

# Пьезокерамика и перспективы ее применения

Благодаря своим уникальным свойствам, пьезокерамика находит все большее применение в различных областях техники. Производители пьезокерамики, элементов и компонентов на ее базе, стремясь удовлетворить требованиям рынка, постоянно улучшают параметры своих изделий.



Thanks to the unique properties, piezoceramics increasingly take up the application in various areas of technics. Manufacturers of piezoceramics, elements and components on their base, being in an effort to meet market requirements, constantly improve products features.

## Явление пьезоэлектрического эффекта

Пьезоэлектрический эффект был открыт в 1880 году Джексоном и Пьером Кюри. Они заметили, что в некоторых кристаллах при механическом воздействии на них появляется электрическая поляризация, причем степень ее пропорциональна величине воздействия. Позже Кюри открыл инверсионный пьезоэлектрический эффект — деформирование материалов, помещенных в электрическое поле. Эти явления еще называют прямым и обратным пьезоэлектрическим эффектом.

Пьезоэлектрический эффект присущ некоторым природным кристаллам, таким как кварц и турмалин, которые в течение многих лет использовались в качестве электромеханических преобразователей. Кристаллическая решетка кристаллов, обладающих пьезоэлектрическим эффектом, не имеет центра симметрии. Воздействие (сжимающее или растягивающее), приложенное к такому кристаллу, приводит к поляризации после разделения положительных и отрицательных зарядов, имеющих в каждой отдельной элементарной частице. Эффект практически линейный, то есть степень поляризации прямо пропорциональна величине прилагаемого усилия, но направление поляризации зависимо, так как усилия сжатия или растяжения

генерируют электрические поля, а следовательно, и напряженье противоположной полярности. Соответственно, при помещении кристалла в электрическое поле упругая деформация вызовет увеличение или уменьшение его длины в соответствии с величиной и направлением полярности поля.

## Пьезоэлектрические материалы

Пьезоэлектрические материалы условно можно разбить на две группы:

- **Пьезоэлектрические монокристаллы.** Природные пьезоэлектрические материалы имеют достаточно высокую стоимость. В связи с этим потребности бурно развивающейся электроники в настоящее время удовлетворяются синтетическими пьезоэлектрическими монокристаллами, которые выращиваются в специальных установках. Пьезоэлектрические свойства таких кристаллов с достаточно высокой повторяемостью можно задавать путем композиции входящих в них компонентов.

Выращенные кристаллы определенным образом режутся на пластины, некоторые (сегнетоэлектрики) поляризуются, и из них путем шлифования и нанесения электродов изготавливаются пьезоэлектрические элементы.

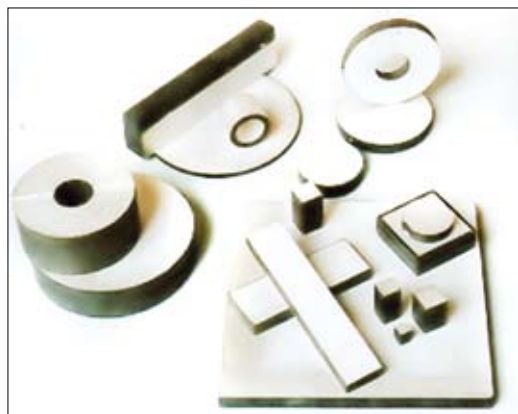
- **Пьезоэлектрическая керамика (пьезокерамика).** По физическим свойствам это поликристаллический сегнетоэлектрик, представляющий собой химическое соединение или твердый раствор (порошок) зерен (кристаллитов).

По химическому составу это сложный оксид, включающий ионы двухвалентного свинца или бария, а также ионы четырехвалентного титана или циркония. Путем изменения основного соотношения исходных материалов и введения добавок синтезируют различные составы пьезокерамики,

обладающие определенными электрофизическими и пьезоэлектрическими характеристиками. Наибольшее распространение получила группа пьезокерамических материалов типа ЦТС (цирконата-титаната свинца). Вместе с тем используется керамика на основе титаната бария (ТБ) и титаната свинца (ТС). В последние годы разрабатываются новые пьезокерамические материалы со свойствами, позволяющими в некоторых случаях использовать их вместо более дорогостоящих пьезоэлектрических кристаллов. В частности, разработана и производится группа материалов на основе ниобата свинца, которая уже нашла практическое применение благодаря возможности ее использования в диапазоне частот до 30 и более МГц. Значительные исследования проводятся по созданию пьезокерамических композиционных материалов, а также многослойной керамики. Зарубежные производители, в зависимости от пьезоэлектрических свойств, делят ее на сегнетожесткую и сегнетомягкую. В отечественной практике существует дополнительное деление на керамику средней сегнетожесткости, а также выделяются высокостабильные, высокотемпературные и т. п. материалы.

