

Кафедра физики

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3э.1

ИЗУЧЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГИСТЕРЕЗИСА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ

МЕТОДИЧЕСКОЕ УКАЗАНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3э.1

ИЗУЧЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГИСТЕРЕЗИСА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы

1. Ознакомиться с основными характеристиками диэлектриков (вектор поляризации $\vec{P}$, диэлектрическая восприимчивость χ , диэлектрическая проницаемость ϵ).
2. Изучить нелинейные свойства сегнетоэлектриков.
3. Ознакомиться с методом получения петли диэлектрического гистерезиса.

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАБОТЫ

Диэлектрики – вещества, не способные проводить электрический ток. Концентрация свободных носителей заряда в диэлектрике крайне малая величина и обычно не превышает 10^{14} м^{-3} , в то время как в металлах она достигает величины 10^{28} м^{-3} . Диэлектрики бывают твердые, жидкие и газообразные. Твердые диэлектрики – это прежде всего аморфные вещества, т.е. вещества, не имеющие кристаллической структуры. К ним относятся многие пластмассы, стекло, воск и др. Аморфные вещества изотропны (обладают свойствами, одинаковыми по всем направлениям). Кристаллические диэлектрики отличаются от аморфных наличием анизотропии, что определяется периодическим строением их кристаллической решетки и приводит к тому, что различные физические свойства, например, электрические, оптические, тепловые и др. в таких веществах сильно зависят от направления в кристалле.

Диэлектрики применяют в приборостроении, электротехнике, радиотехнике, опто-, микроэлектронной и лазерной технике. В зависимости от назначения различают электроизоляционные (пассивные) и управляемые (активные) диэлектрики. В качестве электроизоляционных материалов используют природные диэлектрики: вакуумное пространство, чистую воду, воздух, нефтяные масла, лаки, а также искусственные: полимеры, стекла, ситаллы, сапфир, керамику. В качестве управляемых диэлектриков используют сегнетоэлектрики (титанат бария, ниобат лития, сегнетокерамика). В микроэлектронных устройствах на полупроводниках, в частности больших и сверхбольших интегральных схемах на кремнии и арсениде галлия, используются в качестве как пассивных, так и активных элементов тонкие (0,002 – 2,0 мкм) аморфные диэлектрические пленки SiO_2 , Si_3N_4 , бор- и фосфорсиликатных стекол. Перспективными являются диэлектрические пленки оксида алюминия, нитридов бора и галлия.

Для изотропных диэлектриков и небольших величин напряженности внешнего электрического поля вектор поляризации $\vec{P}$ удовлетворяет следующему соотношению:

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E} = (\epsilon - 1) \epsilon_0 \vec{E}. \quad (1)$$

где χ – диэлектрическая восприимчивость, не зависящая от $\vec{E}$, ϵ_0 – электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$.

Способность диэлектриков поляризоваться – одно из их фундаментальных свойств. Физические механизмы поляризации могут быть разными.

1. Электронная поляризация наблюдается у диэлектриков, состоящих из неполярных молекул. Она обусловлена тем, что под влиянием внешнего электрического поля $\vec{E}$ положительный заряд каждой молекулы смещается в направлении поля, а электронная оболочка вытягивается в противоположную сторону. В результате этого диэлектрик приобретает электрический дипольный момент, т.е. поляризуется.

2. Ориентационная поляризация наблюдается у диэлектриков, состоящих из полярных молекул. Она обусловлена тем, что под влиянием внешнего электрического поля диполи диэлектрика стремятся повернуться так, чтобы векторы их электрических дипольных моментов ориентировались по направлению вектора напряженности внешнего поля.

3. Ионная поляризация наблюдается у кристаллических диэлектриков. Под влиянием внешнего электрического поля все положительные ионы смещаются в направлении поля $\vec{E}$, а отрицательные – в противоположном направлении. Появляется отличный от нуля суммарный электрический момент.

В некоторых ионных кристаллах поляризация может возникать и существовать самопроизвольно (спонтанно) в отсутствие внешнего электрического поля.

Известны два типа нелинейных диэлектриков, обладающих спонтанной поляризацией: пьезоэлектрики и сегнетоэлектрики. В пьезоэлектриках (рис. 1) электрические диполи всех элементарных ячеек кристалла ориентированы в одном направлении. Совокупности спонтанно поляризованных ячеек образуют области, называемые доменами. В сегнетоэлектриках в пределах каждого домена все диполи элементарных ячеек ориентированы одинаково, в то время как сами домены могут быть ориентированы по-разному (рис. 3.2). Размеры доменов различны как для разных сегнетоэлектриков, так и для одного и того же кристалла. Они могут быть как очень малыми ($\sim 10^{-6}$ см), так и достигать в длину нескольких сантиметров.

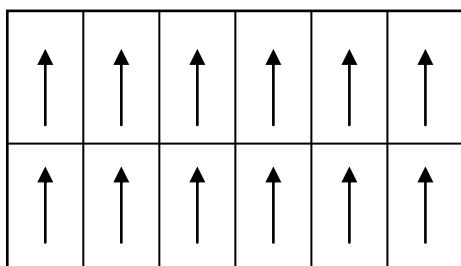


Рис.1

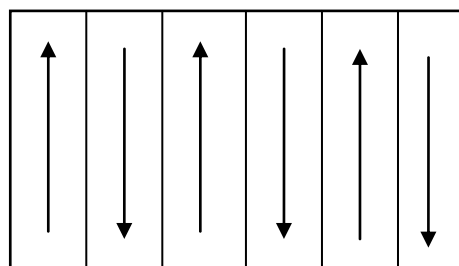


Рис.2

В классической физике образование доменов объясняется меньшей энергией взаимодействующих диполей при таком расположении. В квантовой физике – обобществлением электронов в результате действия обменных сил.

