

МАОУ «Радумльский лицей-интернат»

Радумльский кадетский корпус

Научный проект на тему:

«Пьезоэлектрики: принцип работы и  
практическое применение»

Ст. кадета 5 взвода Курбонова Рамзеса

Солнечногорск 2018

**Цель проекта:** ознакомление с пьезоэлектричеством, с образцами пьезоэлементов, с их принципами действия и применениями в современных технологиях, обоснование перспектив развития пьезоэлектричества в науке и технике.

**Гипотеза:** применение пьезоэлектрической энергии является востребованным для разных отраслей экономики и оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации.

## Содержание

1. Введение. -----	3
2. Основная часть. Типы пьезоэлектриков. -----	5
3. Применение пьезоэлектриков в мировом масштабе. -----	10
4. Сравнительный анализ пьезоэлектриков. -----	16
5. Практическая работа. -----	18
6. Заключение. -----	20
7. Выводы. -----	22
8. Приложения. -----	22
9. Библиография. -----	23

## Введение

**Пьезоэлектрики** — диэлектрики, в которых наблюдается пьезоэффект, то есть те, которые могут либо под действием деформации индуцировать электрический заряд на своей поверхности (прямой пьезоэффект), либо под влиянием внешнего электрического поля деформироваться (обратный пьезоэффект).

*Краткая историческая информация о пьезоэлектриках.*

В 1756 г. русский академик Ф. Эпинус обнаружил, что при нагревании кристалла турмалина на его гранях появляются электрические заряды. В дальнейшем этому явлению было присвоено наименование пироэлектрического эффекта. Ф. Эпинус предполагал, что причиной электрических явлений, наблюдаемых при изменении температуры, является неравномерный нагрев двух поверхностей, приводящий к появлению в кристалле механических напряжений. Одновременно он указал, что постоянство в распределении полюсов на определённых концах кристалла зависит от его структуры и состава, таким образом, Ф. Эпинус<sup>1</sup> подошел вплотную к открытию пьезоэлектрического эффекта.

Пьезоэлектрический эффект в кристаллах был обнаружен в 1880 г. братьями П. и Ж. Кюри, наблюдавшими возникновение на поверхности пластинок, вырезанных при определённой ориентировки из кристалла кварца, электростатических зарядов под действием механических напряжений. Эти заряды пропорциональны механическому напряжению, меняют знак вместе с ним и исчезают при его снятии.

Развития пьезоэлектрического приборостроения тесно связано со становлением функциональной электроники и многочисленных приборов, систем и технологий, связанных с ультразвуком.

Пьезоэлектричество (ПЭ) сразу же после его открытия привлекло к себе внимание многих исследователей. Примерно к 1910г. немецким ученым Фогтом уже была разработана феноменологическая теория ПЭ, не потерявшая, в определенной степени, свое значение и до сих пор.

Начало практического использования ПЭ связывают с именем П. Кюри, который впервые использовал пластинку кварца в качестве датчика радиоактивного излучения. Одним из первых практических приборов, основанных на использовании ПЭ, был сейсмограф, созданный в России Б. Б. Голицыным в 1915г. В военных целях для обнаружения

подводных лодок П. Ланжевен разработал ультразвуковой прибор (эхолот), ставший впоследствии прообразом различных гидроакустических систем. Основу прибора составляли кварцевые пластинки.

### **Что есть пьезоэлектрический эффект?**

**Пьезоэлектрический эффект** (от греч. *piézō* (πίεζω) — давить, сжимаю) — эффект возникновения поляризации диэлектрика под действием механических напряжений (*прямой пьезоэлектрический эффект*). Существует и обратный пьезоэлектрический эффект — возникновение механических деформаций под действием электрического поля.

При прямом пьезоэффекте деформация пьезоэлектрического образца приводит к возникновению электрического напряжения между поверхностями деформируемого твердого тела, при обратном пьезоэффекте приложение напряжения к телу вызывает его деформацию.

Образование электростатических зарядов на поверхности диэлектрика и возникновение электрической поляризации внутри него в результате воздействия механического напряжения называют прямым пьезоэлектрическим эффектом.

Наряду с прямым существует обратный пьезоэлектрический эффект, заключающийся в том, что в пластине, вырезанной из пьезоэлектрического кристалла, возникает механическая деформация под действием приложенного к ней электрического поля; причём величина механической деформации пропорциональна напряжённости электрического поля.

Пьезоэлектричество появляется только в тех случаях, когда упругая деформация кристалла сопровождается смещением центров тяжести положительных и отрицательных зарядов элементарной ячейки кристалла, т. е. когда она вызывает индивидуальный дипольный момент, который необходим для возникновения электрической поляризации диэлектрика под действием механического напряжения. В структурах, имеющих центр симметрии, никакая однородная деформация не сможет нарушить внутреннее равновесие кристаллической решётки и, следовательно, пьезоэлектрическими являются кристаллы только 20 классов, у которых отсутствует центр симметрии. Отсутствие центра симметрии является необходимым, но не достаточным условием существования пьезоэлектрического эффекта, и поэтому не все ацентричные кристаллы обладают им.

## Основная часть

### 1. Типы пьезоэлектриков.

#### Кварц.

Кварц - широко распространённый в природе минерал, ниже температуры 573 по Цельсию кристаллизуется в тригонально-трапецоэдрическом классе гексагональной сингонии. Он принадлежит к энантиоморфному классу и встречается в природе в двух модификациях: правой и левой.

Кварц относится к числу наиболее твёрдых минералов, обладает высокой химической стойкостью.

