

Лабораторная работа Э-67

Изучение пьезоэлектрического эффекта

(кафедра «Физика», лаборатория НИРС)

Разработали: Чуев А.С., Задорожный Н.А., Сорокина Л.А

Цели работы – знакомство с пьезоэлектрическим эффектом и его применениями;

- изучение пьезоэлектрических материалов;
- закрепление навыка проведения эксперимента и обработки его результатов.

Теоретическая часть

Пьезоэлектрический эффект

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 пьезоэлектрического 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 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 определенным образом из кристалла кварца, электростатических зарядов под действием механических напряжений. Эти заряды пропорциональны механическому напряжению, меняют знак вместе с ним и исчезают при снятии напряжения.

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

При отсутствии внешних механических напряжений дипольный момент элементарной ячейки равен нулю (рис.1) . Если под действием таких напряжений ячейка растянется или сожмется, то возникает электрический дипольный момент. Он будет равен $P = \pm q \cdot \Delta a$, где q – заряд ионов, Δa – растяжение или сжатие ячейки.

Наличие электрических дипольных моментов внутри пьезоэлектрика обнаруживается по появлению электрических зарядов на противоположных гранях кристалла или электродах пьезоэлемента (рис.1).

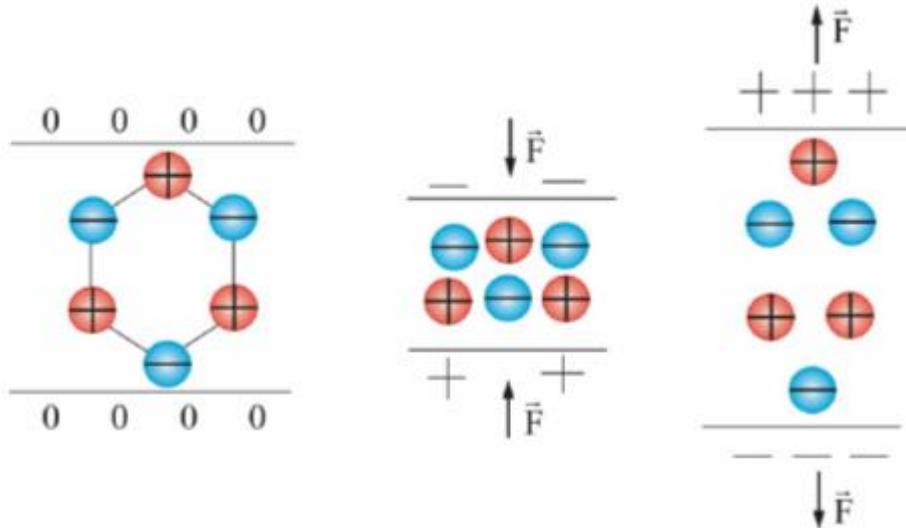


Рис.1. Схема образования пьезоэффекта.

Величина заряда, возникающего при пьезоэлектрическом эффекте, определяется соотношением

$$q = d_{ij}F_x ,$$

где: F_x - величина силы, вызвавшей деформацию;

d_{ij} – пьезомодуль (в общем виде тензор).

Наряду с прямым пьезоэффектом, существует обратный пьезоэлектрический эффект. Он заключается в том, что в пластине, вырезанной определенным образом из пьезоэлектрического кристалла, под действием приложенного к ней электрического поля возникает механическая деформация. Причем величина механической деформации пропорциональна напряжённости электрического поля.

Обратный пьезоэлектрический эффект не следует смешивать с явлением электрострикции, т. е. с деформацией диэлектрика под действием электрического поля. При электрострикции между деформацией и полем существует квадратичная зависимость, а при пьезоэффекте - линейная. Кроме того, электрострикция возникает у диэлектрика любой структуры и происходит даже в жидкостях и газах, в то время, как пьезоэлектрический эффект наблюдается только в твёрдых диэлектриках, главным образом, кристаллических.

Пьезоэлектричество появляется только в тех случаях, когда упругая деформация кристалла сопровождается смещением центров расположения 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 сим-

метрии, никакая однородная деформация не сможет нарушить внутреннее равновесие кристаллической решётки и, следовательно, пьезоэлектрическими являются кристаллы только тех классов, у которых отсутствует центр симметрии. Отсутствие центра симметрии является необходимым, но не достаточным условием существования пьезоэлектрического эффекта, поэтому не все ацентричные кристаллы обладают им.

