

НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ



ФЭЛ-21

**ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ. ПЕТЛЯ
ГИСТЕРЕЗИСА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ.**

Тула, 2012 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА.

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ. ПЕТЛЯ ГИСТЕРЕЗИСА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ.

Цель работы: ознакомиться с методом измерения основных характеристик сегнетоэлектриков с помощью электронного осциллографа, исследовать зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от напряжённости электрического поля.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

Электрический диполь.

Электрические заряды создают в окружающем пространстве электрическое поле. Количественной характеристикой силового действия электрического поля на заряженные частицы и тела служит векторная величина \vec{E} , называемая *напряжённостью электрического поля*.

Напряжённость электрического поля равна силе \vec{F} , действующей на единичный положительный заряд q_0 , помещенный в рассматриваемую точку:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (1.1)$$

Два одинаковых по величине и противоположных по знаку электрических заряда ($+q_0$ и $-q_0$), находящихся на некотором расстоянии друг от друга, называются *электрическим диполем*.

Диполь (рис. 1.1) характеризуется *электрическим дипольным моментом*:

$$\vec{p}_m = q_0 \cdot \vec{l} \quad (1.2)$$

Вектор \vec{p}_m направлен от отрицательного заряда ($-q_0$) к положительному ($+q_0$).



Рис. 1.1. Схема электрического диполя.

Поляризация диэлектриков.

Диэлектриком называют вещества, которые при обычных условиях не проводят электрический ток.

Согласно представлениям классической физики, диэлектрик, как и всякое вещество, состоит из атомов и молекул. Однако, в отличие от проводников в нем нет свободных зарядов, способных двигаться под действием электрического поля. Все молекулы диэлектрика электрически нейтральны, так как суммарный заряд электронов и атомных ядер, входящих в состав молекулы, равен нулю.

Тем не менее такая система создает электрическое поле, поскольку положительный заряд ядер и отрицательный заряд электронов находится в

разных точках пространства. Если заменить положительные заряды ядер молекулы суммарным зарядом $(+q)$, находящимся в "центре тяжести" отрицательных зарядов, а заряд всех электронов заменить суммарным отрицательным зарядом $(-q)$, расположенным в "центре тяжести" отрицательных зарядов, то молекулу можно рассматривать как *электрический диполь*. Дипольный момент молекулы равен произведению суммарного заряда q на расстояние между "центрами тяжести" обоих суммарных зарядов.

В зависимости от строения молекул различают три группы диэлектриков.

Первую группу диэлектриков (H_2 ; N_2 ; O_2 ; CO_2 ; $CH_4...$) составляют вещества, молекулы которых имеют симметричное строение. Благодаря этому при отсутствии внешнего поля "центры тяжести" суммарных положительных и отрицательных зарядов совпадают и, следовательно, дипольный момент молекулы равен нулю. Молекулы таких диэлектриков называются *неполярными*.

Вторую группу диэлектриков (H_2O ; NH_3 ; SO_2 ; $CO...$) составляют вещества, молекулы которых имеют асимметричное строение. "Центры тяжести" суммарных положительных и суммарных отрицательных зарядов молекулы не совпадают. Молекулы таких диэлектриков обладают дипольным моментом даже в отсутствие внешнего поля и называются *полярными*.

Третью группу диэлектриков ($NaCl$; KBr ; $KCl...$) составляют вещества, молекулы которых имеют ионное строение. При наложении на ионный кристалл электрического поля происходит деформация кристаллической решетки или относительное смещение подрешеток.

Положительные и отрицательные ионы смещаются в противоположные стороны и каждая ячейка кристалла становится *диполем*.

Поляризацией диэлектрика называется процесс ориентации диполей или появление под действием электрического поля ориентированных по полю диполей. Во внешнем электрическом поле \vec{E} положительные заряды стремятся сместиться по направлению напряженности поля, а отрицательные - в противоположном направлении (см. рис. 1.2). В результате диполи полярных молекул ориентируются по полю, а неполярные молекулы приобретают индуцированный (наведенный) дипольный момент, направленный вдоль внешнего поля, что приводит к электронной поляризации неполярных диэлектриков.

Соответственно трем группам диэлектриков различают три вида поляризации.

- *электронная* или *деформационная поляризация* имеет место в диэлектрике с *неполярными* молекулами и заключается в возникновении у атомов и молекул индуцированного дипольного момента за счет деформации электронных орбит.

- *ориентационная, или дипольная поляризация*.