Внешние формы природных кристаллов кварца отличаются большим разнообразием. Наиболее обычной формой является комбинация гексагональной призмы и ромбоэдров (пирамидальные грани). Грани призмы расширяются к основанию кристалла и имеют на поверхности горизонтальную штриховку.

Годный для использования в пьезоэлектрической аппаратуре кварц встречается в природе в виде кристаллов, их обломков и окатанных галек. Цвет от бесцветно-прозрачного (горный хрусталь) до чёрного (морион).

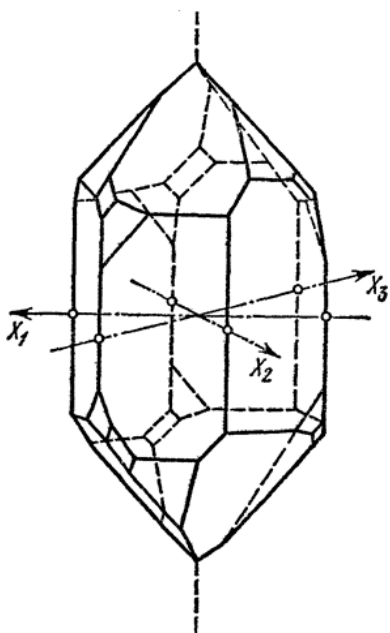
Обычно природные кристаллы кварца содержат в себе различные дефекты, снижающие их ценность. К числу дефектов относятся включение инородных минералов (рутил хлорит), трещины, пузыри, фантомы, голубые иглы, свили и двойники.

Для пьезоприборов не берут целых кристаллов. Кристаллы распиливают на пластины, строго ориентированные относительно их кристаллографических осей, из этих пластин затем изготавливают прямоугольные или круглые пластинки, которые потом шлифуют под определенный размер. Толщина пластинок тщательно выдерживается, поскольку от нее зависит резонансная частота колебаний. Одна или несколько пластинок, соединенных с металлическими слоями на двух широких поверхностях, называются **пьезоэлементами**.

В настоящее время наряду с природными используются синтетические кристаллы кварца, выращиваемые в автоклавах при повышенных температуре и давлении из насыщенных диоксидом кремния щелочных растворов.

Пьезоэлектрические свойства кварца широко используются в технике для стабилизации и фильтрации радиочастот, генерирования ультразвуковых колебаний и для измерения механических величин (**пьезометрия**).

Чтобы обнаружить пьезоэлектрические заряды, на грани кристаллической пластинки накладываются металлические обкладки. При разомкнутых обкладках между ними при деформации появляется разность потенциалов. При замкнутых обкладках на них образуются



индуцированные заряды, равные по величине поляризационным зарядам, но противоположные им по знаку, и в цепи, соединяющей обкладки, в процессе деформации возникает ток.

Рассмотрим основные особенности пьезоэлектрического эффекта на примере кварца. Кристаллы кварца  $\text{SiO}_2$  существуют в различных кристаллографических модификациях.

Интересующие нас кристаллы (а-кварц) принадлежат к так называемой тригональной кристаллографической системе и обычно имеют форму, показанную на рис. 1. Они напоминают шестигранную призму, ограниченную двумя пирамидами, однако имеют еще ряд дополнительных граней. Такие кристаллы характеризуются четырьмя кристаллическими осями,

определяющими важные направления внутри кристалла.

Рис. 1. Кристалл кварца.

*Возникновение поляризационных зарядов определенных знаков при данном типе деформации (растяжение или соответственно сжатие) показывает, что концы осей X неравноправны, и осям X можно приписать определенные направления (что отмечено на рис. 1 стрелками).*

*Это значит, что при данной деформации знак заряда зависит от того, направлена ли ось X по внешней нормали к грани или по внутренней. Такие оси с неравноправными концами получили название полярных осей. В отличие от полярных осей  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ , концы оси Z совершенно равноправны и она является неполярной осью.*

### **Турмалин.**

Турмалин кристаллизуется в тригонально-пирамидальном классе тригональной сингонии. Кристаллы призматические с продольной штриховкой, удлинённые, часто игольчатой формы.

По химическому составу турмалин представляет собой сложный алюмоборосиликат с примесями магния, железа или щелочных металлов (Na, Li, K).

Цвет от чёрного до зелёного, также красный до розового, реже бесцветный. При трении электризуется, обладает сильным пьезоэлектрическим эффектом.

Турмалин широко распространён в природе, однако в большинстве случаев кристаллы изобилуют трещинами. Бездефектные кристаллы, годные для пьезоэлектрических резонаторов, встречаются редко.

Основным преимуществом турмалина является большее значение частного коэффициента по сравнению с кварцем. Благодаря этому, а также из-за большей механической прочности турмалина возможно изготовление резонаторов на более высокие частоты.

В настоящее время турмалин почти не используется для изготовления пьезоэлектрических резонаторов и имеет ограниченное применение для измерения гидростатического давления.

### **Сегнетова соль.**

Сегнетова соль кристаллизуется в ромботетраэдрическом классе ромбической сингонии. Принадлежность к энантиоморфному классу определяет теоретическую возможность существования правых и левых кристаллов сегнетовой соли. Однако получаемые из отходов виноделия кристаллы сегнетовой соли бывают только правыми.

Для предохранения от воздействия влаги пьезоэлементы из сегнетовой соли покрывают тонкими пленками лака.

Пьезоэлементы из сегнетовой соли широко использовались в аппаратуре, работающей в сравнительно узком температурном интервале, в частности, в звукоснимателях. Однако в настоящее время они почти полностью вытеснены керамическими пьезоэлементами.