Следует подчеркнуть, что во всех указанных случаях поляризация приводит к возникновению **макроскопического** электрического момента, а диэлектрик оказывается поляризованным в целом.

В качестве величины, характеризующей степень поляризации, используется вектор поляризации $\vec{P}$ (называемый в учебниках поляризованностью), представляющий собой электрический дипольный момент единицы объема вещества

$$\vec{P} = \frac{\sum_{i=1}^N \vec{p}_i}{\Delta V}, \quad (2)$$

где $\vec{p}$ – дипольный момент молекулы; ΔV – физически бесконечно малый объем; N – количество молекул в этом объеме.

Среди различных кристаллических модификаций одного и того же вещества могут быть как полярные, так и неполярные. Если переход между такими двумя модификациями совершается путем фазового перехода, то вблизи точки перехода вещество обнаруживает ряд своеобразных свойств, отличающих его от обычного полярного кристалла – пьезоэлектрика.

Сегнетоэлектрики (или ферроэлектрики – ferroelectrics, по аналогии с ферромагнетиками) – диэлектрики, которые обладают в определенном интервале температур спонтанной (самопроизвольной) поляризованностью, т. е. поляризованностью в условиях отсутствия внешнего электрического поля. В качестве величины, характеризующей степень поляризации, обычно используется вектор $\vec{P}_{\text{сп}}$, называемый в научной литературе вектором **спонтанной поляризации** $\vec{P}_s$.

В обычном пьезоэлектрическом кристалле изменение направления спонтанной поляризации связано с существенной перестройкой кристаллической решетки. Даже если окончательный результат такой перестройки и был бы энергетически выгодным, его осуществление все равно может оказаться невозможным, так как это требовало бы преодоления очень высоких «энергетических барьеров».

В сегнетоэлектрическом же кристалле положение существенно меняется благодаря тому, что вблизи точки фазового перехода второго рода расположение атомов в кристаллической решетке полярной фазы лишь мало отличается от их расположения в решетке неполярной фазы (в силу чего мала и спонтанная поляризация). По этой причине изменение направления спонтанной поляризации требует здесь лишь небольшой перестройки решетки и может сравнительно легко произойти.

Конкретный характер сегнетоэлектрических свойств тела существенно зависит от его кристаллографической симметрии. Направление спонтанной поляризации полярной фазы (мы будем говорить о нем как о сегнетоэлектрической оси) предопределяется уже структурой параэлектрической фазы по другую сторону точки перехода. В некоторых случаях это предопределение однозначно в том смысле, что сегнетоэлектрическая ось возникает лишь в одном вполне определенном кристаллографическом направлении. В лабораторных работах № 3э.1 и № 3э.2 используются образцы кристалла триглицинсульфата.

Триглицинсульфат – хорошо изученный представитель семьи сегнетоэлектрических кристаллов. Он привлекает к себе внимание многих исследователей, так как его сегнетоэлектрические свойства проявляются при комнатной температуре. Кроме того, легко вырастить кристаллы триглицинсульфата больших размеров и он легко растворим в воде.

С химической и кристаллографической точек зрения триглицинсульфат, несомненно, не является простейшим из известных сегнетоэлектриков, однако его феноменологическое поведение оказывается очень простым. Фактически он представляет один из наиболее типичных примеров сегнетоэлектрика. Сегнетоэлектрическая активность кристаллов триглицинсульфата $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \text{H}_2\text{SO}_4$ (сокращенно ТГС) была открыта Маттиасом и др. в 1956 г. Температура Кюри (T_K) равна 49°C .

Выше температуры Кюри кристалл триглицинсульфата имеет моноклинную симметрию и принадлежит к центросимметричному классу $2/m$. Ниже T_K зеркальная плоскость исчезает и кристалл принадлежит к полярной точечной группе 2 моноклинной системы.

Полярная ось лежит вдоль моноклинной (2-го порядка) оси b . Параметры решетки при комнатной температуре равны: $a = 9,15 \text{ \AA}$, $b = 12,69 \text{ \AA}$, $c = 5,73 \text{ \AA}$.

На элементарную ячейку приходится две формульные единицы. Структура ТГС сложна и представляет собой сетку молекул глицина $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ и тетраэдров SO_4 , связанных между собой водородными связями типа $-\text{O}-\text{H}\cdots\text{O}$ и $\text{N}-\text{H}\cdots\text{O}$ (рис. 3с).

Глициновые группы асимметричны и обладают значительным дипольным моментом, однако в параэлектрической фазе ионы глицина, лежащие в плоскостях $y = 1/4$, $y = 3/4$, могут, по-видимому, занимать два эквивалентных симметричных положения под углом $12,5^\circ$ к плоскости симметрии. Таким образом, выше точки фазового перехода структура ТГС состоит из равного числа ячеек с дипольными моментами противоположной полярности и в структуре имеются плоскости зеркального отражения $y = 1/4$ и $y = 3/4$.

Существует точка зрения, согласно которой «спусковым механизмом» фазового перехода в кристаллах ТГС является упорядочение протонов на водородных связях, соединяющих группы глицин III и глицин II.

