

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ

Пак П., Иванушкина А.

Научный руководитель Четвергов Н. А.

ВВЕДЕНИЕ

В зависимости от характера действия на тела электрического поля их можно разделить на проводники, диэлектрики и полупроводники. Свойства тел и поведение их в электрическом поле определяются строением и расположением атомов в телах. В состав атомов входят электрически заряженные частицы: положительные – протоны, отрицательные – электроны. В нормальном состоянии атом электрически нейтрален, так как число протонов, входящих в состав ядра атома, равно числу электронов, вращающихся вокруг ядра и образующих «электронные оболочки» атома. Электроны внешней валентной оболочки определяют электропроводность вещества.

Проводники - вещества, хорошо проводящие электрический ток благодаря наличию в них большого количества подвижных заряженных частиц. Делятся на электронные (металлы, полупроводники), ионные (электролиты) и смешанные, где имеет место движение, как электронов, так и ионов (напр., плазма).

Основная особенность проводников – наличие свободных зарядов – это часть электронов сравнительно слабо связанных с ядром, которые могут перемещаться с орбиты одного ядра на орбиту другого под воздействием внешнего электрического поля.

Типичные проводники – металлы (медь, алюминий и т.д.)

Полупроводники — материалы, которые по своей удельной проводимости занимают промежуточное место между проводниками и диэлектриками и отличаются от проводников сильной зависимостью удельной проводимости от концентрации примесей, температуры и различных видов излучения. Основным свойством этих материалов является увеличение электрической проводимости с ростом температуры.

К полупроводникам относятся элементы IV группы периодической системы элементы Д.М. Менделеева, которые на внешней оболочке имеют четыре валентных электрона.

Типичные полупроводники – германий Ge и кремний Si.

Диэлектрик (изолятор) — вещество, плохо проводящее или совсем не проводящее электрический ток. Концентрация свободных носителей заряда в диэлектрике не превышает 10^8 см^{-3} . Основное свойство диэлектрика состоит в способности поляризоваться во внешнем электрическом поле.

ДИЭЛЕКТРИКИ. КЛАССИФИКАЦИЯ.

Диэлектрические материалы классифицируются:

- по агрегатному состоянию:

- Газообразные
- Жидкие
- Твердые

- по химическому составу:

- Органические

К разряду органических изолирующих материалов относятся вещества животного (шелк, воск) и растительного (бумага, резина, канифоль, лаки, смолы и масла) происхождения, а также искусственные синтетические продукты, относящиеся к классу органических соединений (бакелиты, полистирол, полихлорвинил, целлулоид и др.).

- Неорганические

К этому классу относятся минеральные вещества и разнообразные сорта керамики (кварц, стекло, стеклоэмали, фарфор электротехнический и радиофарфор, большое количество специальных сортов керамики)

- по способу получения:

- Синтетические
- Естественные

- по строению молекул:

- Неполярные (нейтральные)

Состоят из неполярных молекул, не обладающих электрическим моментом их электрический момент $p = q \cdot l = 0$. Центры тяжести положительного и отрицательного зарядов совпадают.

К неполярным диэлектрикам относятся углеводороды, нефтяные электроизоляционные масла, полиэтилен, полистирол и др.

- Полярные (дипольные)

Состоят из полярных молекул, обладающих электрическим моментом. В таких молекулах из-за их асимметричного строения центры масс положительных и отрицательных зарядов не совпадают.

К полярным диэлектрикам относятся феноло-формальдегидные и эпоксидные смолы, кремнийорганические соединения, хлорированные углеводороды и др.

- по области применения

- Электроизоляционные

Используются для создания электрической изоляции, которая окружает токоведущие части электрических устройств и отделяет друг от друга части, находящиеся под различными электрическими потенциалами.

- диэлектрики в электрических конденсаторах

Используются для создания определенного значения электрической емкости конденсатора, а в некоторых случаях для обеспечения определенного вида зависимости этой емкости от температуры и других факторов.