Дигидрофосфат аммония. Дигидрофосфат аммония кристаллизуется в тетрагональной сингонии. Кристаллы представляют собой комбинацию тетрагональной пирамиды и призмы.

Кристаллы дигидрофосфата не содержат кристаллизованной воды и не обезвоживаются. При 93% относительной влажности воздуха кристаллы начинают поглощать влагу и растворяются.

Дигидрофосфат аммония плавится при температуре 190 градусов Цельсия, однако выше 100 градусов с поверхности кристалла начинает улетучиваться аммиак. Это ограничивает верхний предел рабочих температур.

В настоящее время вследствие широкого развития пьезоэлектрической керамики применение дигидрофосфата аммония ограничено.

Винокислый калий. Виннокислый калий (условное обозначение ВК) кристаллизуется в монокристаллической сингонии.

Содержащаяся в ВК кристаллизационная вода прочно связана. Опытным путём установлено, что до температуры 80 градусов обезвоживание не наступает. Заметное растворение ВК начинается при 80% влажности.

Резонаторы из ВК имеют высокие добротности и коэффициента электромеханической связи. Они могут заменять кварц в фильтрах дальней связи.

### **Ниобат лития.**

Ниобат лития - синтетический кристалл, кристаллизуется в дитригонально-пирамидальном классе ромбоэдрической сингонии.

Ниобат лития не растворяется в воде, не разлагается при высоких температурах, отличается высокой механической прочностью. По электрическим свойствам он представляет собой сегнетоэлектрик с температурой Кюри около 1200 градусов Цельсия.

Благодаря своим высоким пьезоэлектрическим и механическим свойствам, в том числе и высокой добротности, ниобат лития является перспективным материалом для изготовления преобразователей различного назначения. Тонкие (толщиной около одного микрометра) пленки ниобата лития, получаемые катодным распылением в вакууме, представляют собой ориентированные поликристаллические текстуры, которые могут быть использованы в качестве излучателей и приемников ультразвуковых колебаний СВЧ - диапазона.

Материалы с различными свойствами подразделяются на марки (по составу и характеристикам) и на функциональные группы (по назначению).

Материалы функциональной группы 1 применяются для изготовления высокочувствительных пьезоэлементов, работающих в режиме приема или излучения механических колебаний. Материалы функциональной группы 2 предназначены для пьезоэлементов, эксплуатирующихся в условиях сильных электрических полей или высоких механических напряжений. Материалы функциональной группы 3 применяются для изготовления пьезоэлементов, обладающих повышенной стабильностью резонансных частот в зависимости от температуры и времени, а функциональной группы 4 - для высокотемпературных пьезоэлементов.

### **Рассмотрим теперь свойства пьезокерамики различных типов.**

*Материалы на основе титаната бария.*

Титанат бария является сегнетоэлектриком. Пьезокерамикатитаната бария (ТБ-1) широко применяется для изготовления преобразователей, к которым не предъявляют жесткие



требования по температурной и временной стабильности характеристик. Отсутствие в рецептуре титаната бария летучих при обжиге компонентов и простота технологии изготовления пьезоэлементов делают этот материал по-прежнему распространенным в технике.

*Материалы на основе твердых растворов титаната - цирконата свинца.* Твердые растворы титаната свинца обладают очень высокими значениями пьезоэлектрических характеристик. На основе этих твердых растворов были разработаны серии технологических пьезокерамических материалов, условное наименование ЦТС (за рубежом PZT).

*Материалы на основе метаниобата свинца.* Твердые растворы метаниобатов свинца и бария имеют высокую температуру точки Кюри. Материалы на их основе имеют стабильные в широком температурном интервале значения пьезомодулей и резонансных частот. Технология изготовления изделий из них проще, чем из материалов марки ЦТС, так как входящие в состав ниобатной керамики оксид свинца практически не летуч при обжиге.

*Пьезоэлектрики - полимеры.*

Некоторые полимерные материалы в виде механически ориентированных и поляризованных в электрическом поле пленок являются полярными текстурами, в которых наблюдается пьезоэлектрический эффект. Среди них практический интерес представляет поливинилиденфторид (ПВДФ). При вытяжке пленок из этого полимера на 300...400% они ориентируются с образованием особой конформации, которая после поляризации в сильном электрическом поле приобретает пьезоэлектрический эффект.

*Пьезоэлектрические текстуры.*

Текстуры, представляющие собой ориентированную определенным образом в пространстве совокупность пьезоэлектрических кристаллов, не имеющих центра симметрии, могут обладать пьезоэлектрическим эффектом. Пьезоэффект в текстурах сегнетовой соли был открыт А. В. Шубниковым; им же были установлены основные закономерности пьезоэффекта в аналогичных средах. В настоящее время такие текстуры не представляют практического интереса. Наибольшее значение имеют текстуры на основе поляризованной пьезоэлектрической керамики.

*Пьезоэлектрическая керамика.*

Сегнетоэлектрические свойства таких материалов обуславливают возможность пьезоэлектрического эффекта. Под влиянием постоянного электрического поля некоторая часть доменов ориентируется в направлении приложенного поля. После снятия внешнего

поля большая часть доменов удерживается в своем новом положении из-за внутреннего поля, которое возникает в результате параллельной ориентации направлений поляризации доменов. Благодаря этому керамика становится полярной текстурой, которая обладает пьезоэффектом.

