

# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ ДЛЯ МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ

## Области применения:

- Оптические и оптико-электронные приборы
- Адаптивная оптика для лазеров и телескопов
- Оптико-механические системы позиционирования
- Автомобилестроение
- Прецизионное станкостроение
- Медицина
- Микроробототехника
- Бытовая техника (фото- и видео аппаратура)
- Нанотехнологии

# Пьезокерамика — материал XXI века

## Почему?

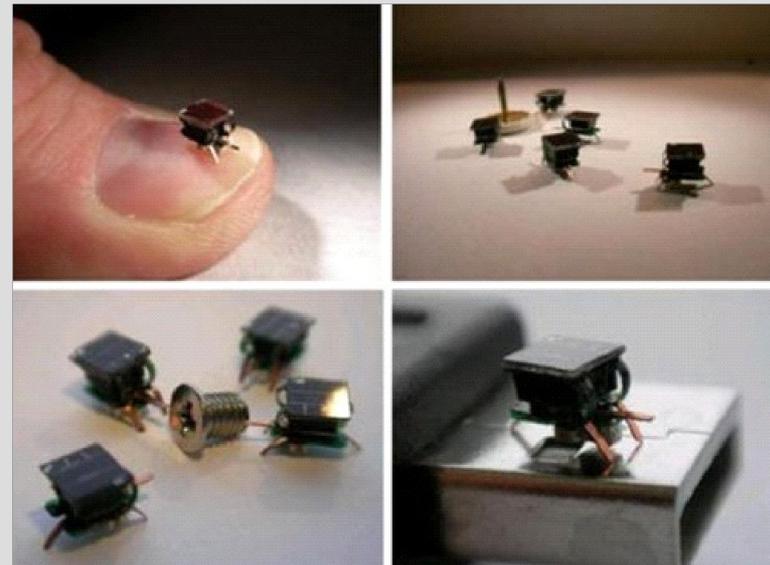
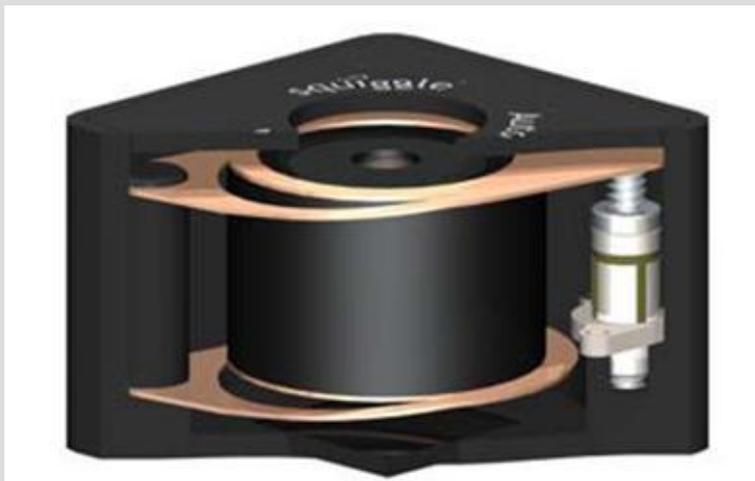
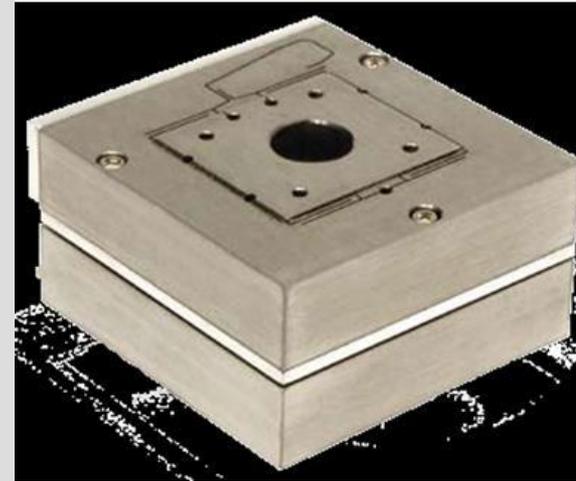
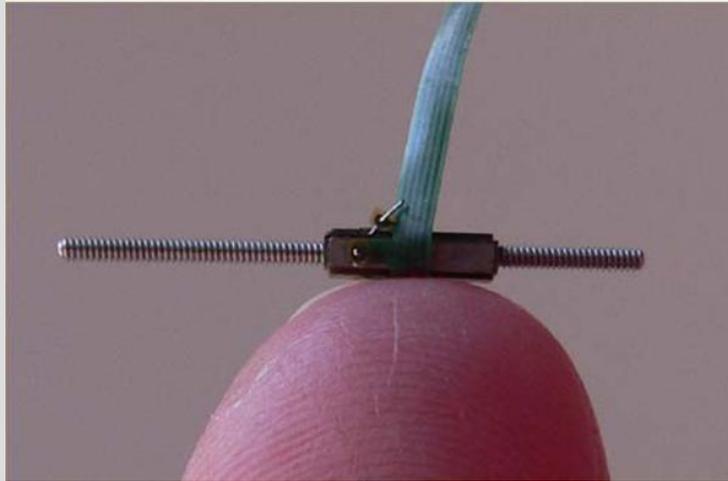
- Высокая надежность – выходит на уровень электронных схем (например, интенсивность отказов пьезоэлементов  $< 10^{-6}$  1/час) основными причинами отказов являются электропробой и разрыв соединительного шва у биморфных элементов, который происходит в результате изгибных колебаний.
- Малые массогабаритные показатели – определяются размерами пьезоэлементов (массогабаритные показатели отдельных узлов систем управления могут быть снижены при применении ПД в десятки раз).
- Высокая радиационная стойкость - ПД могут сохранять работоспособность при воздействии всех известных видов радиоактивного излучения.
- Стойкость к действию различных агрессивных сред – из известных в настоящее время химических соединений только плавиковая кислота способна оказать разрушающее действие на пьезокерамику, что позволяет использовать ПД в ряде химических производств.
- Высокая термостойкость – элементы, изготовленные из некоторых марок пьезокерамики ЦТС, ПКР не теряют своей работоспособности при температурах до 300-400°C, а на основе кобальта способны выдерживать температуру равную и более 700 °C. Разработана также высокотемпературная и высокостабильная пьезоэлектрическая керамика, предназначенная для применения в топливных системах двигателей современных автомобилей. Весьма важным является то, что данная керамика обладает значительной стойкостью к высоким температурам и противоударна. Единообразная частотная реакция делает датчики из данной керамики пригодной для любого типа автомобильного двигателя.
- Возможность использования ПД непосредственно без дополнительных кинематических связей с объектом измерения – что обеспечивает отсутствие дополнительных погрешностей измерения (механических, тепловых и др.).
- Диэлектрическая природа пьезоэлемента – функционирование за счет действия электрического поля (а не тока проводимости), практическое отсутствие тока и связанных с этим тепловыделений в диапазоне инфранизких частот обеспечивает ему качество взрывобезопасного элемента (возможно использование на нефтехимических производствах).