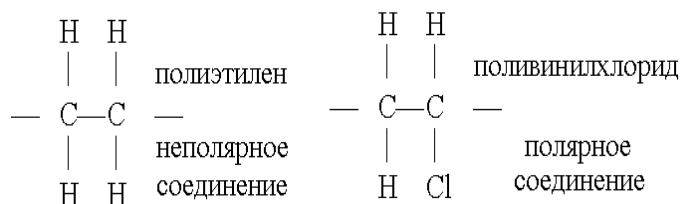
- По возможности управления электрическими свойствами

- пассивные

Обладают постоянными свойствами

- активные

Обладают свойствами, которыми можно управлять



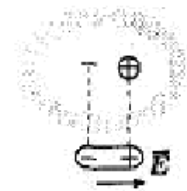
ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В диэлектрике, помещенном в электрическое поле, заряды не разделяются, следовательно, в нем нет свободных зарядов. Притяжение незаряженного тела из диэлектрика к заряженному телу объясняется тем, что в электрическом поле происходит **поляризация диэлектрика** - смещение в противоположные стороны разноименных связанных зарядов, входящих в состав атомов и молекул вещества.

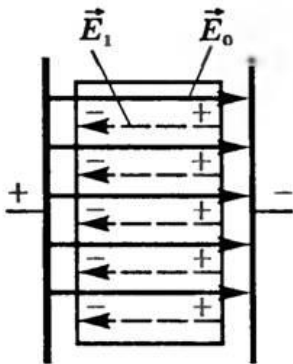
При отсутствии электрического поля электронное облако расположено симметрично относительно атомного ядра.



В электрическом поле с напряженностью \vec{E}_0 оно изменяет свою форму, и центр отрицательно заряженного электронного облака уже не совпадает с центром положительного атомного ядра.



Рассмотрим диэлектрик, помещенный во внешнее однородное поле E_0 . Опыт показывает, что на противоположных поверхностях диэлектрика появляются заряды разных знаков:



Связанные заряды создают электрическое поле E_1 , которое внутри диэлектрика направлено противоположно вектору напряженности E_0 внешнего поля. Этот процесс называется **поляризацией диэлектрика**. При этом $E_1 < E_0$, поэтому внешнее поле ослабляется лишь частично (а не гасится полностью, как внутри проводника)

Результирующее поле внутри диэлектрика равно:

$$E = E_0 - E_1$$

Результирующее поле E направлено в ту же сторону, что и внешнее поле E_0

Что и записывают в виде:

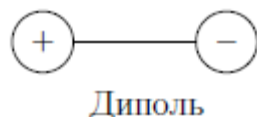
$$\epsilon = \frac{E_0}{E}$$

Физическая величина, равная отношению модуля напряженности E_0 внешнего электрического поля в вакууме к модулю напряженности E результирующего поля в однородном диэлектрике, называется **диэлектрической проницаемостью вещества**.

ТИПЫ ПОЛЯРИЗАЦИИ

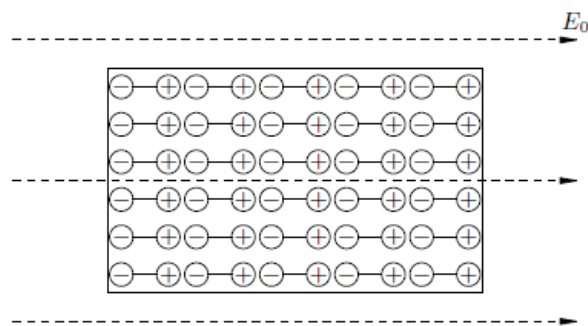
1. Полярные диэлектрики: ориентационная поляризация

Молекулы полярных диэлектриков с точки зрения электрических свойств являются диполями. Диполь – это система двух одинаковых по модулю и противоположных по знаку зарядов, находящихся на некотором расстоянии друг от друга:



При отсутствии внешнего электрического поля молекулы – диполи полярного диэлектрика, совершают хаотическое тепловое движение, ориентированы в самых различных направлениях. Электрическое поле этих диполей полностью компенсируют друг друга, и результирующее поле равно нулю во всех областях диэлектрика.

Но если поместить такой диэлектрик во внешнее поле E_0 , то оно «развернет» диполи так, что они окажутся ориентированными вдоль линий напряженности («минусы» диполей повернутся влево – к тем «плюсам», которые создают внешнее поле) :



Ориентационная поляризация

В реальности не будет столь идеально правильного порядка расположения диполей – ведь они по-прежнему совершают хаотическое тепловое движение. Но теперь у диполей появится преимущественная ориентация – вдоль линий напряженности внешнего поля E_0 .