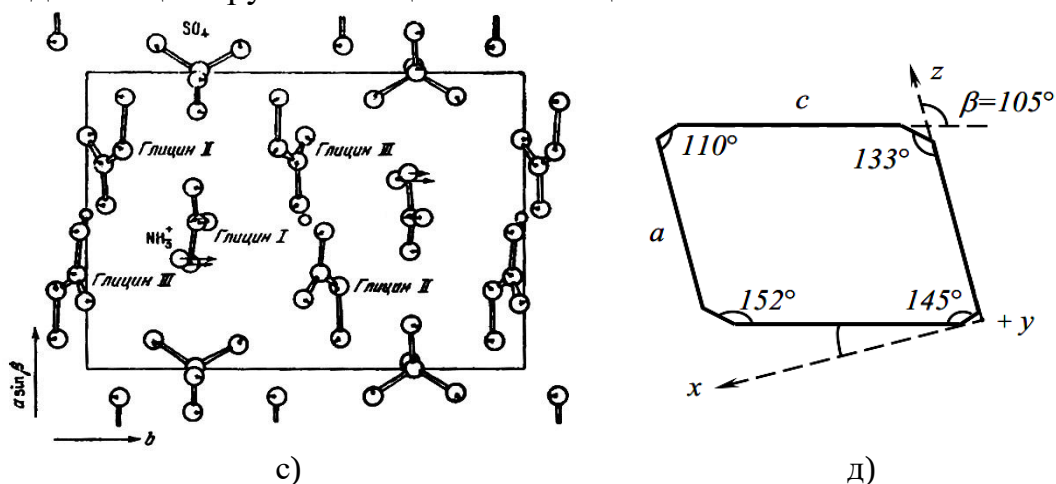


Рис. 3. с) Схематическое изображение структуры и смещений атомов при фазовом переходе в кристаллах ТГС;
д) Кристаллографическая система координат используемого среза кристалла ТГС, где a , b – параметры элементарной ячейки, β – угол моноклинности.

Фазовому переходу при $T_k = 49^0\text{C}$ в ТГС соответствует частичное упорядочение протонов на водородных связях и подвижных групп глицина I. При этом, естественно, исчезают плоскости зеркального отражения и симметрия кристалла понижается до полярной группы 2. Фазовый переход сопровождается аномалией только компоненты ϵ_{22} тензора диэлектрической проницаемости (ось y направлена вдоль полярной оси).

В равновесном состоянии без внешнего электрического поля сегнетоэлектрический кристалл самопроизвольно разбивается на несколько доменов так, чтобы их дипольные моменты компенсировали друг друга и не создавали своего электрического поля снаружи.

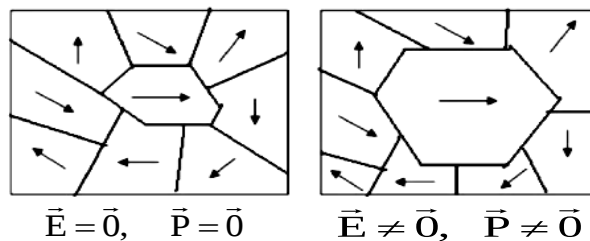


Рис. 4

При включении внешнего электрического поля происходит поляризация, но не за счет поворота доменов, а за счет перемещения границ между доменами (доменных стенок) (рис. 4). В результате объем ориентированных вдоль поля доменов растет и появляется суммарный дипольный момент.

Разбиение сегнетоэлектриков на домены обуславливает ряд его нелинейных свойств и в первую очередь нелинейную зависимость электрической поляризации $\vec{P}$ от величины внешнего электрического поля $\vec{E}$:

$$\vec{P} = \chi(\vec{E}) \epsilon_0 \vec{E}. \quad (3)$$

Нелинейная зависимость поляризации от внешнего поля, свойственная сегнетоэлектрикам, приводит в переменных электрических полях к **диэлектрическому гистерезису** (рис. 5), т.е. сегнетоэлектрики, подобно магнитным материалам, обладающим магнитным гистерезисом, обладают электрическим гистерезисом (отсюда второе название сегнетоэлектриков – ферроэлектрики).