Пьезоэлектрический эффект не может наблюдаться в твёрдых аморфных и скрытокристаллических диэлектриках (почти изотропных), так как это противоречит их сферической симметрии. Исключение составляют случаи, когда они становятся анизотропными под влиянием внешних сил и тем самым частично приобретают свойства одиночных кристаллов.

Сегнетоэлектрики (названы по первому материалу, в котором был открыт сегнетоэлектрический эффект — сегнетова соль) — твёрдые диэлектрики (некоторые ионные кристаллы и пьезоэлектрики), обладающие в определённом интервале температур собственным электрическим дипольным моментом, который может быть переориентирован за счёт приложения внешнего электрического поля. Сегнетоэлектрические материалы обладают гистерезисом электрического дипольного момента в отношении приложенного к ним электрического поля. Кроме того, сегнетоэлектрики обладают в определенном интервале температур спонтанной (самопроизвольной) поляризованностью, т. е. поляризованностью и при отсутствии внешнего электрического поля.

При отсутствии внешнего электрического поля сегнетоэлектрик представляет собой как бы мозаику из *доменов* — областей с различными направлениями их поляризованности. В смежных доменах эти направления различны и в целом дипольный момент диэлектрика равен нулю. При внесении сегнетоэлектрика во внешнее электрическое поле происходит переориентация дипольных моментов доменов по полю, а возникшее при этом суммарное электрическое поле доменов будет поддерживать их некоторую ориентацию и после прекращения действия внешнего поля. Поэтому сегнетоэлектрики имеют очень большие значения диэлектрической проницаемости (например, для сегнетовой соли $\epsilon_{\max} \approx 10^4$).

Сегнетоэлектрические свойства веществ сильно зависят от температуры. Для каждого сегнетоэлектрика есть определенная температура, выше которой его необычные свойства исчезают и он превращается в обычный диэлектрик. Эта температура называется точкой Кюри (в честь французского физика Пьера Кюри (1859—1906)). Обычно сегнетоэлектрики обладают только одной точкой Кюри; исключение составляют лишь сегнетова соль (—18 и +24°C) и изоморфные с нею соединения. В сегнетоэлектриках вблизи точки Кюри наблюдается также резкое изменение теплоемкости вещества.

До сих пор пьезоэлектрический эффект не находит удовлетворительного количественного описания в рамках современной атомной теории кристаллической решетки. Даже для структур простейшего типа нельзя хотя бы приближенно вычислить порядок пьезоэлектрических постоянных.

В настоящее время разработана феноменологическая теория пьезоэффекта, связывающая деформации и механические напряжения с электрическим полем и поляризацией в кристаллах. Установлена система параметров, определяющих эффективность кристалла как пьезоэлектрика. Основные параметры пьезоэлектриков следующие:

Пьезоэлектрический модуль (пьезомодуль) d_{ij} - определяет поляризацию кристалла (или плотность заряда) при заданном приложении механического нагружения;

пьезоэлектрическая константа - определяет механическое напряжение, возникающие в кристалле под действием электрического поля;

пьезоэлектрическая постоянная g - характеризует электрическое напряжение в разомкнутой цепи при заданном механическом напряжении;

пьезоэлектрическая постоянная h - определяет электрическое напряжение в разомкнутой цепи при заданной механической деформации.

Эти постоянные являются родственными величинами и связаны друг с другом соотношениями, включающими в себя упругие константы и диэлектрическую проницаемость кристаллов, поэтому можно использовать любой из них. На практике наиболее часто используется пьезомодуль. Пьезоэлектрические постоянные являются тензорами, поэтому каждый кристалл может иметь несколько пьезомодулей, характеризующих направление приложенной деформации и величину возникающего при этом электрического заряда.

Каждый пьезоэлектрик является электромеханическим преобразователем энергии, поэтому важной его характеристикой является коэффициент электромеханической связи r . Квадрат этого коэффициента представляет собой отношение энергии, проявляющейся в механической форме для данного типа деформации, к полной электрической энергии, полученной на входе от источника питания.

Во многих случаях практического применения пьезоэлектриков существенными являются их упругие свойства, которые описываются модулями упругости - C (модулями Юнга - $E_{Ю}$) или обратными величинами - упругими постоянными - S .