Качество пьезокерамики характеризуется следующими, принятыми за рубежом, основными параметрами:

- $K_{33}^T$  ( $\epsilon_{33}^T / e_0$ ) — относительная диэлектрическая проницаемость;
- $\text{tg } \delta$  — тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1 кГц в слабых полях;
- $T_c$  ( $T_k$ ) — температура точки Кюри;
- $K_p$ ,  $K_{33}$ ,  $K_{31}$ ,  $K_{15}$  — коэффициенты электромеханической связи;
- $d_{33}$ ,  $d_{31}$ ,  $d_{15}$  — пьезоэлектрические модули;
- $g_{33}$ ,  $g_{31}$ ,  $g_{15}$  — электрические коэффициенты по напряжению;
- $Y_{11}^E$ ,  $Y_{33}^E$  — модули Юнга;
- $N_L$ ,  $N_T$ ,  $N_R$  — частотные постоянные;
- $S_{11}^E$ ,  $S_{33}^E$  — параметр эластичности;



- $\rho$  — плотность;
- $Q_m$  — механическая добротность.



## Пьезокерамические элементы

В отличие от пьезоэлектрических кристаллов, пьезокерамические элементы изготавливаются методом полусухого прессования, шликерного литья, горячего литья под давлением, экструзии или изостатического прессования с последующим обжигом на воздухе при температуре 1000–1400 градусов по Цельсию. С целью уменьшения пористости обжиг может проводиться в среде кислорода, или элемент изготавливается с помощью метода горячего литья. По специальной технологии на поверхность заготовок наносится электроды.

После этого керамику делают пьезоэлектрической с любым выбранным направлением поляризации путем помещения ее в сильное электрическое поле при температуре ниже так называемой точки Кюри. Поляризация обычно является окончательным процессом при изготовлении пьезокерамических элементов, хотя за ним следует термостабилизация и контроль параметров.

Пьезоэлектрическая керамика представляет собой твердый, химически инертный материал, совершенно нечувствительный к влажности и другим атмосферным воздействиям. По механическим качествам она подобна керамическим изоляторам.

В зависимости от предназначения пьезоэлементы могут иметь самую разнообразную конфигурацию — от плоской до объемной (сферы, полусферы и т. п.)

Для последующего понимания целесообразно ввести следующее общепринятое в зарубежной практике условное деление типовых пьезоэлементов в зависимости от их конфигурации: пластина (plate), диск (disc), кольцо (ring), брусок (bar), стержень (rod), цилиндр (cylinder). Существуют также гибкие пьезокерамические элементы: пластинчатые (plate

bender) и дисковые (disc bender), которые, в свою очередь, подразделяются на юниморфы (unimorph), то есть однослойные, и биморфы (bimorph) — двухслойные.

Такое условное деление не безупречно (цилиндр, по сути дела, является трубкой, и в зависимости от высоты его можно назвать кольцом; в то время как кольцо по своей конфигурации напоминает шайбу). Вместе с тем, оно общепринято и позволяет упростить в процессе заказа описание требуемого элемента. В нашей же практике один и тот же элемент потребители называют по-разному, и без чертежа или более подробного описания трудно представить порой, какой элемент хотел бы приобрести заказчик. Например, «кольцо» у нас называют кольцом, шайбой и таблеткой, «диск» — диском, шайбой и таблеткой.

## Применение пьезокерамических элементов

Пьезоэлектрические элементы идеальны при использовании в качестве электромеханических преобразователей. Они достаточно широко используются для изготовления пьезокерамических компонентов, узлов и устройств. Некоторые пьезокерамические элементы уже изначально могут выполнять функции компонента или узла (например, пластинчатые биморфы) и не нуждаются в дополнительной доработке. Все изделия, изготовленные на базе пьезокерамики, подразделяют на следующие основные группы: генераторы, датчики (сенсоры), актюаторы (пьезоприводы), преобразователи и комбинированные системы.

**Пьезокерамические генераторы** преобразуют механическое воздействие в электрический потенциал, используя прямой пьезоэффект. Примерами могут служить искровые воспламенители нажимного и ударного типов, применяемые в разного рода зажигалках и поджигающих системах, а также твердотельные батареи на основе многослойной пьезокерамики, применяемые в современных электронных схемах.

**Пьезокерамические датчики** преобразуют механическую силу или движение в пропорциональный электрический сигнал, то есть также основаны на прямом пьезоэффекте.