# Пьезопреобразователи в машиностроении

- **Датчики**

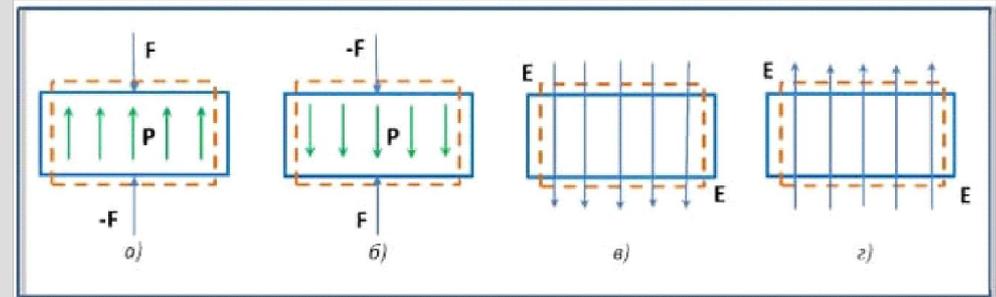
- датчики поворота для определения угла положения;
- датчики детонации;
- датчики уровня заправочных жидкостей;
- датчики давления для измерения давления в топливном баке с целью определения утечки топлива;
- ультразвуковые дистанционные датчики (датчики предотвращения столкновений);
- боковые дистанционные датчики;
- задние ультразвуковые дистанционные датчики;
- датчики системы сигнализации и зуммеры оповещения;
- ударные сенсоры;
- датчики угловой скорости и линейные акселерометры малых перегрузок, ориентированные по трем осям объекта, предназначенные для автоматизированного управления маршрутом;
- датчики и актюаторы положения механизации, для обеспечения динамического регулирования;

# Другие применения пьезокерамических устройств



# Пьезоэлектрический эффект

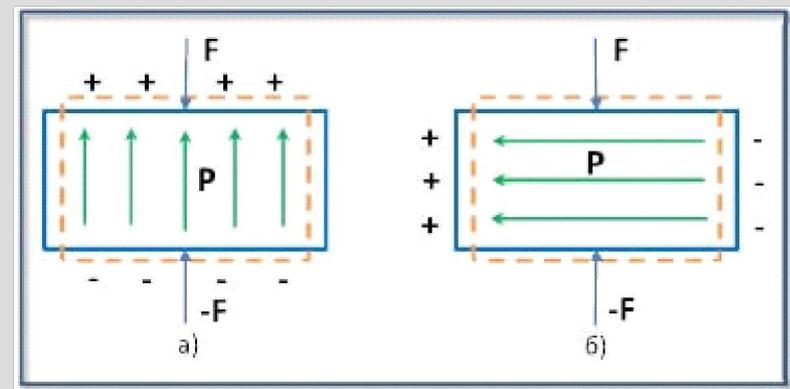
• Механизм пьезоэффекта связан с изменением или возникновением суммарного дипольного момента  $P_m$  при смещении зарядов под действием механических напряжений  $T$  (прямой пьезоэффект) или изменения средних расстояний  $l$  между центрами тяжести, образующих диполь зарядов при действии электрического поля напряженностью  $E$  (обратный пьезоэффект).