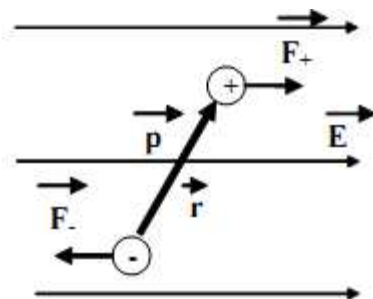


Рис. 1.2. Схема возникновения электронной поляризации диэлектриков.

Имеет место в диэлектрике с *полярными* молекулами и заключается в ориентации имеющихся дипольных моментов молекул по полю.

- *ионная поляризация* имеет место в диэлектриках с *ионными* кристаллическими решетками и заключается в смещении подрешетки положительных ионов вдоль внешнего поля, а отрицательных - против поля, приводящем к возникновению дипольных моментов.

Для количественного описания поляризации диэлектрика пользуются векторной величиной \vec{P} , которая называется *поляризованностью*. У большого класса диэлектриков (за исключением сегнетоэлектриков) поляризованность \vec{P} линейно зависит от напряженности поля \vec{E} .

Если поместить диэлектрик с полярными молекулами во внешнее электрическое поле, то под действием этого поля каждая молекула-диполь начнет поворачиваться, стремясь расположиться вдоль внешнего поля ($\vec{p} \parallel \vec{E}$), и диэлектрик поляризуется (см. рис. 1.2). Такая поляризация носит название ориентационной.

В ионных кристаллах (*NaCl* и др.) под влиянием внешнего электрического поля положительные и отрицательные ионы смещаются в противоположные стороны. Каждая ячейка кристалла становится диполем, и кристалл поляризуется. Такая поляризация называется ионной.

Степень поляризации диэлектриков, как было сказано выше, характеризуется вектором поляризации или поляризованностью \vec{P} :

$$\vec{P} = \frac{1}{\Delta V} \cdot \sum_{i=1}^N \vec{p}_i \quad (1.3)$$

где N - число молекул в объеме ΔV , $\sum_{i=1}^N \vec{p}_i$ - суммарный дипольный момент всех молекул диэлектрика в элементе объема ΔV .

Таким образом, поляризованность \vec{P} определяется как суммарный дипольный момент единицы объема диэлектрика. Единица измерения поляризованности $[P] = \text{Кл/м}^2$

Если диэлектрик изотропный, то:

$$\vec{P} = k_B \epsilon_0 \vec{E} \quad (1.4)$$

где k_B - диэлектрическая восприимчивость вещества; ϵ_0 - электрическая постоянная в системе СИ, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} [\text{Ф/м}]$.

Для установления количественных закономерностей поля в диэлектрике создадим при помощи двух бесконечных, параллельных и разноименно заряженных плоскостей А и В (рис.1.3) однородное электрическое поле напряженностью \vec{E}_0 .

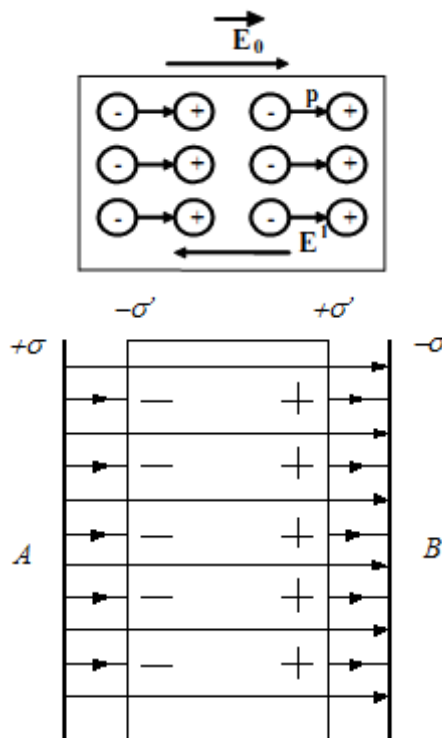


Рис. 1.3. Схема поляризации диэлектрика.

Под действием поля диэлектрик поляризуется. Положительные заряды смещаются по полю, а отрицательные - против поля. В результате этого на правой грани будет избыток положительных зарядов, с поверхностной плотностью $(+\sigma')$. На левой грани диэлектрика будет избыток отрицательных зарядов с поверхностной плотностью $(-\sigma')$. Эти нескомпенсированные заряды, появляющиеся в результате поляризации диэлектрика, называются *связанными*. Так как поверхностная плотность σ' *связанных* зарядов меньше плотности σ *свободных* зарядов плоскостей, то не все поле \vec{E}_0 компенсируется полем зарядов диэлектрика. Часть линий напряженности \vec{E}_0 проходит сквозь диэлектрик, другая же часть обрывается на связанных зарядах.