В условиях активного внедрения компьютерной техники датчики являются незаменимыми устройствами, позволяющими согласовывать механические системы с электронными системами контроля и управления.

Выделяются два основных типа пьезокерамических датчиков: осевые (механическая сила действует вдоль оси поляризации) и гибкие (сила действует перпендикулярно оси поляризации).

В осевых датчиках в качестве пьезоэлементов используют диски, кольца, цилиндры и пластины. В качестве примеров можно привести датчики ускорения (акселерометры), датчики давления, датчики детонации, датчики разрушения и т. п.

Гибкие датчики строятся на основе последовательных (слои керамики имеют противоположную направленность поляризации) и параллельных (направленность поляризации слоев совпадает) пьезокерамических биморфов. Наиболее распространены датчики силы и ускорения.

**Пьезокерамические актюаторы (пьезоприводы)** строятся на принципе обратного пьезоэффекта и поэтому предназначены для преобразования электрических величин (напряжения или заряда) в механическое перемещение (сдвиг) рабочего тела.

Актюаторы подразделяются на три основные группы: осевые, поперечные и гибкие. Осевые и поперечные актюаторы имеют еще общее название — многослойные пакетные, так как набираются из нескольких пьезоэлементов (дисков, стержней, пластин или брусков) в пакет. Они могут развивать значительное усилие (блокирующую силу) до 10 кН при управляющем напряжении 1 кВ, но при очень малых отклонениях рабочей части (от единиц нанометров до сотен микрон). Такие актюаторы также называют мощными.

Гибкие актюаторы (биморфы) развивают незначительную блокирующую си-



лу при малых (сотни микрон) отклонениях рабочей части. Однако американской компании APC International Inc. удалось создать и выйти на рынок с новым типом пластинчатого биморфа — «ленточным актюатором» (зарегистрированная торговая марка). Ленточный актюатор может обеспечивать блокирующую силу 0,95 Н и величину отклонения 1,2 мм или отклонение до 3 мм и блокирующую силу 0,6 Н.

Гибкие актюаторы относятся к группе маломощных. К этой же группе будут относиться и перспективные осевые актюаторы, представляющие собой моноблок, изготовленный по технологии многослойной пьезокерамики.

Пакетные актюаторы могут производиться предприятиями, не связанными с производством пьезокерамики. Гибкие же и осевые актюаторы из многослойной керамики сами по себе являются пьезокерамическими элементами. Их могут производить только предприятия, владеющие технологиями и оборудованием для производства пьезокерамических элементов.

**Пьезокерамические преобразователи** предназначены для преобразования электрической энергии в механическую. Так же как и актюаторы, основываются на принципе обратного пьезоэффекта.

Преобразователи, в зависимости от диапазона частот, подразделяются на три вида:

- *звуковые* (ниже 20 кГц) — зуммеры, телефонные микрофоны, высокочастотные громкоговорители, сирены и т. п.;
- *ультразвуковые* — высокоинтенсивные излучатели для сварки и резки, мойки и очистки материалов, датчики уровня жидкостей, дисперсионные распылители, генераторы тумана, ингаляторы, увлажнители воздуха. Значительной группой выделяются так называемые ультразвуковые измерители расстояния в воздушной среде (Air Transducers), являющиеся пьезокерамическими компонентами. Они используются в качестве измерителей расстояния

для автотракторной техники, сенсоров наличия и движения в охранных системах, в уровнемерах, для дистанционного контроля и управления, в устройствах отпугивания птиц, зверей, сельскохозяйственных вредителей и т. д. Производятся устройства трех типов: передающие, приемные и приемо-передающие;

- *высокочастотные ультразвуковые* — оборудование для испытания материалов и неразрушающего контроля, диагностика в медицине и промышленности, линии задержки и т. д.

**Комбинированные пьезокерамические системы** преобразуют электрические величины в электрические, при последовательном использовании обратного и прямого пьезоэффектов. В качестве примеров таких систем можно привести эхолоты, измерители потоков, пьезотрансформаторы, «искатель ключа».

### О некоторых перспективах использования пьезокерамики

Несмотря на то, что пьезоэффект был открыт еще в XIX веке, а со второй половины XX активно развивались теория и технология создания пьезокерамических материалов, считается, что пьезокерамика — один из перспективных материалов века XXI. Причиной такого взгляда является то, что замечательные свойства, присущие пьезокерамике, до сих пор не в полной мере востребованы наукой, техникой и технологиями.