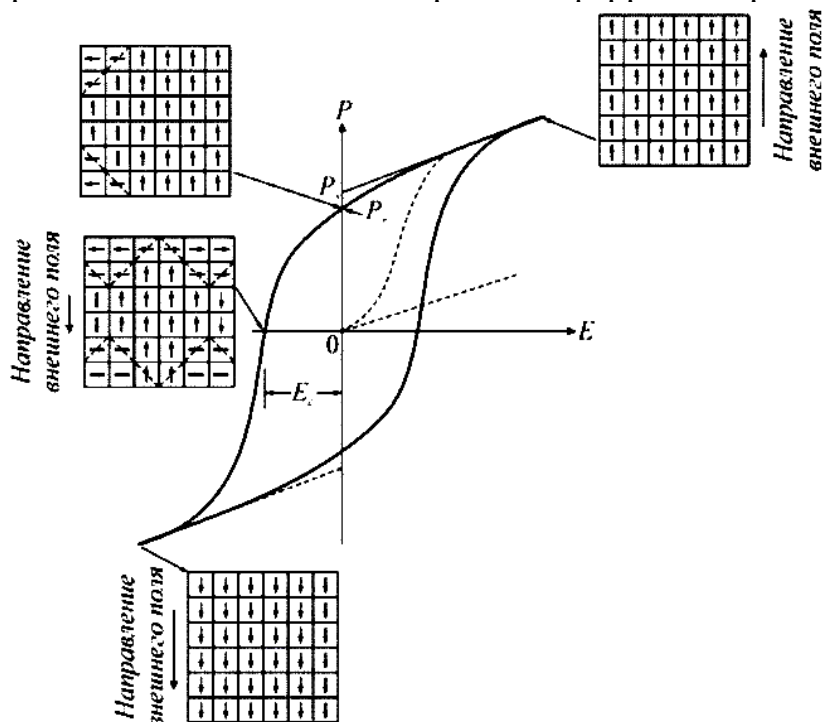


Рис. 5. Цикл поляризации сегнетоэлектрика.

Эта зависимость объясняется тем, что направление $\vec{P}$ в доменах сегнетоэлектриков во внешнем поле может быть изменено на противоположное (переориентация доменов) и что для разных доменов переориентация достигается при разных внешних полях.

Как уже отмечалось, у пьезоэлектриков никаким внешним полем, вплоть до пробивного, невозможно изменить ориентацию доменов и соответственно направление вектора поляризации $\vec{P}$.

ИТАК, отличительными свойствами сегнетоэлектриков являются:

1) *диэлектрическая проницаемость ϵ этих веществ может достигать нескольких тысяч* (для сравнения, у такого сильного полярного диэлектрика как вода $\epsilon = 81$);

2) *зависимость $\vec{P}$ от $\vec{E}$ не является линейной*;

3) при переполяризации сегнетоэлектрика обнаруживается явление *гистерезиса*, то есть запаздывание следования за изменением поля. Существование *сегнетоэлектрического гистерезиса* связано с наличием сегнетоэлектрических доменов – объемных областей, в каждой из которых дипольные моменты ориентированы одинаково;

4) наблюдается *сложная зависимость ϵ от температуры*, причем для каждого сегнетоэлектрика существует определенная температура, которая называется *температурой* или *точкой Кюри* (T_K), ниже которой он обладает сегнетоэлектрическими свойствами, а выше – ведет себя как обычный линейный диэлектрик.

Применение сегнетоэлектриков

В техническом применении сегнетоэлектриков наметилось несколько направлений, важнейшими из которых следует считать:

1) изготовление малогабаритных низкочастотных конденсаторов с большой удельной емкостью;

2) использование материалов с большой нелинейностью поляризации для диэлектрических усилителей, модуляторов и других управляемых устройств;

3) использование сегнетоэлементов в счетно-вычислительной технике в качестве ячеек памяти;

4) использование кристаллов сегнето- и антисегнетоэлектриков для модуляции и преобразования лазерного излучения;

5) изготовление пьезоэлектрических и пьезоэлектрических преобразователей.

Наиболее замечательной особенностью сегнетоэлектриков является зависимость поляризации от внешнего электрического поля.

Внешнее электрическое поле изменяет направление электрических моментов доменов, что создает эффект очень сильной поляризации. Этим объясняются свойственные сегнетоэлектрикам высокие значения диэлектрической проницаемости.

Доменная поляризация связана с процессами зарождения и роста новых доменов за счет смещения доменных границ. Диэлектрический гистерезис обусловлен необратимым смещением доменных границ под действием поля.

Рассмотрение петель гистерезиса позволяет получить наглядное представление о роли доменов в поляризации сегнетоэлектрика.

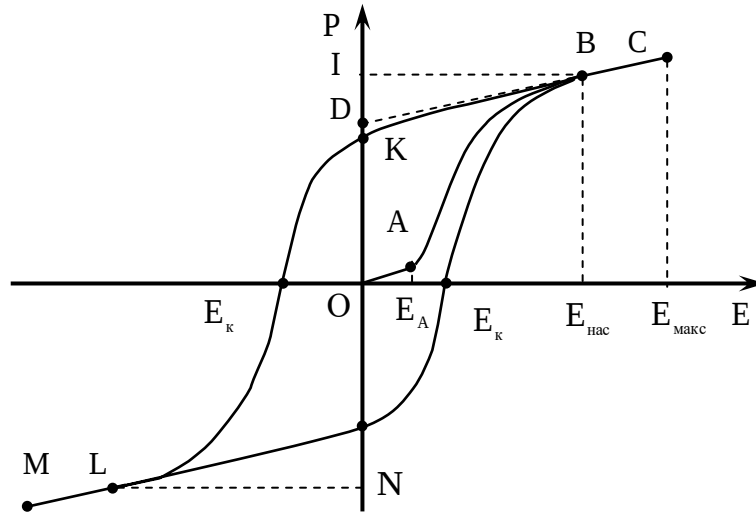


Рис. 6. Зависимость поляризации $\vec{P}$ от напряженности электрического поля $\vec{E}$ для сегнетоэлектрика.

Как следует из анализа петли диэлектрического гистерезиса (рис. 6), при наложении внешнего электрического поля вдоль полярной оси кристалла в образце сегнетоэлектрика развивается процесс поляризации.

При малых значениях поля E основной вклад в поляризацию вносит индуцированная часть $P_{\text{инд}}$.