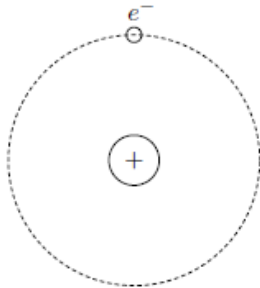
Внутри диэлектрика заряды диполей по-прежнему компенсируют друг друга.

Итак, механизм ориентационной поляризации ясен: поворот молекул-диполей и их ориентация вдоль линий напряженности внешнего поля.

2. неполярные диэлектрики: электронная поляризация

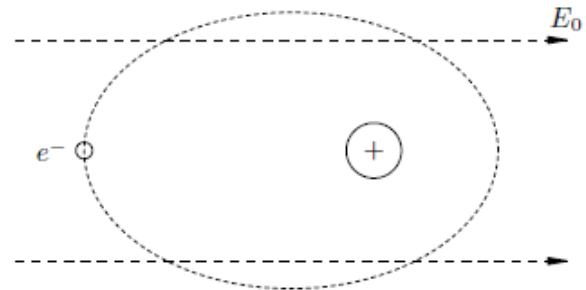
Диэлектрик называется неполярным, если его молекулы имеют симметричное распределение положительных и отрицательных зарядов и потому не ведет себя как диполи. К неполярным диэлектрикам относятся, например, керосин, масло, воздух, инертные газы.

Тем не менее, поляризация наблюдается и у неполярных диэлектриков.



На данном рисунке изображена симметричная электронная орбита в атоме неполярного диэлектрика.

При наложении внешнего поля E_0 эта орбита деформируется: электрон смещается в сторону положительных зарядов, создающих внешнее поле.



Во внешнем поле электрон будет проводить больше времени слева от ядра, нежели чем справа. Из-за этого центры положительных и отрицательных зарядов в атоме неполярного диэлектрика разойдутся в разные стороны. Соответственно, атомы или молекулы неполярного диэлектрика во внешнем поле начнут вести себя подобно диполям, также как в случае ориентационной поляризации. Объяснение механизма ослабления поля внутри диэлектрика останется тем же самым.

Итак, электронная поляризация вызвана деформацией электронных оболочек атомов во внешнем электронном поле. Разумеется, электронная поляризация присутствует и у полярных диэлектриков; но там она теряется на фоне куда более мощного эффекта разворота самих диполей.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СМЕЩЕНИЕ

Напряженность электростатического поля, как следует из ранее полученной формулы $\mathbf{E}=\mathbf{E}_0/\epsilon$, зависит от свойств среды: в однородной изотропной среде напряженность поля \mathbf{E} обратно пропорциональна ϵ . Вектор напряженности \mathbf{E} , при переходе через границу диэлектриков, испытывает скачкообразное изменение, тем самым делая неудобства при расчетах электростатических полей. Поэтому необходимо помимо вектора напряженности характеризовать поле еще **вектором электрического смещения**, который для электрически изотропной среды, по определению, равен:

$$\mathbf{D} = \epsilon\epsilon_0\mathbf{E}$$

ϵ – диэлектрическая проницаемость

$$\epsilon_0 = 8,854 * 10^{-12} \text{ Ф/м} \text{ (электрическая постоянная)}$$

Либо вектор электрического смещения можно выразить как:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0\mathbf{E} + \mathbf{P} \text{ где } \mathbf{P} \text{ – вектор поляризации}$$

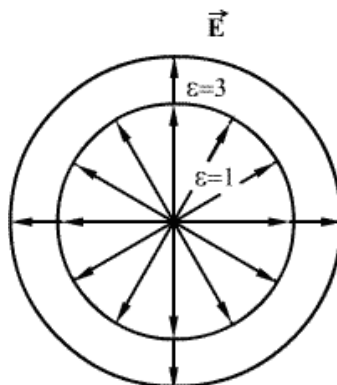
Единица электрического смещения — кулон на метр в квадрате (Кл/м²).

Вектор \mathbf{D} направлен в ту же сторону, что и \mathbf{E} . В отличие от напряженности поля \mathbf{E} вектор \mathbf{D} имеет постоянное значение во всех диэлектриках.