Активное использование пьезокерамики в различных областях началось в 60–70 годах XX века. Достаточно хорошо были изучены и использованы свойства пьезокерамических датчиков и пьезокерамических преобразователей. В настоящее время пьезокерамика широко используется для ультразвуковой диагностики в медицине, авиационном и железнодорожном транспорте, энергетике, нефтегазовом комплексе; силовая пьезокерамика — в ультразвуковой сварке, чистке поверхностей, нанесении покрытий, сверлении и т. д.

В то же время пьезокерамика еще недостаточно используется для создания генераторов, актюаторов и в комбинированных системах. Однако современные требования по энергосбережению, миниатюризации, адаптивности к компьютерным системам управления и контроля



все чаще заставляют производителей техники и оборудования обращаться к производителям пьезокерамики с целью совместного поиска тех или иных технологических решений с помощью пьезокерамики. В результате появляются новые типы пьезокерамики, создаются новые и совершенствуются известные пьезокерамические элементы и компоненты. Особое внимание в настоящее время уделяется пьезокерамическим трансформаторам и актюаторам.

**Пьезотрансформаторы.** Хотя настоящее потребление пьезотрансформаторов не так велико, потенциал их применения в будущем, тем не менее, огромен.

Одним из перспективных направлений является их использование в бытовых и производственных газонаполненных осветительных приборах в качестве резонансных DC-AC конверторов. Сейчас для этих целей применяются самые разные компоненты. В основу перспективных осветительных приборов уже заложены принципы, позволяющие экономить до 80% электроэнергии по сравнению с ныне используемыми приборами. Поэтому единственным параметром, которому должны отвечать перспективные конверторы, являются их минимальные геометрические размеры. Изучение рынка подтверждает, что разработчиков осветительной техники интересуют не столько сравнительные характеристики по напряжению или по потребляемой мощности конверторов, сколько размеры, позволяющие устанавливать их в цоколе лампы. Последние исследования показали целесообразность использования многослойных пьезокерамических трансформаторов в новой осветительной технике. Были разработаны прототипы таких конверторов, удовлетворяющие практически всем требованиям, кроме цены. Поэтому производители



пьезокерамики активно работают над технологией, которая позволила бы добиться снижения их себестоимости.

Другим перспективным направлением использования пьезотрансформаторов является их применение в силовых устройствах. На рынке появились современные устройства, которые используют не традиционные однослойные (Rosen Type) пьезотрансформаторы, а многослойные трансформаторы. Примерами этого могут служить дисплеи обратного свечения на жидких кристаллах (The liquid crystal display back light) и системы управления холодным катодом флуоресцентного освещения (Driving cold cathode fluorescent lightning). В качестве достоинств многослойных пьезотрансформаторов, по сравнению с традиционными, можно отметить их малый размер (особенно, толщина) и меньшее потребление энергии. Однако для современных многослойных трансформаторов, которые появились на рынке, определяющими факторами по-прежнему являются цена и размеры, над снижением которых активно работают производители.

Существует большая вероятность использования пьезотрансформаторов в перспективных телевизионных и компьютерных дисплеях. Уже отработаны прототипы таких дисплеев, которые получили название ПЭД — Полевые Эмиссионные Дисплеи (FED — Field Emission Display). Это плоские панельные дисплеи, имеющие более высокую разрешающую способность и четкость изображения по сравнению с современными. Однако уже сейчас разрабатывается новое поколение экранов с немерцающим изображением (Flicker Free Image Screen), для питания которых также предусматривается использование многослойных пьезокерамических трансформаторов. Рынок телевизионной и компьютерной техники изумляет своими новинками и заставляет производителей пьезокерамических элементов интенсифицировать исследования и разработки в данной области.

**Актюаторы.** Как было сказано выше, актюаторы условно подразделяются на мощные (пакетные) актюаторы и маломощные, к которым относятся гибкие (биморфы и ленточные) и осевые актюаторы, изготовленные по технологии многослойной пьезокерамики.

Пакетные актюаторы (Stack Actuators) уже сейчас применяются

в космической, лазерной технике и оптических инструментах для настройки антенн и зеркал с манометрической точностью. Считается, что они найдут более широкое использование там, где важно развить движущее усилие при минимальном угле перемещения.

Одним из перспективных направлений является их применение в точной настройке станков. Благодаря своей жесткой структуре пьезопроводы являются идеальным инструментом для быстрой и точной их настройки. Прилагая фиксированное напряжение к шаблону в фазе с вращением шпинделя, можно обеспечить высокую точность обработки детали рабочим телом станка.

В станкостроении планируется их использование и для подавления (ком-



пенсации) вибрации. Нежелательную вибрацию станков можно компенсировать с помощью многослойных актюаторов, работающих в противофазе с вибрационными колебаниями. Это, в свою очередь, будет способствовать повышению качества конечного изделия, а также позволит избежать чрезмерного износа инструмента и существенно снизит уровень шума станка. Компенсаторы вибрации могут найти применение не только в станкостроении, но и в других сферах.