Следовательно поляризация диэлектриков вызывает уменьшение (ослабление) в нем поля, по сравнению с первоначальным внешним полем.

Итак, появление связанных зарядов приводит к возникновению электрического поля \vec{E}^l (поля, создаваемого связанными зарядами), которое направлено против внешнего поля \vec{E}_0 (поля, создаваемого свободными зарядами), и ослабляет его.

Модуль напряженности результирующего поля внутри диэлектрика:

$$E = E_0 - E^l \quad (1.5)$$

Модуль напряженности поля, создаваемого связанными зарядами:

$$E^l = \frac{\sigma'}{\epsilon_0} \quad (1.6)$$

Так как поверхностная плотность связанных зарядов σ' равна поляризованности P , то:

$$E^{\perp} = \frac{P}{\epsilon_0} \quad (1.7)$$

Подставляя модуль P из выражения (1.4) в выражение (1.7), получим:

$$E^{\perp} = k_B \cdot E \quad (1.8)$$

Решая совместно (1.5) и (1.8) получим выражение для модуля напряженности результирующего поля внутри диэлектрика в следующем виде:

$$E = \frac{E_0}{1 + k_B} = \frac{E_0}{\epsilon} \quad (1.9)$$

Безразмерная величина:

$$\epsilon = 1 + k_B \quad (1.10)$$

называется *диэлектрической проницаемостью среды*.

Диэлектрическая проницаемость среды ϵ показывает, во сколько раз поле ослабляется диэлектриком, внесенным в это поле.

Для вакуума $\epsilon = 1$, для диэлектриков составляет несколько единиц (например, для парафина $\epsilon = 2,0$, а у слюды $\epsilon = 6,5$).

Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков $\epsilon \gg 1$ (до 10^4).

Зависимость напряженности поля от свойств среды создает сложности при расчете полей. В частности, проходя через границу диэлектриков, вектор напряженности \vec{E} претерпевает скачкообразное изменение. В связи с этим, для удобства расчетов вводят еще одну характеристику, а именно, *вектор \vec{D} электрического смещения (электрической индукции)*, который по определению равен:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (1.11)$$

Подставляя в (1.11) выражение (1.4), получим:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \cdot (1 + k_B) = \epsilon \epsilon_0 \vec{E} \quad (1.12)$$

Вектором \vec{D} описывается электрическое поле, создаваемое свободными зарядами, т.е. поле в вакууме. В отличие от напряженности поля, электрическая индукция не зависит от диэлектрических свойств среды, что значительно упрощает расчеты полей в диэлектриках. Единица измерения вектора электрического смещения совпадает с единицей измерения поляризованности $[D] = \text{Кл/м}^2$.

Заметим, что выражение (1.4) можно записать с учетом (1.10) в виде:

$$\vec{P} = (\varepsilon - 1) \cdot \varepsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (1.13)$$

Так как для сегнетоэлектриков $\varepsilon \gg 1$ (до 10^4), то уравнение (1.13) можно переписать как:

$$\vec{P} = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (1.14)$$

Таким образом, для сегнетоэлектриков $\vec{D} \approx \vec{P}$.

Иногда вводится понятие абсолютной диэлектрической проницаемости вещества:

$$\varepsilon_a = \varepsilon \varepsilon_0 \quad (1.15)$$

Особое место среди диэлектрических материалов занимают *сегнетоэлектрики*. Если у обычных диэлектриков ε не зависит от напряженности электрического поля \vec{E} и слабо меняется с изменением температуры, то у сегнетоэлектриков зависимость ее от температуры и напряженности внешнего поля проявляется интенсивно и имеет специфический характер. Влияние температуры настолько велико, что при нагревании выше некоторой критической температуры, называемой точкой Кюри, сегнетоэлектрик становится обычным диэлектриком, происходит фазовый переход. Эти особенности сегнетоэлектриков объясняются наличием в них спонтанно поляризованных областей, называемых доменами. Единой теории, раскрывающей причины самопроизвольной поляризации, пока не существует.

Сегнетоэлектрики.

Сегнетоэлектриками называют кристаллические диэлектрики, которые обладают поляризованностью даже при отсутствии внешнего электрического поля (спонтанно, то есть самопроизвольно, поляризованы).

Это явление было первоначально открыто в 1921 году у сегнетовой соли $\text{NaKC}_4\text{H}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, давшей название всему классу веществ с подобными свойствами. К сегнетоэлектрикам относятся метатитанат бария BaTiO_3 (иногда данное вещество называют просто титанат бария), ниобат лития LiNbO_3 , триглицинсульфат $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{SO}_4$ и др.