Керамическая технология изготовления пьезоэлементов не накладывает принципиальных ограничений на их форму и размеры. Эти обстоятельства, а также высокие значения пьезоэлектрических характеристик обусловили широкое применение керамических пьезоэлементов в технике, в особенности в устройствах для излучения и приема ультразвуковых колебаний.

Особенности технологии изготовления керамических пьезоэлементов. Отличительной чертой процесса изготовления пьезокерамических изделий является их поляризация сильным постоянным электрическим полем, которое прикладывается обычно после нанесения электродов на спеченную заготовку, полученную одним из методов керамической технологии.

## **2. Применение пьезоэлектриков в мировом масштабе.**

Развития пьезоэлектрического приборостроения тесно связано со становлением функциональной электроники и многочисленных приборов, систем и технологий, связанных с ультразвуком.

Пьезоэлектричество (ПЭ) сразу же после его открытия привлекло к себе внимание многих исследователей. Примерно к 1910г. немецким ученым Фогтом уже была разработана феноменологическая теория ПЭ, не потерявшая, в определенной степени, свое значение и до сих пор.

Начало практического использования ПЭ связывают с именем П. Кюри, который впервые использовал пластинку кварца в качестве датчика радиоактивного излучения. Одним из первых практических приборов, основанных на использовании ПЭ, был сейсмограф, созданный в России Б. Б. Голицыным в 1915г. В военных целях для обнаружения подводных лодок П. Ланжевэн разработал ультразвуковой прибор (эхолот), ставший впоследствии прообразом различных гидроакустических систем. Основу прибора составляли кварцевые пластинки.

Далее последовали на основе ПЭ разработки для телефонов, стабилизаторов и кварцевых генераторов частоты. Впервые, такой базовый элемент функциональной пьезоэлектроники, как пьезотрансформатор, был предложен У. Кэди в 30-х годах XX века.

В России родиной ПЭ становится Санкт-Петербург. Именно там, в 1927 году состоялась первая Всесоюзная конференция по использованию ПЭ колебаний. Основой промышленного производства пьезоэлектриков (в те годы - кварца) стал трест № 13, на базе которого в 1941г. был организован завод. Этот завод после войны был преобразован в Центральную Научно-исследовательскую Лабораторию Пьезотехники (НИИЛП), а в 1960г. в Научно-исследовательский Институт Пьезотехники (НИИП), в последующем Научно Производственное Объединение "Фонон", предприятие "ЭЛПА".

Конец 40-х годов ознаменовался открытием ПЭ-свойств у поляризованной керамики титаната бария и последующим бурным открытием целого ряда новых материалов класса сегнетоэлектриков. Одним из ведущих центров по исследованию и открытию новых сегнетоэлектриков был Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе.

Крупные научные исследования в эти и последующие годы проводились в различных отраслевых НИИ и крупнейших вузах страны в Ленинграде, Москве, Киеве, Ростове-на-Дону, Томске и других городах.

С 70-х годов XX века основу большинства приборов, устройств и систем с использованием ПЭ-явлений и эффектов составляют пьезокерамические материалы (ПКМ), а именно твердые растворы цирконата-титаната свинца (ЦТС, PZT), модифицированные различными компонентами и добавками.

Был разработан ряд групп, включающих "сегнетомягкие", "сегнетосредние" и "сегнетожесткие" ПКМ и группы ПКМ по их преимущественному признаку применения (например, для частотно-селективных устройств и т. п.), а также высокотемпературные ПКМ, электрооптические и пироэлектрические материалы. Номенклатура изделий, изготавливаемых только, например, предприятием "ЭЛПА", насчитывала 9 групп — это элементы из ПКМ, фильтры, резонаторы и генераторы, частотно-избирательные микроблоки, усилители, электроакустические преобразователи и датчики, устройства микроперемещений, источники питания, медицинские приборы и другие традиционные направления в электронике.

Ультразвуковые (УЗК) технологии, в основном, использовались по трем направлениям: 1 — воздействие УЗК на жидкие среды и интенсификация различных процессов на этой основе; 2 — воздействие УЗК на твердые тела (ТТ) непосредственно с целью их разрушения (обработка материалов — сверление, гравировка и т.п.) или на ТТ в жидких средах

(процессы мойки изделий, стирки, измельчения и т. п.); 3 - воздействие УЗК на границы раздела сред (сварка, склеивание, уменьшение трения, вулканизация и т.п.).

Кроме активных, в информационно-измерительной технике широко использовались и традиционные пассивные УЗК-технологии — расходомеры, теплосчетчики, разнообразные датчики и т.п.

Одним из ведущих вузовских центров с начала 70-х годов по изучению, исследованию и созданию новых ПКМ являлся Ростовский государственный университет.

К концу XX века в Японии, США, ФРГ, Англии, Франции, Дании, России и других странах номенклатура ПЭ насчитывала сотни наименований. Это многочисленные пьезодатчики, осуществляющие преобразование различных физических величин электрической и неэлектрической природы; пьезогенераторы, пьезотрансформаторы, пьезофильтры; микросенсорные и сигнальные устройства; пьезо- и сегнетоэлектрические репрограммируемые запоминающие устройства; пьезодвигатели линейного, вращательного и сложного видов движения; микроманипуляторы и микророботы; ультразвуковые генераторы, излучатели, приемники; пьезомикрофоны, звукосниматели, громкоговорители, зуммеры; устройства для медицинской и бытовой техники (коагуляторы, счетчики Гейгера, фены, микровентиляторы, клапаны, насосы, реле, зажигалки, озонаторы, ингаляторы, шокеры, ножи-инструменты, звуковые индикаторы и охранные устройства) и т. д.