С ростом напряженности поля полный электрический момент образца будет увеличиваться (см. рис. 6) по двум причинам: во-первых, в результате развития индуцированной поляризации, во-вторых, вследствие возрастания спонтанной составляющей этого процесса. Индуцированный дипольный момент $\vec{P}_{\text{инд}}$ возникает в результате смещения электронных оболочек относительно ядер (электронная поляризация), а также разноименно заряженных ионов друг относительно друга (ионная поляризация).

Этот процесс в сегнетоэлектриках аналогичен поляризации обычных диэлектриков, при этом $\vec{P}_{\text{инд}}$ линейно зависит от напряженности внешнего электрического поля. При небольших значениях $\vec{E}$ в сегнетоэлектрике часто имеет место только этот линейный процесс (участок ОА на рис. 6).

Начиная с некоторых значений напряженности поля ($\vec{E}_A$ в точке А), при дальнейшем увеличении напряженности к индуцированной поляризации подключается процесс “проявления” спонтанной поляризации – процесс переориентации дипольных моментов доменов, рост энергетически “выгодных” доменов за счет менее “выгодных” (явление движения доменных стенок), при этом “выгодной” является ориентация доменов с дипольными моментами, образующими острые углы с направлением внешнего электрического поля.

В результате этого процесса спонтанная поляризация $\vec{P}_{\text{сп}}$ образца возрастает, причем, как отмечалось выше, нелинейно с увеличением напряженности поля: небольшое изменение $\vec{E}$ приводит к значительному увеличению $\vec{P}_{\text{сп}}$ (участок АВ рис. 6).

При некотором значении напряженности поля наступает момент, когда дипольные моменты всех доменов будут сориентированы вдоль поля (точка В на графике рис. 6), что делает образец фактически монокристаллическим. Это – эффект насыщения спонтанной поляризации, $\vec{E}_{\text{нас}}$ – поле насыщения. Дальнейшее возрастание $\vec{P}$ при увеличении $\vec{E}$ будет обеспечено лишь продолжающимся ростом $\vec{P}_{\text{инд}}$, и кривая АВ сменится прямолинейным участком ВС (рис. 6).

Если затем уменьшать электрическое поле от значения $\vec{E}_{\text{макс}}$ до нуля, поляризованность меняется сначала вдоль СВ (до точки В), а в области “проявления” спонтанной поляризации спадает иначе, чем нарастала, а именно – по кривой ВК.

Экстраполяция участка СВ до пересечения с осью P определяет значение спонтанной поляризации $\vec{P}_{\text{сп}}$.

На рис. 7 представлено схематическое изображение доменной структуры сегнетоэлектрика, соответствующее различным стадиям развития процесса спонтанной поляризации.

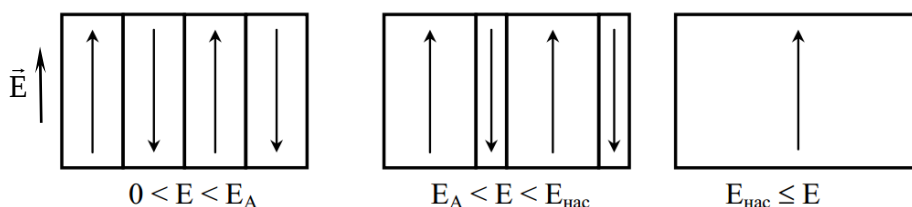


Рис. 7. Изображение доменной структуры сегнетоэлектрика, соответствующей различным стадиям процесса поляризации

При полном отключении внешнего электрического поля образец остается макроскопически поляризованным. Отрезок ОД соответствует этой остаточной поляризованности $\vec{P}_{\text{ост}}$. Чтобы уничтожить ее, т.е. деполяризовать образец, необходимо подать на него электрическое поле обратного направления напряженности $\vec{E}_к$, которое называют **коэрцитивным полем**.

При дальнейшем циклическом изменении электрического поля зависимость $\vec{P}(\vec{E})$ изображается симметричной петлеобразной кривой, называемой петлей гистерезиса. Петля с наличием участка ВС (т.е. когда максимальное поле, приложенное к образцу, превышает поле насыщения $\vec{E}_{\text{нас}}$) является предельной (или максимальной), т.к. спонтанная поляризация образца, представляемая такой кривой, реализована полностью. При использовании полей, меньших $\vec{E}_{\text{нас}}$, наблюдаются петли меньших размеров (частные петли), при этом вершины частных петель лежат на первичной кривой ОАВ. При совсем слабых полях процесс переориентации дипольных моментов доменов затруднен вследствие инерции доменных стенок, и в сегнетоэлектрике развивается лишь индуцированная поляризация, линейная в отношении поля $\vec{E}$ (участок ОА на рис. 6), в этом случае петля гистерезиса не наблюдается вовсе.

При полях, близких к коэрцитивным, происходит интенсивная переполаризация доменов – изменение знака их поляризации на противоположное.

Дальнейшее повышение значений поля приводит к насыщению (участок KL), т.е. к ориентации всех доменов в одном направлении, только противоположном по сравнению с участком BC.

Уменьшение значений напряженности электрического поля от значения, соответствующего точке L, повторяет процесс, рассмотренный на участке BK. В точке B гистерезисный цикл заканчивается. При следующем периоде изменения поля процесс переполяризации снова идет по рассмотренному циклу.