Выясним, с чем можно связать вектор электрического смещения. Связанные заряды образуются в диэлектрике при наличии внешнего электростатического поля, который создается системой свободных электрических зарядов, т. е. в диэлектрике электростатическое поле свободных зарядов суммируется с дополнительным полем связанных зарядов. *Результирующее поле* в диэлектрике характеризуется вектором напряженности \mathbf{E} , и потому он зависит от свойств диэлектрика. Вектором \mathbf{D} характеризуется электростатическое поле, которое создается *свободными зарядами*. Связанные заряды, которые возникают в диэлектрике, могут вызвать перераспределение свободных зарядов, которые создают поле. Поэтому вектор \mathbf{D} характеризует электростатическое поле, которое создается свободными зарядами (т. е. в вакууме), но при таком их распределении в пространстве, какое имеется при наличии диэлектрика.

Аналогичным образом, как и поле \mathbf{E} , поле \mathbf{D} следует графически изображать с помощью линий электрического смещения, направление и густота которых задаются также, как и для линий напряженности.

Линии вектора \mathbf{E} могут начинаться и заканчиваться на любых зарядах — свободных и связанных, в то время как линии вектора \mathbf{D} — только на свободных зарядах. Через области поля, где находятся связанные заряды, линии вектора \mathbf{D} проходят не прерываясь.



ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ КОНДЕНСАТОРА

Электрическая емкость проводника или устройства, состоящего из двух проводников, разделенных диэлектриком, характеризует их способность накапливать электрические заряды. Электрическая энергия в конденсаторах накапливается в виде электронов.

В технике широко применяют **конденсаторы** — устройства, которые при сравнительно малых размерах способны накапливать значительные электрические заряды. Они используются в энергетических установках, в устройствах электроники, автоматики и др.

Емкость конденсатора C зависит от вида диэлектрика, помещенного между его обкладками. Оказалось, что при заполнении пространства между обкладками конденсатора его емкость возрастает в ϵ раз. Значение величины ϵ , которую называют *диэлектрической проницаемостью (относительная диэлектрическая проницаемость)* диэлектрика, зависит только от его свойств и показывает, во сколько раз поле в диэлектрике меньше, чем в вакуум

Ёмкость плоского конденсатора, состоящего из двух параллельных металлических пластин площадью S каждая, расположенных на расстоянии d друг от друга, в системе **СИ** выражается формулой:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$$

C — емкость конденсатора
 S — поверхность одной пластины
 d — расстояние между пластинами
 ϵ — диэлектрическая проницаемость

Емкость конденсатора связана с зарядом Q на его обкладках и разностью потенциалов U между ними известным соотношениями:

$$C = Q/U \text{ [Ф]}$$

Q — количество электричества
 U — напряжение

Единица измерения емкости - **Фарадах** (принято считать, что электрическая ёмкость в 1 фарад соответствует конденсатору, заряженному электрическим зарядом в 1 кулон при разности потенциалов на его обкладках в 1 вольт)

Номиналы конденсаторов чаще всего обозначаются в трех кратностях — **микро, пико и нанофарадах**:

10^{-6} Ф — микрофарад — мкФ — μF
 10^{-9} Ф — нанофарад — нФ — nF
 10^{-12} Ф — пикофарад — пФ — pF

Напряженность поля E между двумя пластинами (обкладками) конденсатора вычисляется по формуле