В настоящее время ведущие позиции в выпуске пьезокерамических элементов (около 80% мирового рынка) занимают Япония и США. Увеличение потребностей в ПЭ и рост объемов их производства обусловлены расширением областей их применения не только в военной и космической технике, но и широким внедрением их в промышленную технологию, метрологию, медицину, в оборудование для научных исследований, в бытовые устройства самого разнообразного функционального назначения.

Такие фирмы как «Piezosystems», «Burleigh», «GeneralElectric» (США), «Ferroperm» (Дания), «Shinsei», «Matsushita», (Япония), «MorganMatroc» (Великобритания) и др., интенсивно ведут исследования и выпускают широкую номенклатуру разнообразных пьезоизделий. Стоимость выпускаемых пьезоматериалов, элементов, приборов и устройств в настоящее время составляет сотни млн. долл. в год.

Необходимо отметить, что потребительский рынок приборов на основе функциональной пьезокерамики чрезвычайно широк. Например, только источники питания на базе высоковольтных пьезотрансформаторов (ПТ) сегодня получили применение для внедрения различных промышленных электростатических технологий, в телевидении, осциллографии, для мониторов ЭВМ, для ламп дневного света и рекламных неоновых ламп, для различных индикаторных устройств, лазеров, в медицине, в бытовых приборах и т. д. (Япония, США, Южная Корея, ФРГ, Франция, Дания, РФ и др.). Общая потребность только в ПТ для разнообразных применений составляет до сотни миллионов в год.

### **Несколько примеров применения пьезоэлектриков в XXI веке.**

*Портативный комплекс генерации энергии на основе физических упражнений пользователя.*

В работе рассматривается спортивный снаряд – эспандер, изготовленный из гибкого пьезоэлектрика, при деформации которого появляется некоторый потенциал, которым предлагается заряжать мобильные устройства.

Эспандер – это распространенная группа спортивных снарядов, упражнения с которыми основаны на упругой деформации. Упругий элемент или их группа, обеспечивают нагрузку на мышцы человека, противодействуя движению. Эспандер может быть пружинным, резиновым или изготавливаться из других эластичных материалов.

Помимо бесспорной пользы, которую человек получает от физических упражнений, предлагается также использовать эспандер для зарядки высокотехнологичных устройств – например, мобильного телефона.

Для решения данной задачи предлагается изготовить эспандер из гибкого пьезоэлектрика. Таким образом, эспандер из пьезоэлектрика при изменении своей формы позволяет получить электрический заряд, который и будет использоваться для зарядки мобильного устройства.

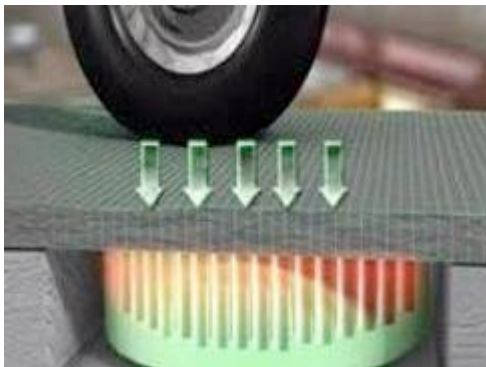
*Стельки – генераторы электрической энергии.*

Когда в наших мобильных устройствах садится аккумулятор, они перестают быть мобильными и вынуждены сидеть «на привязи», пока не закончится процесс зарядки. Молодая компания SolePower предлагает свое решение проблемы.

Решение это называется так же, как и создавшая его компания, и представляет из себя стельки, способные вырабатывать, аккумулировать и хранить электроэнергию в небольшом

внешнем аккумуляторе, который можно впоследствии использовать для зарядки, например, телефона, MP3-плеера или навигатора. Все, что для этого нужно – выйти на прогулку, предварительно вставив их в любую обувь.

*Пьезогенераторы - новые источники электроэнергии. Фантазии или реальность?*



Тонкая пьезоэлектрическая пленка на оконном стекле, поглощающая шум улицы и преобразующая его в энергию для зарядки телефона. Пешеходы на тротуарах, эскалаторах метро, которые заряжают через пьезо преобразователи аккумуляторы автономного освещения. Плотные потоки автомобилей на оживленных трассах, вырабатывающие мегаватты электроэнергии, которой хватает для целых городов и поселков.

Фантастика? К сожалению, пока да, и таковой может остаться. Есть большая вероятность, что



скоро закончится ажиотаж вокруг сенсационных сообщений о чудесных перспективах генераторов энергии на пьезоэлементах. А мы будем опять мечтать о безопасной, возобновляемой и, что греха таить, дешевой электрической энергии, полученной с привлечением других явлений. Ведь список физических эффектов замечательно велик.

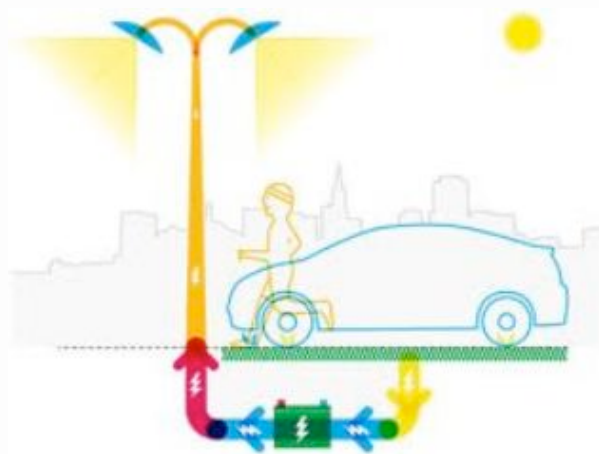
В зависимости от направления преобразования энергии **пьезоэлектрики** делятся на **генераторы (прямое преобразование)** и **двигатели (обратное)**. Термин “пьезогенераторы” характеризует не эффективность превращения, а только направление преобразования энергии.