Первое детальное исследование свойств сегнетоэлектриков было осуществлено И.В. Курчатовым, П.П. Кобеко -(сегнетова соль), а также Б.М.

Вулом - (титанат бария).

Сегнетоэлектрики отличаются от остальных диэлектриков рядом характерных особенностей:

1) сегнетоэлектрики имеют аномально большие значения диэлектрической проницаемости (для сегнетовой соли 10^4 , для титаната бария 1200);

2) зависимость поляризованности P (а, следовательно, и электрической индукции D) от напряженности поля E является нелинейной, т. е. диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика зависит от напряженности поля;

3) всем сегнетоэлектрикам, так же как и ферромагнетикам, свойственно явление *гистерезиса*, т. е. запаздывание изменений значения поляризованности P и электрической индукции D от изменений напряженности поля E . Зависимости $P = f(E)$ и $D = f(E)$ имеют вид петли, называемой *петлей гистерезиса* (рис. 1.4).

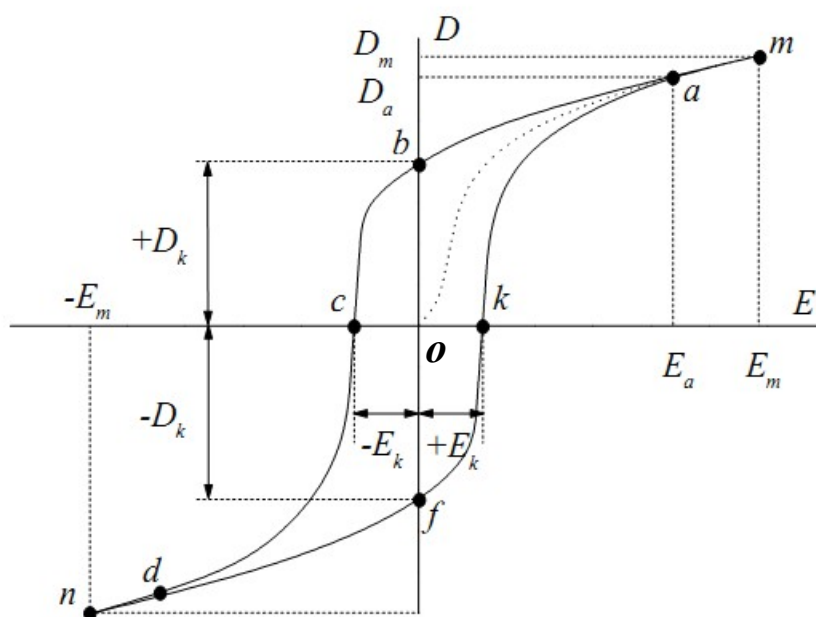


Рис. 1.4. Зависимость электрической индукции от напряженности внешнего поля для сегнетоэлектриков.

С увеличением напряженности поля E индукция D в неполяризованном образце возрастает по кривой oam до насыщения в точке a (вершина петли гистерезиса). Рост индукции на этом участке кривой обусловлен спонтанной поляризацией. Дальнейшее возрастание напряженности поля ($E > E_a$) приводит к росту индукции, обусловленной электронной поляризацией молекул сегнетоэлектрика (участок am).

Если при достижении $E = E_m$ начать уменьшать напряженность поля, то индукция D будет уменьшаться не по кривой tao , а по кривой $tabcs$. Следует обратить внимание, что при отсутствии внешнего поля, то есть при $E = 0$ сегнетоэлектрик не возвращается в прежнее неполяризованное состояние, а

сохраняет остаточную индукцию D_k , обусловленную остаточной спонтанной поляризованностью (отрезок ob).

Для деполяризации сегнетоэлектрика необходимо создать поле обратного направления с напряженностью E_k . Это значение напряженности поля (отрезок oc) называется *коэрцитивной силой*. При дальнейшем увеличении напряженности поля поляризация кристалла, а, следовательно, и индукция, меняют свое направление и достигают насыщения в точке d . Если вновь изменить напряженность поля от $-E_m$ до $+E_m$, то электрическое состояние сегнетоэлектрика будет изменяться по ветви $ndkam$. Значение остаточной индукции для этой ветви определяется отрезком of , а коэрцитивной силы - отрезком ok .