Экстраполяция BC к оси ординат позволяет:

1) увидеть в полном объеме характер нарастания индуцированной поляризованности (прямая DBC параллельна прямой OA рис. 5, 6),

2) определить величину спонтанной поляризации насыщения сегнетоэлектрического кристалла $\vec{P}_{\text{сп нас}}$, соответствующую отрезку OD. Индуцированная поляризация $\vec{P}_{\text{инд}}$ при поле насыщения $\vec{E}_{\text{нас}}$ соответствует отрезку DI.

Петли диэлектрического гистерезиса, изучаемые в данной работе на образцах сегнетоэлектрика триглицинсульфата (ТГС), отличаются высокой прямоугольностью. Участок OD $\approx P_{\text{сп}}$ и это значительно упрощает определение значения спонтанной поляризации.

Диэлектрическая проницаемость. Нелинейная связь между поляризацией и напряженностью электрического поля есть одна из основных и определяющих характеристик сегнетоэлектрика (3.3). Ответственной за эту нелинейность, как указывалось выше, является доменная структура.

В анизотропной диэлектрической среде (монокристалл) соотношение между электрическим смещением и напряженностью электрического поля имеет сложный вид, не сводящийся к простой пропорциональности.

Наиболее общий вид такой зависимости дается выражением:

$$\vec{D} = \vec{D}_0 + \varepsilon_{ik} \vec{E}_k, \quad (4)$$

где $\vec{D}_0$ – постоянный вектор, а совокупность величин ε_{ik} составляет тензор второго ранга – *тензор диэлектрической проницаемости* (или, короче, *диэлектрический тензор*).

Свободный член $\vec{D}_0$ в соотношении (3.4) существует, однако, не во всяком кристалле. Большинство типов кристаллографической симметрии не допускает существования постоянного вектора и тогда имеем просто,

$$\vec{D} = \varepsilon_{jk} \vec{E}_k. \quad (5)$$

Тензор ε_{ik} симметричен:

$$\varepsilon_{ik} = \varepsilon_{ki}. \quad (6)$$

Как и всякий симметричный тензор второго ранга, тензор ε_{ik} путем надлежащего выбора осей координат может быть приведен к диагональному виду. В общем случае, следовательно, тензор ε_{ik} определяется тремя независимыми величинами – тремя главными значениями ε_{11} , ε_{22} , ε_{33} .

Соотношение (3.1) значительно усложняется при переходе к анизотропным диэлектрикам (кристаллам). Диэлектрическая проницаемость в анизотропном кристалле зависит от того, в каком направлении исследуются его свойства, т.е., как уже отмечалось, совокупность величин ε_{ik} составляет тензор второго ранга – *тензор диэлектрической проницаемости*.

В зависимости от той или иной симметрии кристалла число различных главных значений тензора ε_{ik} может оказаться и меньшим трех.

В кристаллах моноклинной системы заранее определенным является направление одной из главных осей – она должна совпадать с осью симметрии второго порядка или быть перпендикулярной к плоскости симметрии кристалла.

Изменение поляризации $\vec{P}$ в сегнетоэлектриках складывается из двух механизмов: поляризации, связанной с переориентацией доменов $\vec{P}_{\text{сп}}$ и индуцированной поляризации $\vec{P}_{\text{инд}}$:

$$\vec{P} = \vec{P}_{\text{сп}} + \vec{P}_{\text{инд}}. \quad (7)$$

При этом вектор электрического смещения $\vec{D}$ имеет три компонента:

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}_{\text{сп}} + \vec{P}_{\text{инд}}. \quad (8)$$

где $\vec{E}$ – среднее макроскопическое поле в сегнетоэлектрике. Векторы $\vec{E}$ и $\vec{P}_{\text{инд}}$ имеют одинаковое направление, а вектор $\vec{P}_{\text{сп}}$ может в общем случае не совпадать с вектором $\vec{E}$ (анизотропия поляризуемости).

Поляризация сегнетоэлектрика является необратимым процессом, а зависимость поляризованности от напряженности поля – неоднозначна. Значения $\vec{P}$ определяются не только величиной внешнего поля, но зависят еще и от предшествовавших состояний поляризации.

В результате нелинейной зависимости $\vec{P} = f(\vec{E})$ диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика является также нелинейной функцией $\vec{E}$, причем само понятие диэлектрической проницаемости становится неоднозначным.

Нелинейность $\varepsilon = f(E)$ является важной характеристикой сегнетоэлектриков. Если создаваемая приложенным полем E поляризация не остается пропорциональной при возрастании поля, то измерения в переменном поле будут давать различные значения проницаемости при различных амплитудах поля.

Нелинейность поляризации по отношению к полю и наличие гистерезиса обуславливают зависимость диэлектрической проницаемости и емкости сегнетоэлектрического конденсатора от режима работы. Для характеристики свойств материала в различных условиях работы нелинейного элемента используют понятия статической, реверсивной, эффективной и других диэлектрических проницаемостей.

Статическая диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{\text{ст}}$ определяется из уравнения (9) по основной кривой поляризации сегнетоэлектрика:

$$\varepsilon_{\text{ст}} = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\vec{D}}{\vec{E}} = 1 + \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\vec{P}}{\vec{E}} \approx \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{P_{\text{полн}}}{E}, \quad (9)$$

так как для большинства сегнетоэлектриков значения $\varepsilon \gg 1$.

Реверсивная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{\text{р}}$ характеризует изменение поляризации сегнетоэлектрика в переменном электрическом поле при одновременном воздействии постоянного поля.