Еще одним перспективным направлением использования пакетных актюаторов является управление гидравлическими клапанами. Примером этого могут служить последние разработки пьезокерамических высокоскоростных клапанов как для топливной аппаратуры дизельных двигателей легковых и грузовых автомобилей, так и для газораспределительных систем дизелей и двигателей внутреннего сгорания.

Гибкие актюаторы используются в пьезоэлектрических датчиках изгибающего момента, читающих по методу Брайля электронных системах для слепых, в качестве электронных переключателей. Создание ленточных

актюаторов существенно расширило их использование. Изначально ленточный актюатор был разработан по запросу текстильной промышленности для компьютерных систем подачи нитей в жаккардовых машинах. Благодаря высокой чувствительности, отношению большой блокирующей силы и величине отклонения новые пьезоэлементы позволяют использовать их в качестве сенсорных выключателей и контакторов, пьезопроводов, бесшумных успокоителей в электронном оборудовании, микрокомпрессоров, закрывающих и открывающих клапанов различного назначения, в том числе для программируемой дозированной подачи лекарств, вакуумных клапанов и т. п.

Весьма перспективным считается использование в микроэлектронике осевых актюаторов, разработанных на основе последних достижений в технологии многослойной композитной пьезокерамики. Размеры актюаторов составляют от единиц миллиметров до десятых долей миллиметра.

Ярким примером комплексного использования пьезокерамических элементов, узлов и деталей на их основе могут послужить совместные разработки американской компании APC International, Ltd. с производителями комплектующих для автомобильной промышленности.

Современные, технически сложные автомобили постоянно требуют внедрения дополнительной электроники для повышения надежности, безопасности и комфорта. В настоящее время американские производители автомобильной техники активно используют устройства и узлы на базе пьезоэлектрической керамики. Примерами таких устройств могут служить:

- актюаторы-клапаны впрыска топлива;
- актюаторы-клапаны для газораспределительной системы двигателя;
- датчики поворота — для определения угла положения дроссельной заслонки;
- датчики детонации;
- датчики уровня заправочных жидкостей;
- датчики давления — для измерения давления в топливном баке с целью определения утечки топлива;
- пьезопроводы зеркал;
- пьезопроводы регулировки сидений;
- передние ультразвуковые дистанционные датчики (датчики предотвращения столкновений);

- боковые дистанционные датчики;
- задние (парковочные) ультразвуковые дистанционные датчики;
- датчики системы сигнализации и зуммеры оповещения;
- скоростные сенсоры в передней панели для подушек безопасности;
- боковые ударные сенсоры подушек безопасности;
- аварийные датчики-сенсоры подушек безопасности;
- актюаторы системы антиблокировки тормозов;
- пьезоприводы системы подвески;
- датчики угловой скорости и линейные акселерометры малых перегрузок, ориентированные по трем осям автомобиля, предназначенные для автоматизированного управления маршрутом;
- пьезоприводы регулировки фар;
- датчики и актюаторы положения фар — для обеспечения динамического регулирования луча света передних фар в зависимости от профиля дороги и изменения величины полезной нагрузки автомобиля;
- пьезоакустические системы адаптивного регулирования скорости автомобиля.

Инновационная разработка актюаторов (пьезоприводов) и датчиков обеспечивает решение многих проблем автомобилестроения и улучшает эксплуатационные качества автомобиля, отвечающие жестким эксплуатационным требованиям.

Эффективность действия систем сигнализации, оповещающих зуммеров, биморфных и униморфных актюаторов (пьезоприводов), пьезоприводов зеркал и систем регулировки положения сидений, подъемников стекол, управления клапанами двигателя и ударных датчиков подушек безопасности улучшились благодаря разработке и использованию в производстве новых пьезокерамических материалов со сверхмалыми частотами.

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.

Таким образом, пьезокерамика благодаря своим уникальным свойствам находит все большее применение в различных областях техники и технологии. Иностранные производители пьезокерамики, элементов и компонентов на ее базе, пытаются более полно удовлетворить современные требования рынка, проводят исследования и конструкторские работы с целью улучшения параметров керамики, разрабатывают ее новые типы, на что выделяются значительные финансовые средства. С целью удешевления продукции разрабатываются новые технологии, более энергосберегающие и позволяющие автоматизировать процессы производства. Считается, что только крупные компании-производители пьезокерамики, оснащенные передовыми технологиями и современным оборудованием, смогут в полной мере удовлетворить требования мирового рынка.

*Сергей Жуков*