При использовании пьезоэлектрических элементов в качестве резонаторов в некоторых случаях вводят частотный коэффициент, представляющий собой произведение резонансной частоты пьезоэлемента и геометрического размера, определяющего тип колебания. Эта величина пропорциональна скорости звука в направлении распространения упругих волн в пьезоэлементе.

В настоящее время известно много веществ (более 500), обнаруживающих пьезоэлектрическую активность. Однако только немногие из них находят практическое применение.

Пьезоэлектрики - монокристаллы

Кварц. Это широко распространённый в природе минерал, который при температуре ниже 573 градусов по Цельсию кристаллизуется в тригонально-трапецеэдрическом классе гексагональной сингонии. Он принадлежит к энантиоморфному классу и встречается в природе в двух модификациях: правой и левой.

По химическому составу кварц представляет собой безводный диоксид кремния (SiO_2) молекулярная масса 60,06 г/моль. Кварц относится к числу наиболее твёрдых минералов, он обладает также 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 кристаллов кварца от бесцветно-прозрачного (горный хрусталь) до чёрного (морион).

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).

Турмалин. Турмалин кристаллизуется в тригонально-пирамидальном классе тригональной сингонии. Кристаллы призматические с продольной штриховкой, удлиненные, 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.

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.

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.

Поликристаллические пьезоэлектрики.

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.

Освоена технология промышленного 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.

Пьезокерамические датчики

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

В условиях активного внедрения компьютерной техники эти 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, мода $ij = 33$) и гибкие (сила действует перпендикулярно оси поляризации (мода $ij = 31$)).

В осевых датчиках используют пьезоэлементы различных форм: диски, кольца, цилиндры и пластины. В качестве примеров использования таких датчиков можно привести датчики ускорения (акселерометры), датчики давления, датчики детонации, датчики разрушения и т. п.

Поликристаллические пьезоэлектрики с пластмассовыми наполнителями

В пьезоэлектрических датчиках, испытывающих одноразовое высокоскоростное нагружение, (например, датчики цели взрывателей артиллерийских снарядов) применяют пьезопластмассовые материалы. Эти материалы представляют собой смесь пьезокерамики и пластмассового наполнителя типа полиэтилена. Пьезодатчики из пьезопластмассы характеризуются несколько меньшей энергоотдачей, но зато их конструкции более технологичны в массовом производстве.

Лабораторная установка

Лабораторная установка состоит из устройства нагружения пьезоэлементов, статического вольтметра, подставки для размещения пьезоэлементов и электрических проводов, служащих для электрического подключения пьезоэлемента к статическому вольтметру и для обнуления заряда на пьезоэлементе перед снятием с него механической нагрузки. Установка изображена на фото рис.2.



Рис.2. Лабораторная установка

Экспериментальная часть

Задание 1. Определение пьезомодуля различных типов пьезоэлементов.

1. Подготовить лабораторную установку для проведения эксперимента и провести измерения, для этого:

- а) установить нужный пьезоэлемент в специальную подставку для него;
- б) подключить статический вольтметр к электродам пьезоэлемента, используя подводящие контакты и электрические провода-соединители;
- в) включить статический вольтметр в сеть питания 220 В;
- г) нагрузить пьезоэлемент, используя набор грузов заранее определенной массы;
- д) произвести на короткое время электрическую закоротку пьезоэлемента и произвести снятие механической нагрузки с пьезоэлемента (поднять груз);
- е) зафиксировать показания статического вольтметра.

Опыт повторить пятикратно на каждом грузе и для каждого типа пьезоэлемента.

По результатам измерений определить средние значения напряжений, снимаемых с пьезоэлемента и определить к какому виду они относятся (Представлено два вида пьезокерамических пьезоэлемента: из титаната бария - BaTiO_3 и из цирконата - титаната свинца (ЦТС-19) – твердый раствор $\text{Pb}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$, по два типоразмера каждого вида).

Заполнить таблицу основных параметров используемых пьезоэлементов.

Материал	Плотность, кг/м^3	Пьезомодуль d_{33} , 10^{12} , Кл/Н	Относительная диэлектрическая проницаемость, ϵ	Диапазон рабочих температур, $^{\circ}\text{C}$	Температура Кюри, К	$\sigma_{\text{сж}}$, 10^{-6} , Н/м
BaTiO_3						
ЦТС-19						

Задание 2. Установить экспериментальную зависимость между осевым механическим напряжением, создаваемом на пьезоэлементе из ЦТС-19, и величиной электрического заряда (напряжения), вырабатываемого пьезоэлементом. Опыты провести на двух типоразмерах пьезоэлемента.

