. *tensus* - напряженный) - это резистор, деформация которого вызывает изменение его электрического сопротивления. Этот термин не имеет созвучного понятия в английском языке. **Strain gauge** (датчик деформации, прибор для измерения деформа-

ции) - вот наиболее распространенный эквивалент в англоязычной технической литературе.

**КОНСТРУКЦИИ** В большинстве случаев тензорезистор крепится на объект, деформация которого измеряется или преобразуется. При этом деформация тензорезистора практически равна деформации объекта.

Тензорезисторы "подразделяются" на проводниковые (металлические) и полупроводниковые.

**Металлические тензорезисторы** обладают высокой точностью, относительно высокой стабильностью, но имеют низкую чувствительность. Они обычно используются для точного измерения деформаций в широком диапазоне рабочих температур. Металлические тензорезисторы изготавливаются в виде решеток из определенных сплавов, чаще всего - на основе никеля. К таким сплавам относятся: константан, манганин, нихром, карма. Для прецизионных измерений применяется константан. Нихром используется при повышенных рабочих температурах, а карма применяется преимущественно для чувствительных элементов в виде натянутой проволоки. Конструктивно различают проволочные, фольговые и пленочные тензорезисторы.

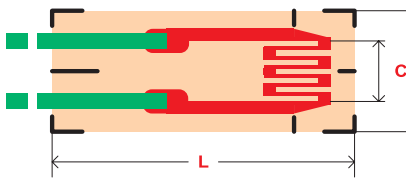
**Проволочные тензорезисторы** изготавливаются преимущественно из константановой проволоки диаметром 20..50 мкм, которая клеивается между подложками из специальной бумаги или пластика. Толщина подложки из пластика (полиимида или эпоксиды) - около 0,03мм. Толщина подложки из бумаги порядка 0,1 мм.

**Фольговые тензорезисторы** также изготавливаются преимущественно из константана. Тензорезистор представляет собой петлевую решетку из тонкой константановой фольги (3..15 мкм), закрепленную с помощью клея на подложке из термостойкой бумаги (фенилоне). В большинстве случаев решетку выполняют фотохимическим способом. Фольговые тензорезисторы лучше проволочных по метрологическим и эксплуатационным характеристикам и широко применяются в датчиках силы (например, со сдвиговыми упругими элементами). В этой группе выделяются высокотемпературные тензорезисторы (с рабочей температурой до 1100 °C), которые изготавливаются из никель-молибденовой или железо-хром-алюминиевой фольги.

**Пленочные тензорезисторы** изготавливаются вакуумной возгонкой тензочувствительного материала с

последующим осаждением на подложку. Металлические тонкопленочные тензорезисторы считаются перспективными, так как технологически можно обеспечить высокую идентичность отдельных экземпляров.

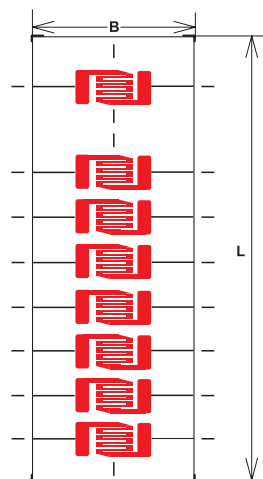
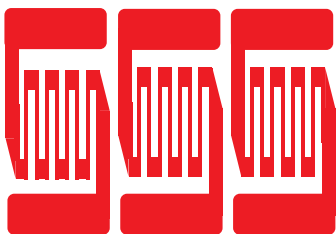
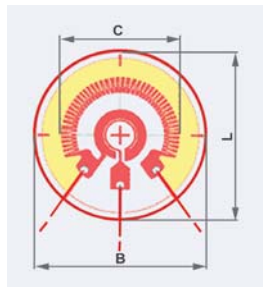
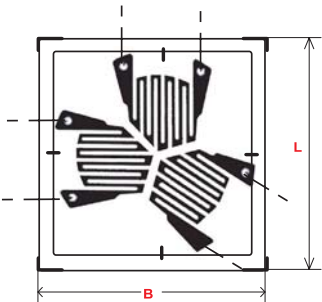
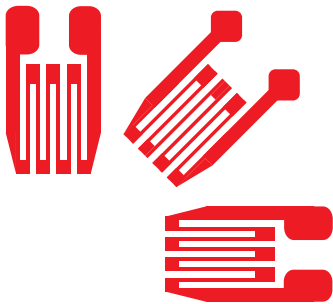
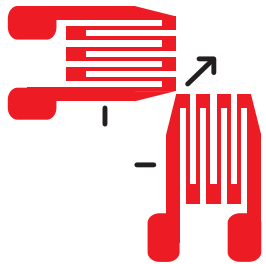
В зависимости от формы и количества элементов на одной подложке, различают несколько основных топологий металлических тензорезисторов: одиночные (однокомпонентные) прямоугольные; тензорезисторные розетки; мембранные тензорезисторные розетки; тензорезисторные цепочки.