$$E = U/a \text{ [В/м]}$$

U — напряжение между обкладками
 a — расстояние между пластинами

АКТИВНЫЕ И ПАССИВНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

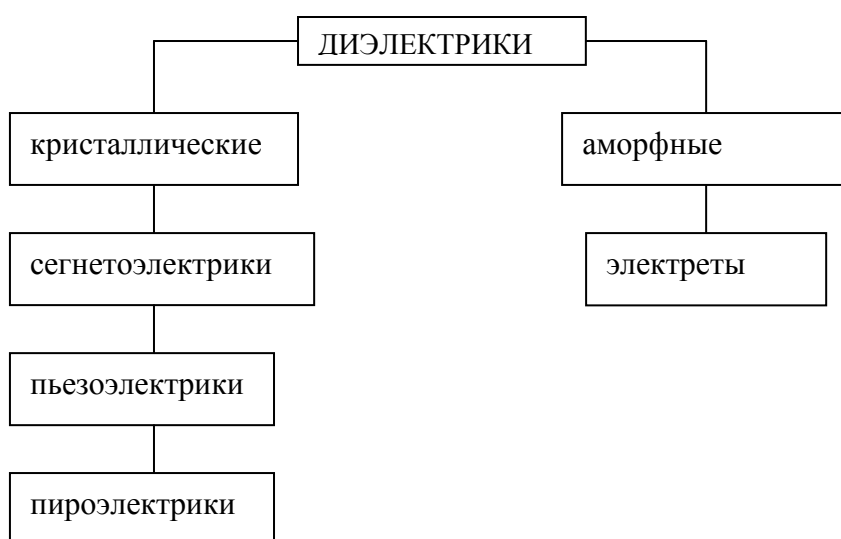
Активные диэлектрики (управляемые) - такие диэлектрики, свойства которых существенно зависят от внешних условий - температуры, давления, напряженности поля и так далее. Они могут служить рабочими телами в разнообразных датчиках, преобразователях, генераторах, модуляторах и других активных элементах. Также эти диэлектрики предназначены для создания функциональных элементов электроники, свойствами которых можно управлять с помощью внешних энергетических воздействий.

Пассивные диэлектрики: электроизоляционные, конструктивные и конденсаторные диэлектрические материалы, органические полимерные диэлектрики, композиционные порошковые пластмассы, слоистые диэлектрики, электроизоляционные лаки и компаунды, неорганические стекла и ситаллы, керамика.

КЛАССИФИКАЦИЯ АКТИВНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

К числу активных диэлектриков относятся:

- Сегнетоэлектрики
- Пьезоэлектрики
- Пироэлектрики
- Электреты
- Материалы квантовой электроники
- Суперионные проводники и д.р.



СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ

а) Общая характеристика

Сегнетоэлектрики - кристаллические диэлектрики, обладающие в определенном интервале температур спонтанной (самопроизвольной) поляризованностью. Поляризованность, в отсутствие внешнего электрического поля, существенно изменяется под влиянием внешних воздействий таких как изменения температуры, электрического поля, деформации.

Из-за своей схожести по свойствам на ферромагнетики их часто называют ферроэлектриками.

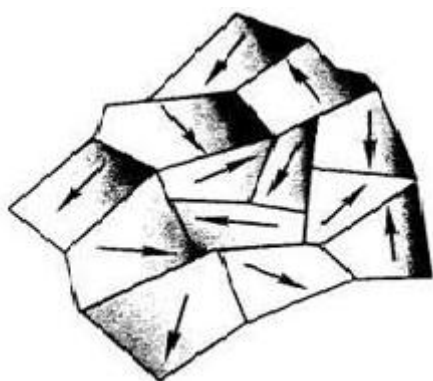
Впервые эти свойства обнаружены И.В. Курчатовым и П.П. Кобеко (1930) при исследовании кристаллов сегнетовой соли $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Она и дала название сегнетоэлектрики этому типу кристаллов.

Сегнетоэлектрики подразделяются на 2 типа:

- ионные кристаллы, к которым относятся титанат бария (BaTiO_3), титанат свинца (PbTiO_3), ниобат калия (KNbO_3), барий-натриевый ниобат ($\text{BaNaNb}_5\text{O}_{15}$) и др.;
- дипольные кристаллы, к которым относятся сегнетова соль ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), триглицинсульфат ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COON}_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$), дигидрофосфат калия (KH_2PO_4) и др.

б) Свойства

При отсутствии внешнего электрического поля сегнетоэлектрик представляет собой как бы мозаику из доменов. **Домены** - области с различными направлениями поляризованности. На рисунке стрелками указаны направления вектора поляризованности.

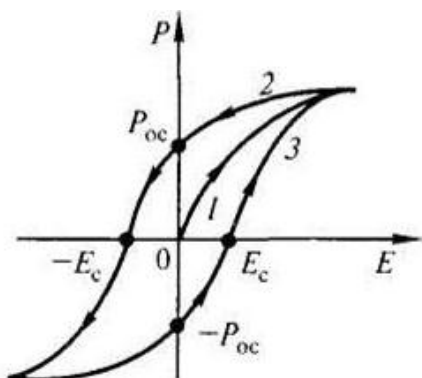


В смежных доменах эти направления различны, и в целом дипольный момент диэлектрика равен нулю.