Замеры производить аналогично заданию 1, изменяя массу груза в максимально возможных для лабораторной установки пределах и с минимально возможными интервалами. Произвести статистическую обработку данных, построить экспериментальные графики зависимости получаемого заряда от силы нагружения и определить значение пьезомодуля испытываемых образцов.

Задание 3. Посмотреть видеоролик: <http://tube.sfu-kras.ru/video/232>

Контрольные вопросы

1. Знать единицы измерения и уметь определять размерности (в системе СИ) физических величин по данной теме (давление, сила, электрический заряд, напряжение, пьезомодуль и др.). Знать закономерные взаимосвязи указанных физических величин.
2. Охарактеризуйте прямой и обратный пьезоэффекты. Когда и кем они были открыты? Физическое объяснение указанных эффектов, используемые параметры.
3. Материалы и вещества, обладающие пьезоэффектом. В чем состоит отличие пьезоэлектриков и сегнетоэлектриков?
4. Что такое пьезомодуль и его разновидности?
5. В каких областях науки и техники применяют пьезоэлементы?
6. В чем состоят преимущества керамических пьезоэлементов и пьезопластмасс?

7. Явление спонтанной поляризации. Точка Кюри.
8. Как производится тарировка пьезодатчиков. Требования к аппаратуре.
9. Почему замер пьезомодуля производят не при нагружении пьезоэлемента, а при снятии с него механической нагрузки?
10. Что такое коэффициент линейной регрессии и коэффициент корреляции? Их физический смысл.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Статистическая обработка экспериментальных данных

Как правило, эксперимент проводится для того, чтобы подтвердить или отвергнуть какую-либо теоретическую зависимость между опытными величинами. Если характер функциональной зависимости подтверждается опытом, возникает необходимость подобрать такие коэффициенты в уравнении этой связи, которые в наилучшей степени соответствуют опытными данным. Эти задачи решаются стандартными методами корреляционного и регрессионного анализа*. Здесь же кратко рассмотрим процедуру обработки данных и приведем основные термины и формулы.

Пусть между двумя опытными величинами x и y теоретически ожидается линейная зависимость вида:

$$y = A_0 + A_1x,$$

называемая уравнением линейной регрессии. Коэффициенты A_0 и A_1 называют коэффициентами регрессии. Для проверки линейной связи между x и y по опытными данным вычисляют коэффициент корреляции

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

и связанный с ним параметр

$$T = |r| \sqrt{(n-2)/(1-r^2)}.$$

Здесь n - число экспериментальных точек, x_i и y_i - результаты i -го измерения (координаты i -й экспериментальной точки на графике), \bar{x} и \bar{y} - средние значения координат, определяемые формулами

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$$

Значения r лежат в пределах $-1 < r < 1$. Большим значениям $|r|$ соответствует более строгая линейность, при $|r| = 1$ зависимость абсолютно линейна, при $r = 0$ линейная связь отсутствует. При $r > 0$ y увеличивается с ростом x , при $r < 0$ - уменьшается.

С помощью параметра T определяют вероятность соблюдения линейной зависимости. Если $T > t_{p,\nu}$ - коэффициента Стьюдента для доверительной вероятности P и числа степеней свободы $\nu = n - 2$, то зависимость имеет место с вероятностью большей или равной P .

Число экспериментальных точек n должно быть не меньше 3, иначе вопрос о линейности теряет смысл. Регрессионная зависимость признается существующей, если $P \approx 1$ (обычно, если $P > 0,9 \dots 0,999$).

Для проведения наилучшей прямой через экспериментальные точки вычисляют коэффициенты регрессии

$$A_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad A_0 = \bar{y} - A_1 \bar{x}.$$

Эта прямая соответствует уравнению линейной регрессии. Она проходит через точку с координатами \bar{x} , \bar{y} и характеризуется тем, что сумма квадратов отклонений экспериментальных точек от этой прямой минимальна.

Все расчеты могут проводиться в лаборатории по стандартной программе ЭВМ. В ЭВМ вводят количество экспериментальных точек n и их координаты x_i и y_i .

* Еркович С.П. Применение регрессионного и корреляционного анализа для исследования зависимостей в физическом практикуме. – М.: Изд-во МГТУ, 1994. - 13 с.