прямоугольные; тензорезисторные розетки; мембранные тензорезисторные розетки; тензорезисторные цепочки.

**Одиночные тензорезисторы**

применяются для измерений одноосных деформаций растяжения или сжатия. Особенностью **тензорезисторных розеток** является расположение двух, трех или четырех чувствительных элементов на одной подложке под определенными углами и способность измерять деформации в двух или трех направлениях, совпадающих с главными осями тензорезисторов.



**Мембранные тензорезисторные розетки** предназначены для измерения радиальных и тангенциальных деформаций.

**Тензорезисторные цепочки**, объединяющие до нескольких десятков параллельно расположенных решеток, предназначены для измерения распределенных деформаций. Для сложных условий эксплуатации выпускаются тензорезисторы на полиамидной подложке, герметизированные силиконовой резиной.

Теперь о **полупроводниковых тензорезисторах**.

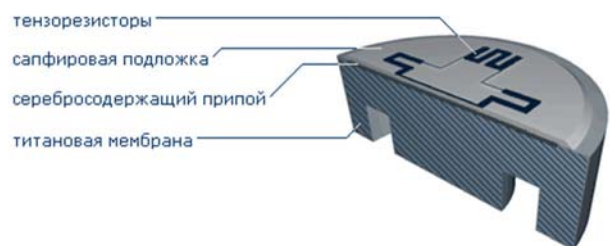
Тензорезистивный эффект в полупроводниках связан, прежде всего, с изменением энергетического спектра носителей заряда при деформации, что приводит к изменению концентрации носителей и их эффективности подвижности. Это обуславливает высокую чувствительность полупроводниковых тензорезисторов (на один - два порядка выше, чем у металлических). Но метрологические характеристики (точность, линейность, температурная и временная стабильность) полупроводниковых тензорезисторов хуже, чем у металлических.

Высокая чувствительность определяет область применения полупроводниковых тензорезисторов - измерение малых деформаций. Полупроводниковые тензорезисторы применяются в датчиках силы, ускорений, моментов силы, давления. В этих случаях градуировка датчиков несколько сглаживает указанные недостатки. Существует несколько основных разновидностей полупроводниковых тензорезисторов.

■ **Полупроводниковые тензорезисторы**, изготавливаются путем механической обработки полупроводниковых монокристаллов, (обычно - кремния). Они представляют собой пластинку монокристалла длиной в несколько мм и толщиной - десятки доли мм, которая наклеивается на пластиковую подложку. Существуют разработки с использованием моносulfида самария, обладающего очень высокой чувствительностью и хорошей линейностью.



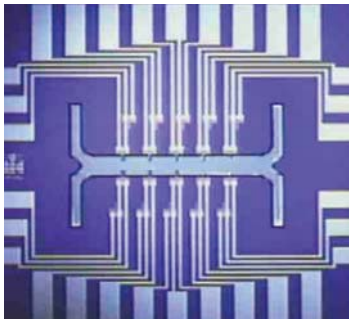
■ **Гетерозитаксиальные тензорезисторы** изготавливаются эпитаксиальным наращиванием легированного кремния на монокристаллическом упругом элементе. Широкое распространение получила технология КНС - кремний на сапфире, которая применяется при изготовлении датчиков давления. Чувствительным элементом в этом случае является двухслойная сапфиро-титановая мембрана. К мембране из титанового сплава по всей поверхности присоединена сапфировая мембрана с помощью специального диффузного процесса. На сапфировой мембране из гетерозитаксиального кремния сформирована схема, состоящая из четырех тензорезисторов.