При внесении сегнетоэлектрика во внешнее поле происходит переориентация дипольных моментов доменов по полю. Возникшее при этом суммарное электрическое поле доменов будет поддерживать их некоторую ориентацию даже после прекращения действия внешнего поля. Поэтому сегнетоэлектрики имеют аномально большие значения диэлектрической проницаемости (для сегнетовой соли $\epsilon \sim 10^4$)

В принципе, у ферромагнетиков также имеются домены, поэтому поведение сегнетоэлектриков в электрическом поле подобно поведению ферромагнетиков в магнитном поле. Единственным различием между сегнетоэлектриками и ферромагнетиками является то, что при помещении их в электрическое поле меняется вектор электрического смещения $\mathbf{D} = \mathbf{E} + \mathbf{P}$, а у ферромагнетиков при помещении в магнитное поле меняется индукция $\mathbf{B} = \mathbf{H} + \mathbf{I}$.

В сегнетоэлектриках наблюдается явление **диэлектрического гистерезиса**, заключающегося в том, что сегнетоэлектрик имеет разные значения поляризованное при одной и той же напряженности электрического поля.



При увеличении напряженности E внешнего электрического поля поляризованность P растет, достигая насыщения (кривая 1). Уменьшение P с уменьшением E происходит по кривой 2, и при $E = 0$ сегнетоэлектрик сохраняет остаточную поляризованность $P_{ос}$, т. е. сегнетоэлектрик остается поляризованным в отсутствие внешнего электрического поля

- Свойства сегнетоэлектриков сильно зависят от температуры.
- Каждый сегнетоэлектрик характеризуется так называемой точкой Кюри.
- **Точка Кюри** - это характерная для каждого типа сегнетоэлектриков температура, выше которой их необычные электрические свойства исчезают. При этом сегнетоэлектрик превращается в обычный полярный диэлектрик.
- При охлаждении материала сегнетоэлектрические свойства восстанавливаются.
- Как правило, сегнетоэлектрики имеют только одну точку Кюри; исключения составляют лишь сегнетова соль (-18 и $+24$ °C) и изоморфные с ней соединения.

в) Применения

Сегнетоэлектрики находят применение:

- изготовление малогабаритных низкочастотных конденсаторов с большой удельной емкостью
- материалов с большой нелинейностью поляризации для диэлектрических усилителей, модуляторов и др. управляемых устройств
- для модуляции и преобразования лазерного излучения
- в акусто- и пьезоэлектрических преобразователях
- изготовление датчиков температуры

ПЬЗОЭЛЕКТРИКИ

а) Общая характеристика

Пьезоэлектрики - это вещества с сильно выраженным пьезоэлектрическим эффектом.

В 1880 году братьями П. и Ж. Кюри был открыт **прямой пьезоэффект** – явление поляризации диэлектрика под действием механического напряжения.

К пьезоэлектрикам относятся:

кварц SiO_2 , тростниковый сахар, винная кислота, хлорат натрия, цинковая обманка, турмалин, сегнетова соль, титанат бария

б) Свойства

Электрический заряд Q , возникающий на поверхности, изменяется по линейному закону в зависимости от механических усилий F

Q – величина заряда

$Q = dF$ — величина приложенной силы
 d — пьезомодуль (коэффициент пропорциональности между зарядом и приложенной силой)
 $Q/S = qs$ — заряд на единицу площади

Наряду с прямым пьезоэффектом, наблюдается и **обратный пьезоэффект** (предсказан Липпманом в 1881 году), когда под действием электрического поля возникает механическая деформация диэлектрика, причем величина механической деформации прямо пропорциональна напряженности электрического поля.

При обратном пьезоэффекте происходит изменение размеров диэлектрика D/l пропорционально напряженности электрического поля E .

$D/l = d = dE$ — d - относительная деформация

Пьезоэлектрический эффект наблюдается только тогда, когда кристаллическая решетка несимметрична. Отсутствие центра симметрии кристаллической решетки является необходимым, но недостаточным условием появления пьезоэлектрического эффекта.