Именно **первым явлением, связанным с генерацией электричества при механическом воздействии**, заинтересовались в последние годы инженеры и изобретатели. Как из рога изобилия, посыпались сообщения о возможностях получения электрической энергии, утилизируя уличный шум, движение волн и ветра, нагрузки от перемещения людей и машин.

Сегодня известно несколько примеров практического использования подобной энергии. **На станции метро «Марунучи» в Токио установлены пьезогенераторы в зале для приобретения билетов.** Скопления пассажиров хватает для управления турникетами.

**В Лондоне, в элитной дискотеке, пьезогенераторы питают несколько ламп, которые стимулируют танцующих и ...продажу прохладительных напитков.** Стали обыденными пьезоэлектрические зажигалки. Сейчас любой курильщик носит в кармане собственную «электростанцию».

Сравнительно недавно взорвало мировую общественность сообщение об испытаниях систем получения энергии от движущегося автотранспорта. **Израильские ученые** из небольшой фирмы **Innowattech** подсчитали, что **1 километр автобана может генерировать электрическую мощность до 5 МВт.** Они не только выполнили расчеты, но и вскрыли несколько десятков метров полотна автострады и смонтировали под ним свои пьезогенераторы. Казалось, что наконец наступил прорыв в области альтернативной энергетики. Но в этом возникают серьезные сомнения.



### 3. Сравнительный анализ пьезоэлектриков.

Пьезоэлектричество – физическое явление, которое известно человечеству достаточно давно и довольно неплохо исследовано учеными. Однако его невероятный потенциал еще не используется в полной мере. Пьезорезонаторы и генераторы оказались полезными во многих видах электрических измерений. Недавно ими стали пользоваться как электрическими фильтрами для линий связи и радиоприемных установок.

В то же время, когда исследовались кристаллический резонатор и его приложения, едва ли меньше усилий было положено на нерезонансные применения кварца, сегнетовой соли и в меньшей степени турмалина. Было изобретено много приборов, особенно в Германии и Японии, для измерений взрывных давлений и скоростей, ускорений, сил, вибраций в машинах и пр. В Соединенных Штатах прогресс шел главным образом в области акустики, путем использования чрезвычайно большого пьезоэлектрического эффекта в сегнетовой соли. Путем остроумных применений пластинок из кристаллов сегнетовой соли были разработаны микрофоны, телефоны, патефонные адаптеры, приборы для звукозаписи и другие устройства, во многих отношениях превосходящие своих электромагнитных предшественников.

Возрождение интереса к пьезоэлектричеству привело к обширным исследованиям свойств сегнетовой соли. Это вещество оказалось самым замечательным из всех известных диэлектриков и прототипов группы кристаллов, известных под названием

□ сегнетоэлектриков □. Их пьезоэлектрические свойства во многом аналогичны со свойствами ферромагнитных материалов и тесно связаны между собой.

Что касается атомной теории пьезоэлектричества, то достигнутые до сих пор успехи весьма невелики. Ранние попытки предпринимались братьями Кюри, Рике и Фогтом, а особенно Кельвином. Наиболее строгая трактовка принадлежит М. Борну, который в свою общую теорию динамики кубической решётки включил рассмотрение и пьезоэлектрических эффектов.

Несмотря на то, что пьезоэффект был открыт еще в XIX веке, а со второй половины XX активно развивалась 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 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.

Особое внимание в настоящее время уделяется пьезокерамическим трансформаторам и актюаторам:

- высокой надежности, 50 миллионов коммутационных циклов
- возможность работы в химически агрессивных средах, в воде, песке, металлической стружке
- искробезопасная, бесконтактная коммутация
- небольшие габариты
- современный дизайн
- широкий диапазон рабочих температур -40 до +125 градусов
- большой диапазон токов и напряжений
- возможность антивандального исполнения
- низкая стоимость.

В отличие от существующих сенсоров, емкостных, индуктивных и др., пьезокнопки не требуют дополнительного источника питания.

В современной линейке струйных принтеров Epson применяется печатающая головка нового поколения. В ней для реализации пьезоэлектрического метода печати используется многослойный пьезоэлемент, толщина которого составляет 20 микрон.

Многослойный пьезоэлемент обладает следующими преимуществами:

- высокое формируемое давление;
- быстрое и стабильное срабатывание;
- высокая частота колебаний пьезоэлемента и пластины;
- долговечность;
- экономичность;
- высокая скорость печати;
- печать с разрешением 1440 и 2880 dpi.

Пьезокерамика, благодаря своим уникальным свойствам находит все большее применение в различных областях техники и технологии.

Пьезоэлектрические материалы могут быть разбиты на:

**монокристаллы**, встречающиеся в виде природных минералов или

**искусственно выращиваемые** (кварц, дигидрофосфаты и аммония, сегнетова соль, ниобат лития, силикоселенит и германоселенит и др.), и

**поликристаллические сегнетоэлектрические твердые растворы**, подвергнутые после синтеза поляризации в электрическом поле (пьезокерамика). Из Пьезоэлектрические материалы первой группы применяются лишь некоторые например кварц, обладающий большой температурной стабильностью свойств, механической прочностью, малыми диэлектрическими потерями и влагостойкостью.