■ **Диффузионные тензорезисторы (пьезорезисторы)** представляют собой тензочувствительные области, созданные в кремниевом элементе диффузией определенных примесей. Кремниевый элемент одновременно является мембраной, или выполняется в виде другого упругого элемента. Это ограничивает области применения таких элементов (поэтому они и называются **пьезо-**) в качестве характерного примера можно привести миниатюрные датчики давления.



Достижения в области нанотехнологий позволили создать на основе аналогичных конструкций сверхвысокочувствительные зонды и сканирующие системы для атомных силовых микроскопов, принцип действия которых основан на использовании сил атомных связей. Атомные силовые микроскопы используются для определения микрорельефа поверхностей веществ и измерения межатомных взаимодействий (вплоть до определения сил трения отдельного атома), а также при исследованиях в биомолекулярных технологиях. Ниже приведен пример чувствительного элемента, построенного в виде десяти интегральных консолей на одной подложке, в каждую консоль интегрирован тензорезистор толщиной 150 нм.



В ряде случаев применяются **полупроводниковые тензорезистивные пленки**, изготовленные методом напыления. Но эти полукристаллические структуры имеют существенно меньшую чувствительность, чем монокристаллические тензорезисторы.

**ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ** – те, кому еще не надоело многократное повторение слова тензорезисторы, могут далее ознакомиться с их основными характеристиками.

**Номинальное электрическое сопротивление.**

Промышленные тензорезисторы выпускаются с номинальными сопротивлениями в диапазоне от 30 до 3000 Ом. Наиболее распространены тензорезисторы с номинальными сопротивлениями 120, 200, 350, 400 и 1000 Ом.

Отклонение от номинальных значений сопротивлений в партии или группе может составлять десятые доли процента, но может достигать и 10%.

**Номинальная база.**

Промышленные металлические тензорезисторы выпускаются с базами (основными размерами) от десятых долей мм до нескольких десятков мм.

**Коэффициент относительной тензочувствительности.**

Это отношение относительного (здесь трудно обойтись без тавтологии) изменения сопротивления тензорезистора к его деформации:

$$K = (\Delta R/R) / (\Delta l/l)$$

Из известной зависимости сопротивления металлического проводника **R** от удельного сопротивления **ρ**, длины **l** и площади поперечного сечения **S**, т.е. **R = ρ \* l/S**, следует, что полное относительное приращение сопротивления из-за изменений указанных параметров, определяется соотношением:

$$\Delta R/R = (\Delta \rho/\rho) + (\Delta l/l) + (\Delta S/S)$$

Вводя коэффициент Пуассона и допущение, что **ΔS/S ≈ 2\*(Δd/d)** (где **d** - диаметр проводника), коэффициент относительной тензочувствительности определяется следующим образом:

$$K = 1 + 2\gamma + (\Delta \rho/\rho) / (\Delta l/l)$$

Коэффициент Пуассона для металлов лежит в пределах от 0,2 до 0,4. Для части металлов деформация мало сказывается на величине удельного сопротивления. Именно такие металлы используются для построения тензорезисторов. Коэффициент относительной тензочувствительности у них близок к 2. Характеристики преобразования тензорезисторов из таких металлов практически линейны.

Для полупроводниковых тензорезисторов коэффициент относительной тензочувствительности определяется последней составляющей приведенного выше соотношения (изменением удельного сопротивления материала) и достигает значений до ±260.