в) Применения

Пьезокерамические материалы принято разделять на четыре функциональные группы:

1. для изготовления высокочувствительных элементов, работающих в режиме приема или излучения механических колебаний.
2. для изготовления генераторов сильных сигналов, работающих в условиях сильных электрических полей или высоких механических напряжений.
3. для изготовления пьезоэлементов, обладающих повышенной стабильностью резонансных частот в зависимости от температуры и времени.
4. для изготовления высокотемпературных пьезоэлементов.

Везде, где нужно преобразовать механические свойства в электрические:

- иглы для грампластинок
- телефоны и микрофоны
- датчики
- манометры,
- кварцевые излучатели ультразвуковых волн.

ПИРОЭЛЕКТРИКИ

а) Общая характеристика

Пироэлектрики - диэлектрики, которые обладают сильно выраженным пироэлектрическим эффектом.

К пироэлектрикам относятся:

- сегнетоэлектрические кристаллы (**ниобат бария стронция, триглицинсульфат - ТГС, ниобат и танталат лития**)
- **турмалин, сульфит лития** (типичные линейные пироэлектрики) и **полимеры (поливинилденфторид, поливинилденхлорид)**

б) Свойства

Пироэлектрическим эффектом называют изменение спонтанной поляризованности диэлектрика при изменении его температуры и как следствие, возникновение электрических зарядов на поверхности пироэлектриков при их нагревании или охлаждении.

Уравнение пироэлектрического эффекта имеет вид:

$$\Delta R_{сп} = r \times \Delta T$$

$\Delta R_{сп}$ - спонтанная поляризованность диэлектрика

r - пироэлектрический коэффициент

ΔT - изменения температуры

Пироэлектрический коэффициент учитывает нарушение упорядоченности в расположении элементарных дипольных моментов (истинный пироэффект) и пьезоэлектрическую поляризацию, обусловленную изменением линейных размеров (вторичный пироэффект) при изменении температуры диэлектрика.

Существуют вещества, у которых при изменении температуры возникают связанные заряды. В этих веществах не совпадают центры положительных и отрицательных зарядов, т. е. они обладают **собственной (спонтанной) поляризацией**. Образуются связанные заряды, которые компенсируются зарядами извне. Если изменить температуру, то изменится поляризация, и изменятся величины зарядов.

в) Применения

Пироэлектрики применяются:

- для создания приемников лучистой энергии, предназначенных для регистрации инфракрасного и СВЧ-излучения
- в качестве сенсорных устройств различного назначения, детекторов
- в качестве датчиков, регистрирующих изменение температуры с высокой точностью
- для изготовления чувствительных приемников инфракрасного излучения,
- датчиков ударных волн, измерителей напряжения.
- для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую.

ЭЛЕКТРЕТЫ

Электреты - это твердые диэлектрики длительно сохраняющие поляризацию и создающие в окружающем их пространстве электрическое поле.

По способу формирования зарядов электреты подразделяют на:

- термоэлектреты (получают при воздействии на нагретый диэлектрик электрического поля),
- фотоэлектреты (изготавливаются из материалов обладающих фотоэлектропроводностью - серы, сульфида кадмия и др.- при одновременном воздействии света электрического поля)
- радиоэлектреты (получают облучая радиоактивным излучением)
- электроэлектреты (получают поляризацией в очень сильном поле без нагревания)
- магнитоэлектреты (получают поляризацией в магнитном поле)
- криоэлектреты (получают при застывании органических растворов в электрическом поле)
- механоэлектреты (получают с помощью механической деформацией полимеров)

- трибоэлектреты (получают трением)
- Короноэлектреты (получают под действием поля коронного разряда)

Применение электретов:

- Как источники постоянного электрического поля (электретные микрофоны и телефоны, вибродатчики, генераторы слабых переменных сигналов, электрометры).
- Как чувствительные датчики в устройствах дозиметрии, барометров, гигрометров.
- Фотоэлектреты применяют в электрофотографии.

Используемая литература:

Специальный практикум по физике твердого тела (Б.П.Сорокин, Н.А.Четвергов, П.П. Турчин)

http://www.tsput.ru/res/fizika/electrostat/lection_14.html

<http://www.bestreferat.ru/referat-105479.html>

http://2balla.ru/index.php?option=com_ewriting&Itemid=69&func=chapterinfo&chapter=49778&story=33859