Недостатки — сравнительно слабый пьезоэффект, малые размеры трудность обработки.

#### **4. Практическая работа.**

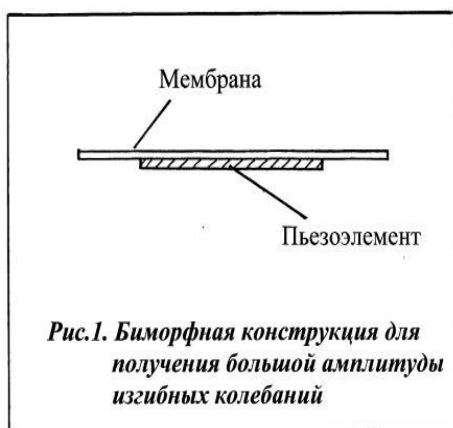
##### **Как с помощью пьезокерамики получить звук**

Вообще, пьезокерамика неблагодарная субстанция, для того, чтобы свои колебания сообщить воздушной среде. Проиллюстрируем это на таком примере. Пусть в пьезокерамическом образце возбуждена стоячая волна. Она характеризуется некоторым значением звукового давления и амплитудой смещения частиц при колебаниях. Поставим вопрос.

Как отличаются амплитуды колебаний частиц в керамике и в воздухе при равных там и там звуковых давлениях? Ответ: в 75 тысяч раз. Причина в том, что произведение плотности воздуха на скорость звука в воздухе в 75 тысяч раз меньше, чем аналогичное произведение для керамики. Доля излучения по мощности ещё меньше – одна семидесяти пятитысячная в квадрате! Иное дело, передача звука в воду. Её плотность в тысячу раз больше и скорость звука в пять раз больше, чем у воздуха. Поэтому техника гидроакустики и техника воздушной акустики имеют мало общего.

Несмотря на такую пессимистическую предпосылку с помощью пьезокерамики удаётся получать значительные показатели по громкости. Отдельные образцы пьезокерамических преобразователей могут развивать звуковое давление на расстоянии 1м до 130дБ. Как ощутить эту цифру? Это болевой порог. Абсолютное значение звукового давления, соответствующего 130дБ – это 60 н/м<sup>2</sup> или 6 кг/м<sup>2</sup>. Такой звук давит на барабанную перепонку с силой, примерно 0,2Г.

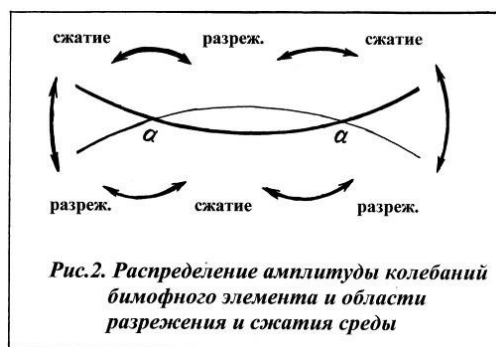
Кто не знает, что такое биметаллическая пластина? Две спечённые металлические пластины с различными коэффициентами линейного расширения при нагревании изгибаются на величину, многократно превышающую термическое удлинение. А если бы одна из пластин удлинялась, а другая пластина укорачивалась?.. Необходимым элементом электроакустического преобразователя с применением пьезокерамики является биморфная конструкция из двух тонких пьезоэлементов, из которых один при подаче напряжения растягивается, а другой сжимается. Чаще всего между пьезоэлементами клеивается третий элемент – металлическая мембрана. Металл придаёт прочность конструкции. Ещё чаще бывает достаточно использовать один пьезоэлемент, а в качестве второго элемента биморфа служит сама мембрана (см. рис.1). Такие конструкции называют Биморфными пьезоэлементами или пьезоблоками.



(рис. 1)

Их обычные размеры 10 – 60 мм в диаметре и 0,2 – 1,5 мм по толщине. При этом диаметр пьезоэлемента обычно в 1,5 – 2 раза меньше диаметра мембраны. При подаче на пьезоэлемент напряжения его диаметр, в зависимости от полярности, либо увеличивается, либо уменьшается. Порядок изменения диаметра составляет 0,05 мкм на каждые 10В напряжения. Однако, вследствие изгиба, края мембраны приподнимутся или опустятся на 20мкм. Таким образом, малое расширение пьезоэлемента мы преобразовали в 400 раз большее изгибное смещение на краю мембраны. Вот уже упомянутое число 75000 превратилось В 187! Но двинемся дальше. Теперь нужно использовать явление резонанса. Ведь при резонансе амплитуда возрастает в число раз, равное добротности. Обычное значение добротности пьезоблока равно 50 – 70 единиц, и теперь пресловутые 75000 превращаются в обыкновенную тройку. Казалось бы задача решена, но не тут то было! Несмотря на большую амплитуду пьезоблок не звучит. Он не излучает звук. Маленький пьезоблок совсем не слышно. Пьезоблок большего размера слышно, но слабо. В чём кроется причина?

Обратимся к рис.2, на котором схематично изображены две фазы колебаний круглого биморфного элемента. Точками **a** отмечена окружность нулевой амплитуды – узловая окружность.