параметр	значение
номинальное электрическое сопротивление, Ом	400, 600, 700
отклонения электрического сопротивления от номинального, не более, %	± 0.5
коэффициент тензочувствительности	2+10%
температурный коэффициент тензочувствительности, 1/°C	-120 * 10 <sup>-6</sup>
температурный коэффициент сопротивления, 1/°C	15 * 10 <sup>-6</sup>
диапазон температур окружающей среды, °C	-70...+200
база, мм	5 3,8
максимальный ток питания, mA	20
диапазон измеряемых деформаций, мкм/м	± 5000
материал измерительной решетки	сплав НМ23ХЮ-ИЛ
толщина решетки, мкм	5
материал подложки	синтетическая пленка
толщина подложки, мкм	25
контактные площадки	гальваническая медь
среднее значение часовой ползучести при нормальной температуре, %	-0,03
рекомендуемый клей холодного отверждения, горячего отверждения	циакрин ВС-10Т, ВС350, БФР-2К

### Диапазон измеряемых деформаций.

В качестве единицы измерения деформации обычно используется одна миллионная доля [ $10^{-6}$ ] или проценты. На характерный вопрос - "доля чего?" - следует - "доля деформации". Диапазон измеряемых деформаций обычно выражается в тысячах с мультипликативным коэффициентом [ $10^{-6}$ ].

### Ползучесть.

Ползучесть (не очень благозвучное, но меткое название) - это изменение выходного сопротивления тензорезистора в единицу времени (1 час) при постоянном значении измеряемой деформации и неизменных внешних условиях.

### Температурная погрешность.

Температурная погрешность тензорезисторов имеет две основные составляющие.

- первая - определяется температурным коэффициентом сопротивления (как у обычных резисторов).

- вторая составляющая определяется разностью температурных коэффициентов линейного расширения тензорезистора и материала объекта исследования. В некоторых модификациях промышленных тензорезисторов технологически предусматривается температурная компенсация этой составляющей для конкретных материалов объекта, например, стали, титана, алюминия, меди.

### Максимальный рабочий ток.

Максимальный рабочий ток определяется допустимой погрешностью от саморазогрева тензорезистора и зависит от теплопроводящих свойств объекта исследования. Он обычно ограничивается несколькими десятками мА. Ниже приведен характерный перечень основных технических характеристик промышленных тензорезисторов.

**МОНТАЖ.** Метрологические и эксплуатационные

характеристики тензорезисторов, как датчиков деформации, зависят не только от их индивидуальных свойств, но и от способа и качества их монтажа на объекте измерения. Обычно технологические приемы крепления промышленных тензорезисторов приводятся в соответствующей технической документации.

Основным способом монтажа тензорезисторов является приклеивание. Обычно производители тензорезисторов рекомендуют наиболее подходящие клеи для своей продукции.

В зависимости от допустимых рабочих температур тензорезисторов и объектов измерения используются различные клеи, которые подразделяются на полимерные и керамические.

Среди полимерных клеев (термопластических и терморезистивных) можно выделить высыхающие (отверждающиеся) при комнатной температуре и отверждающиеся при повышенных температурах (100 - 250 °С) и повышенных давлениях.

Керамические клеи используются при высоких рабочих температурах, так как температуры их отверждения или спекания составляют сотни градусов (300 - 1000 °С).

Поверхность упругого элемента перед приклеиванием тензорезистора тщательно очищают механическими и химическими средствами. Процесс отверждения ведут по специальной температурно-временной программе. После отверждения приклеенные тензорезисторы защищают от действия окружающей среды.

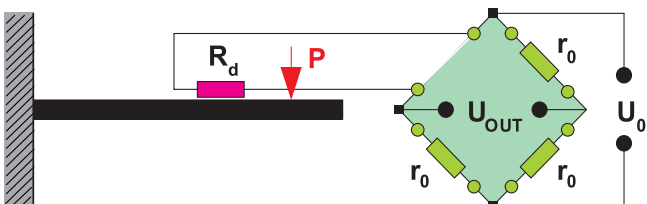
При высокотемпературных или низкотемпературных измерениях и измерениях в агрессивных средах применяются специальные конструкции тензорезисторов, которые привариваются к исследуемому объекту (например,

конструкции, привариваемые на подложку из фольги с диэлектрическим связующим слоем из органосиликата).