Эффективную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_{\text{эфф}}$, как и эффективную емкость конденсатора, определяют по действующему значению тока I (несинусоидального), проходящего в цепи с нелинейным элементом при заданном действующем напряжении U с угловой частотой ω :

$$\varepsilon_{\text{эфф}} \sim C_{\text{эфф}} = \frac{I}{\omega U}.$$

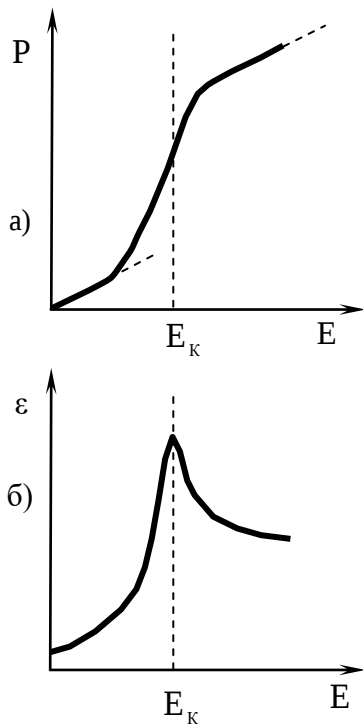


Рис. 8

С ростом поля E вблизи точек переполяризации, характеризуемых значениями коэрцитивного поля E_k зависимость $\varepsilon = f(E)$ проходит через максимумы, определяемые вкладом доменной переполяризации $P_{\text{сп}}$.

В устройствах на основе переключения поляризации используется эффект реверсивной остаточной поляризации (эффект переключения). Для успешного его применение необходимы сегнетоэлектрики с прямоугольной петлёй гистерезиса и малой величиной коэрцитивного поля.

Учитывая справедливость выражения (9), можем утверждать, что вид зависимости $P = f(E)$ (рис. 8, а) определяет характер поведения диэлектрической проницаемости $\varepsilon = f(E)$ (рис. 8, б).

При этом диэлектрическая проницаемость достигает своего максимального значения при напряженности электрического поля E_k , соответствующей точке перегиба на кривой $P = f(E)$.

При обработке экспериментальных данных в Microsoft Excel, может быть построена, например, полиномиальная линия тренда описываемая функцией вида

$$P(E) = A \cdot E^4 + B \cdot E^3 + C \cdot E^2 + D \cdot E + G, \quad (10)$$

где A, B, C, D, G – некоторые константы.

Для упрощения, построим график функции (10) с учетом полученной формы функции $P(E)$ для полиномиальной линии тренда.

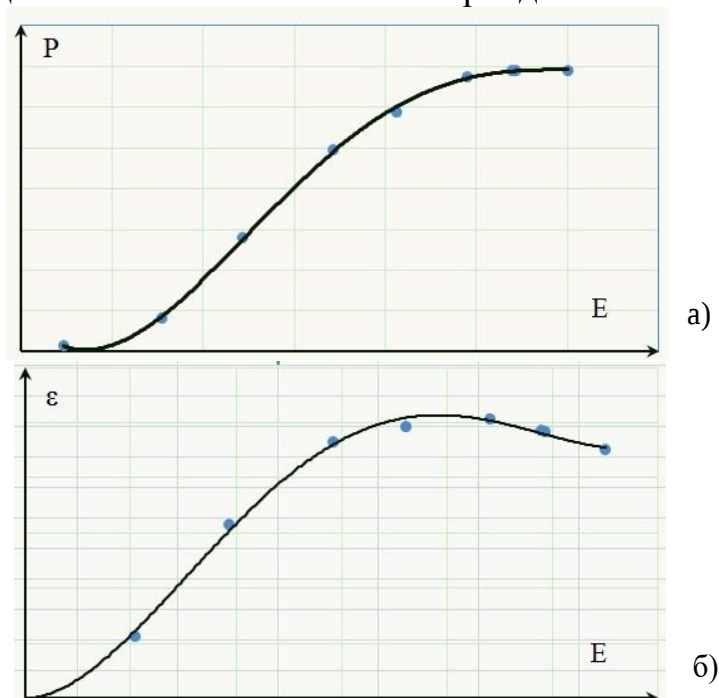


Рис. 9

Образец для исследований представляет собой плоскопараллельную пластинку кристалла ТГС, вырезанную перпендикулярно полярной оси "b". Плоские поверхности пластинки металлизируются, и такое устройство называется сегнето-конденсатором. Внешнее электрическое поле, прикладываемое к такому конденсатору, направлено вдоль полярной оси кристалла.

Схема лабораторной установки приведена на рис. 10.

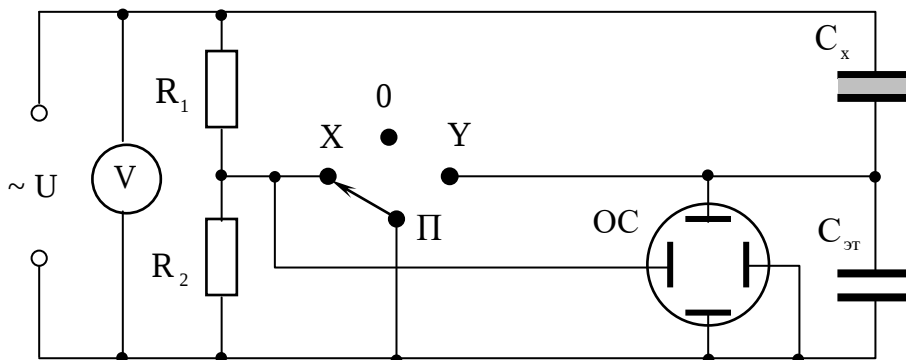


Рис. 10

На вход "X" осциллографа (ОС) подается напряжение с сопротивления R_2 , а на вход "Y" – с эталонного конденсатора $C_{\text{эт}}$. Для удобства измерений в схему введен переключатель (П), позволяющий проектировать петлю гистерезиса на оси "X" или "Y".