(рис. 2)

На краю и в центре элемента Амплитуда максимальна, но колебательное движение происходит в противофазе. Для каждой фазы колебаний образуются три пары областей разрежения-сжатия воздуха. Поскольку размер пьезоблока меньше длины волны звука (для частоты 2 – 3кГц длина волны 110 – 170мм) области разрежения и сжатия не могут гнать волну дальше, а в течение половины периода успевают попарно  $\square$ схлопнуться $\square$  и давление всё время вокруг выравнивается. Пути выравнивания давления показаны двусторонними стрелками. Это явление называют акустическим коротким замыканием. Чтобы наше устройство зазвучало необходимо устранить акустическое короткое замыкание. Эта задача отнюдь не является сложной и придумано немало способов, которые успешно себя зарекомендовали на практике. От того, какой способ применён, зависит конструктивное исполнение и внешние очертания устройства.

Выполнена сборка простого демонстрационного экземпляра устройства получения звука – динамика на основе пьезоэффекта.

### **Заключение.**

За время существования нашей цивилизации много раз происходила смена традиционных источников энергии на новые, более совершенные. И не потому, что старый источник был исчерпан. Сейчас, в начале 21-го века, начинается новый значительный этап земной энергетики. Появилась энергетика  $\square$ щадящая $\square$ , построенная так, чтобы человек не губил планету, на которой он живет, заботился об охране уже сильно поврежденной биосферы. На пути широкого внедрения альтернативных источников энергии стоят трудно разрешимые экономические и социальные проблемы. Прежде всего, это высокая

капиталоемкость, вызванная необходимостью создания новой техники и технологий. Во-вторых, высокая материалоемкость : создание мощных электростанций требует, к примеру, огромных количеств металла, бетона и т.д, В-третьих, под некоторые станции требуется значительное отчуждение земли или морской акватории. Кроме того, развитие использования альтернативных источников энергии сдерживается также нехваткой специалистов. Решение этих проблем требует комплексного подхода на национальном и международном уровне, что позволит ускорить их реализацию.

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.

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 частицами.

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 противударна. 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.

В заключение можно отметить, что применение пьезоэлементов не ограничится маломощными (микромощными) источниками питания и датчиками в приборостроении но и имеют хорошую инновационную перспективу.

### **Выводы**

Учитывая, что пьезоэффект и пьезоэлементы имеют хорошую перспективу дальнейшего применения в науке и технике, необходимо:

1. Создать инфраструктуру для инновационного развития пьезоэлектрической энергии, пьезоэффекта в целом в разных областях техники, приборостроения.
2. Привлечь молодое поколение на развитие перспективы пьезоэффекта в прикладных науках и технологиях.
3. Сохранить приоритет России в области пьезоэнергии и создания новых технологий, в том числе и в целях повышения обороноспособности страны.

### **Приложение.**

#### **1. Актюатор**

Исполнительное устройство, передающее воздействие на объект. В технике под актюатором обычно понимается преобразователь входного сигнала (электрического, оптического, механического или др.) в выходной сигнал (например, в движение), действующий на объект управления.

Актюаторами являются: электродвигатели, электрические, пневматические или гидравлические приводы, релейные устройства и т. д.

## 9. Библиография

### *Список используемой литературы*

1. Пьезоэлектрическое приборостроение /А.В. Гориш, В.П. Дудкевич, М.Ф. Куприянов и др. - Т.1. Физика сегнетоэлектрической керамики. - М.: Издат. предпр. ред. жур. "Радиотехника", 1999. - 368 с.

2. □ Основы электроники и микроэлектроники □ – Б.С. Гершунский. К.: Вища школа, 1989 г.

### *Другие источники*

1. <http://www.novate.ru/blogs/080814/27262/>

2. <http://www.qwrt.ru/news/2201>

3. <http://antiretona.narod.ru/>

4. [http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_medicine/25722/Пьезоэлектрические](http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_medicine/25722/Пьезоэлектрические)

5. <http://elektrik.info/>

6. [http://libertas.pp.ua/publ/orgtehnika/tehnologii/tehnologii\\_strujnoj\\_pechati\\_printerov\\_epson/10-1-0-4](http://libertas.pp.ua/publ/orgtehnika/tehnologii/tehnologii_strujnoj_pechati_printerov_epson/10-1-0-4)

7. <http://mini-soft.net.ru/>

8. <http://oval.ru/enc/58898.html>

9. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Пьезоэлектрический\\_эффект](http://ru.wikipedia.org/wiki/Пьезоэлектрический_эффект)

10. [http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/01\\_01/stat-48.htm](http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/01_01/stat-48.htm)

11. <http://www.mobiledevice.ru/pezoelement-prototip-Technology-energiia-datchiktemperatura.aspx>

12. [http://www.portalnano.ru/read/tezaurus/definitions/s\\_t\\_microscope](http://www.portalnano.ru/read/tezaurus/definitions/s_t_microscope)

13. <http://www.quartz1.com/assortiment/detail.php?ID=30764>

14. <http://www.quartz1.com/assortiment/list.php?ID=13&section=4442>

15. <http://www.quartz1.com/price/price.php?group=220>

16. <http://www.ref.by/refs/88/19808/1>

17. <http://www.vniir.ru/p/piezo/switchers/>

18. [https://www.youtube.com/watch?v=3qF7L-Pb\\_e8](https://www.youtube.com/watch?v=3qF7L-Pb_e8)

19. [https://www.youtube.com/watch?v=D\\_kPa9CRGs8](https://www.youtube.com/watch?v=D_kPa9CRGs8)

20. <https://www.webkursovik.ru/kartgotrab.asp?id=-169607>

21. <http://elenergi.ru/chto-takoe-pezoelektricheskij-effekt.html> (материал)

22. <http://www.mobipower.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=562> (стельки своими руками)