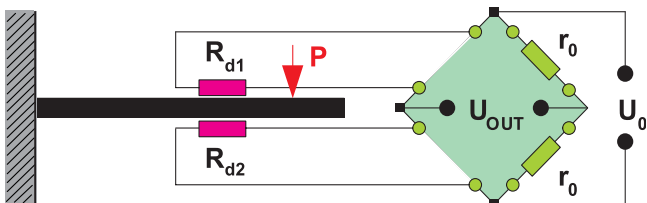
**СХЕМОТЕХНИКА.** В большинстве случаев деформация в пределах упругих свойств материалов не превышает десятых долей процента. О требованиях к измерительным схемам в этих случаях можно судить по такому простому примеру. Допустим, что деформацию в диапазоне  $2000 \text{ мкм}^{-1}$  необходимо измерять с приведенной погрешностью, не превышающей 1%. При этом используется тензорезистор с номинальным сопротивлением 200 Ом и коэффициентом относительной тензочувствительности 2. В этом случае информативное изменение сопротивления тензорезистора составляет 0,8 Ом, а абсолютная погрешность измерения сопротивления не должна превышать 0,008 Ом. Можно добавить, что измерения необходимо обеспечить в широком диапазоне рабочих температур и при наличии существенных помех. Вот где проблемы.

Этот пример свидетельствует о необходимости тщательного выбора измерительных схем. Наиболее подходящее и широко используемое техническое решение - это мост Уитстона (Wheatstone). Используются четверть-мостовые, полумостовые схемы и схемы полного моста.

Четверть-мостовые схемы с одним тензорезистивным датчиком применяются в тех случаях, когда можно пренебречь влиянием внешних факторов, прежде всего - влиянием температуры.

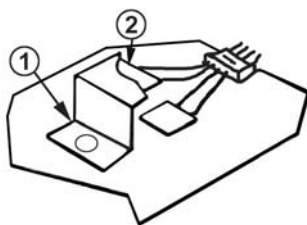


Полумостовые схемы обеспечивают существенную компенсацию температурных погрешностей.



Применяется две основные конфигурации:

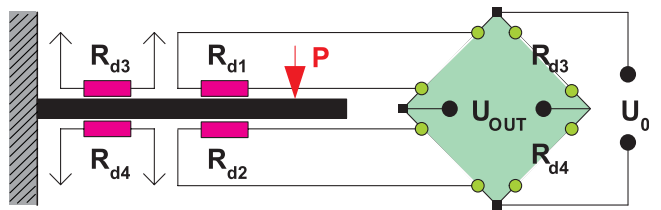
- с одним активным тензорезистором 1, расположенным на деформируемом объекте и вторым - пассивным 2, расположенным вблизи первого, но не подвергающегося деформации;



- с двумя активными тензорезисторами, при возможности расположить их таким образом, чтобы они воспринимали деформацию разного знака (первый - растяжения, второй - сжатия).

Схема полного моста, по аналогии с полумостовой схемой, может работать с двумя активными и двумя пассивными тензорезисторами или с четырьмя активными

тензорезисторами, из которых два воспринимают деформацию растяжения, а два - деформацию сжатия.



При подключении тензорезисторов необходимо:

- принимать все известные меры по защите измерительных цепей от действия помех;
- использовать соответствующее многопроводное подключение датчиков для исключения влияния соединительных проводников;
- помнить, что тензорезистивные мостовые схемы необходимо первоначально балансировать, так как разброс номинальных значений тензорезисторов, даже из одной партии, может достигать единиц процентов.

Желающим подробнее познакомиться со схемами подключения различных датчиков, можно рекомендовать статьи "Датчики в системах сбора данных и управления" и "Подключение датчиков к ПК" ("ПиКАД", № 2, 3, 2004).



Более сотни различных зарубежных фирм производят аппаратуру для работы с тензорезисторами. Среди этого многообразия имеются и специализированные интегральные микросхемы, и специализированные модули сбора данных для распределенных измерительных систем, и одноканальные нормализаторы сигналов с гальванической развязкой, и универсальные многоканальные тензоизмерительные станции. И как всегда, выбор оптимального варианта ограничивается не только техническими характеристиками, но и экономическими соображениями.

**КОНТАКТЫ:**

т. (044) 245-31-00  
e-mail: tesva@yandex.ru