При замыкании П на "X" закорачивается вход "X" осциллографа и петля на экране осциллографа вырождается в вертикальную прямую, а при замыкании на "Y" – в горизонтальную прямую.

На горизонтальные пластины осциллографа подается напряжение U_2 пропорциональное входному напряжению U

$$U_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U. \quad (11)$$

Два последовательно соединенных конденсатора C_x и $C_{\text{эт}}$ включены параллельно делителю напряжения R_1 и R_2 . Так как заряды на конденсаторах C_x и $C_{\text{эт}}$ одинаковы, то

$$\frac{C_x}{C_{\text{эт}}} = \frac{U_{\text{эт}}}{U_c},$$

где $U_{\text{эт}}$ – напряжение на эталонном конденсаторе; U_c – напряжение на образце.

Учитывая равенство зарядов на конденсаторах, получим

$$U_{\text{эт}} = \frac{q}{C_{\text{эт}}} = \frac{\sigma S}{C_{\text{эт}}}, \quad (12)$$

где S – площадь пластины конденсатора C_x . Так как $P \approx \sigma$, то из (3.12) следует

$$P = \frac{C_{\text{эт}} U_{\text{эт}}}{S}. \quad (13)$$

Используя формулу связи напряженности E с разностью потенциалов U_c , получим

$$E = \frac{U}{d} = \frac{U_x}{d} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}, \quad (14)$$

где d – расстояние между пластинами конденсатора C_x ; U_x – напряжение, подаваемое на вход "X" осциллографа. Расчет E , P и $\epsilon_{ст}$ производится по рабочим формулам

$$E = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \frac{\delta_x}{d} x, \quad (15)$$

$$P = \frac{C_{эт}}{S} \delta_y y, \quad (16)$$

$$\epsilon_{ст} = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{P_{полн}}{E}, \quad (17)$$

где d и S – толщина и площадь исследуемого образца; δ_x и δ_y – чувствительность осциллографа по осям "X" и "Y" соответственно; x и y – координаты вершины петли гистерезиса.

ЗАДАНИЕ

1. Получить на экране осциллографа насыщенную петлю гистерезиса и установить ее симметрично относительно начала координат.
2. Уменьшая значения напряжения, подаваемого на вход "X" осциллографа, измерять координаты "X" и "Y" вершин петель гистерезиса.
3. Провести расчет величин P , E и $\epsilon_{ст}$ согласно выражениям (15 – 17).
4. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

№	U, В	x, дел.	y, дел.	P, Кл/м ²	E, В/м	ϵ
1						
2						
...						

5. Построить графики зависимости спонтанной поляризации P и диэлектрической проницаемости $\epsilon_{ст}$ от напряженности электрического поля:

$$P = f(E) \text{ и } \epsilon = f(E).$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте цель работы.
2. Что такое электрический диполь? Чему равен электрический момент диполя p ? Какое направление имеет электрический момент диполя?
3. Дайте определение вектора поляризации?
4. В чем различие между полярной и неполярной молекулами? Назовите известные Вам классы диэлектриков.
5. Опишите механизм поляризации неполярных, полярных и ионных диэлектриков.
6. Какие вещества относят к сегнетоэлектрикам?

7. Чем объясняется нелинейная зависимость вектора поляризации сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля?

8. В чем состоит явление гистерезиса, наблюдаемое для сегнетоэлектриков? Какие параметры сегнетоэлектриков можно определить с помощью петли гистерезиса?

9. Расскажите о доменном характере поляризации сегнетоэлектриков. Какие изменения в доменной структуре ответственны за различные участки основной кривой поляризации.

10. Какие понятия диэлектрической проницаемости используют для характеристики свойств материала в различных условиях работы нелинейного элемента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 2 : Электричество и магнетизм / И. В. Савельев. – М. : Астрель : АСТ, 2004.

2. Струков Б.А., Леванюк А.П. Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах. М.: Наука, 1995. 2-е изд., 240 с.

3. Цедрик М.С. Физические свойства кристаллов триглицинсульфата / М.С. Цедрик. – Минск.: Наука и техника, 1986. – 216 с.

4. Най, Дж. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц / Дж. Най; пер. с англ. Л. А. Шувалова. – Москва : Издательство иностранной литературы, 1960. – 386 с.

5. Лайнс, М. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы / М. Лайнс, А. Гласс; пер. с англ. В. В. Леманова и Г. А. Смоленского. - Москва : Мир, 1981. – 736 с.

6. Блинц, Р. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики: Динамика решётки / Р. Блинц, Б. Жекш; пер. с англ. С. А. Пикина, Ю. З. Эстрина, Н. Р. Иванова, А. П. Жукова. – Москва : Мир, 1975. – 400 с.

7. Ferroelectricity of glycine sulfate / В. Mathias [et al.] //Phys. Rev. – 1956. – Vol. 104. – P. 849-850.

8. Желудев, И.С. Электрические кристаллы / И. С. Желудев. – Москва : Наука, 1979. – 200 с.