- Прямой и обратный пьезоэффект в первом приближении линейны и описываются линейными зависимостями, связывающими электрическую поляризацию  $P$  с механическим напряжением  $T$ :
- $P = dT$
- Данную зависимость называют уравнением прямого пьезоэффекта. Коэффициент пропорциональности  $d$  называется пьезоэлектрическим модулем (пьезомодулем), и он служит мерой пьезоэффекта.
- Обратный пьезоэффект описывается зависимостью:
- $S = dE$ ,
- где  $S$  - деформация;  $E$  - напряженность электрического поля.
- Пьезомодуль  $d$  для прямого и обратного эффектов имеет одно и то же значение.

# Особенности пьезоэффекта

- Пьезоэффект зависит не только от величины механического или электрического воздействия, но и их характера и направления сил относительно кристаллографических осей кристалла.
- Пьезоэффект может возникать в результате действия как нормальных, так и касательных напряжений.
- Существуют направления, для которых пьезоэффект равен нулю. Пьезоэффект описывается несколькими пьезомодулями, число которых зависит от симметрии кристалла.
- При совпадении направлений поляризации и механического напряжения пьезоэффект называют продольным, а при их взаимно перпендикулярном расположении - поперечным.



Схематические изображения, поясняющие продольный (а) и поперечный (б) пьезоэффекты

## Полное описание пьезоэффекта

- Для более полного математического описания пьезоэлектрических свойств используют: два вектора ( $E$  – напряженность электрического поля и  $D$  – индукция или электрическое смещение) и в силу анизотропии материала два тензора второго ранга ( $T$  – механическое напряжение и  $S$  – деформация), которые связаны между собой матрицами упругих, пьезоэлектрических и диэлектрических постоянных. Комплекс этих постоянных в наиболее общем случае среды без центра симметрии представляет собой матрицу размерности  $9 \times 9$ , каждый столбец которой связан с одной из независимых переменных напряжения (компоненты упругого напряжения и электрического поля), а каждая строка с одной из зависимых переменных деформации (компоненты деформации или электрической индукции). Данная матрица симметрична и в общем случае содержит 45 коэффициентов (6 – диэлектрических проницаемостей, 21 – упругую податливость, 18 – пьезоэлектрических модулей). При учете симметрии кристаллов происходит уменьшение числа независимых коэффициентов.

# Уравнения термодинамического состояния Мэзона

$$S = s^E T + d_t E$$

$$T = c^D S + h D$$

$$T = c^E S - e_t E$$

$$S = s^D T + g_t D$$

$$D = d_t T + \varepsilon^T E$$

$$E = -h S + \beta^S D$$

$$D = e_t - \varepsilon^S E$$

$$E = -g_t T + \beta^T D$$

$$g_t, e_t, d_t, h$$

- пьезоэлектрические постоянные,

$$\beta^S, \varepsilon^S, \beta^T, \varepsilon^T$$

- диэлектрические постоянные

$$s^E, c^E, c^D$$

- коэффициенты упругости

$$[c_{ij}^D] = \begin{bmatrix} c_{11}^D & c_{12}^D & c_{13}^D & 0 & 0 & 0 \\ c_{12}^D & c_{11}^D & c_{13}^D & 0 & 0 & 0 \\ c_{13}^D & c_{13}^D & c_{33}^D & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44}^D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55}^D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66}^D \end{bmatrix}$$

$$[h_{nm}^T] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & h_{15}^T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_{15}^T & 0 & 0 \\ h_{31}^T & h_{31}^T & h_{33}^T & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[\beta_{nm}^S] = \begin{bmatrix} \beta_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{11}^S & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{33}^S \end{bmatrix}$$

# Уравнения движения элемента сплошной среды Ньютона и Максвелла

$$\frac{\partial T_x}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 \varpi_x}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial T_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 \varpi_y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial T_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial T_z}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 \varpi_z}{\partial t^2}$$

$\varpi_x, \varpi_y, \varpi_z$  - декартовы составляющие вектора упругих перемещений

$T_x, T_y, T_z$  - сдвиговые механические напряжения

$T_{xz}, T_{xy}, T_{yx}$  - механические напряжения вдоль осей

$\rho$  - плотность пьезоматериала