В рамках классической теории можно дать лишь качественное объяснение природе сегнетоэлектрика. Практически все основные свойства и процессы в сегнетоэлектрических материалах (поляризация, гистерезис, пьезоэффект, электрострикция и т.д.) тесно связаны с наличием спонтанной поляризации. Сегнетоэлектриками могут быть только кристаллические тела, у которых решетка не имеет центра симметрии. Весь объем сегнетоэлектрика как бы разбит на небольшие (порядка микрометра) области спонтанной поляризации, называемые *доменами*. В пределах домена сегнетоэлектрик спонтанно поляризован до насыщения и обладает определенным дипольным моментом. Однако, направление этого момента различно для различных доменов. Поэтому в отсутствие внешнего электрического поля (и остаточной индукции) средняя поляризованность объема сегнетоэлектрика равна нулю.

При внесении сегнетоэлектрика во внешнее электрическое поле происходит переориентация дипольных моментов по полю, а возникшее при этом суммарное электрическое поле доменов будет поддерживать их некоторую ориентацию и после прекращения действия внешнего поля. Поэтому сегнетоэлектрики имеют гистерезис и аномально большие значения диэлектрической проницаемости.

Увеличение поляризованности при росте напряженности поля происходит через несколько стадий. На первом этапе при слабых полях (начальный участок кривой oa на рис. 1.4) происходит смещение границ и рост доменов с "выгодной" ориентацией дипольных моментов за счет доменов с менее "выгодной" ориентацией. "Выгодной" является такая ориентация дипольных моментов, которая образует острый угол с направлением внешнего электрического поля. Наиболее эффективно этот процесс протекает на втором этапе (средний участок кривой oa), когда наблюдается полное исчезновение доменов с "невыгодной" ориентацией. На третьем этапе (вблизи точки a и на участке am) происходит постепенный поворот дипольных моментов всех доменов в направлении поля до тех пор, пока весь сегнетоэлектрик не превратится в однодоменный кристалл и не будет достигнуто состояние насыщения.

У каждого сегнетоэлектрика есть определенная температура (точка Кюри T_c), при которой домены распадаются и сегнетоэлектрик превращается в обычный диэлектрик. Например, у титаната бария $T_c = 406 \text{ К}$ (133°C), а у ниобата лития $T_c = 1483 \text{ К}$ (1210°C).

Сегнетова соль обладает сегнетоэлектрическими свойствами только в интервале температур между нижней точкой Кюри $T_c^{\text{нижн}} = 255 \text{ К}$ (-18°C) и верхней точкой Кюри $T_c^{\text{верх}} = 297 \text{ К}$ (24°C).

На рис. 1.5 показаны петли гистерезиса предельного и частного циклов.

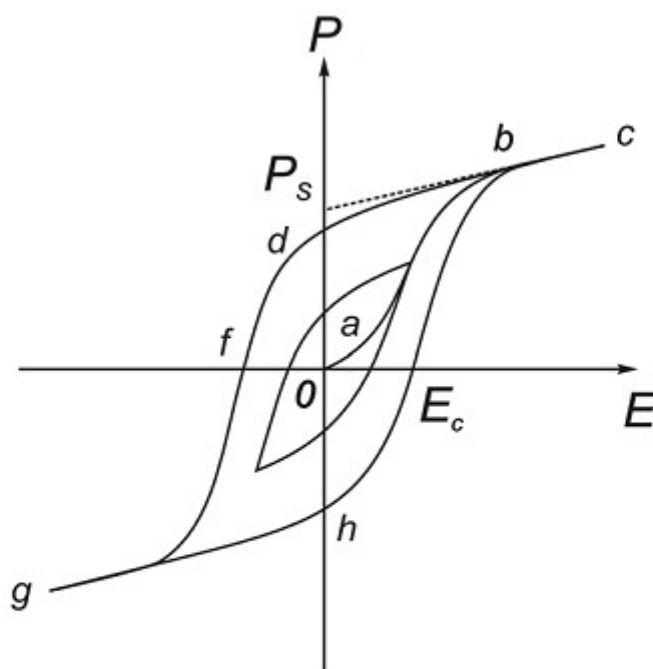


Рис. 1.5 Петли гистерезиса предельного ($cdfghc$) и частного (внутренняя кривая) циклов сегнетоэлектрика.

Отметим, что экстраполируя участок насыщения до пересечения с осью поляризации, т. е. к значению $E=0$, получают значение спонтанной поляризации P_s .

Физическая картина образования доменной структуры у сегнетоэлектриков кислородно-октаэдрического типа (титаната бария) описывается теорией локальных минимумов, предложенных Мэзоном и Маттиасом. Элементарная ячейка титаната бария при температурах выше 120°C представляет собой куб, в вершинах которого находятся ионы Ba^{2+} , в центрах – ионы O^{2-} , внутри куба – ион Ti^{4+} (рис. 1.6).

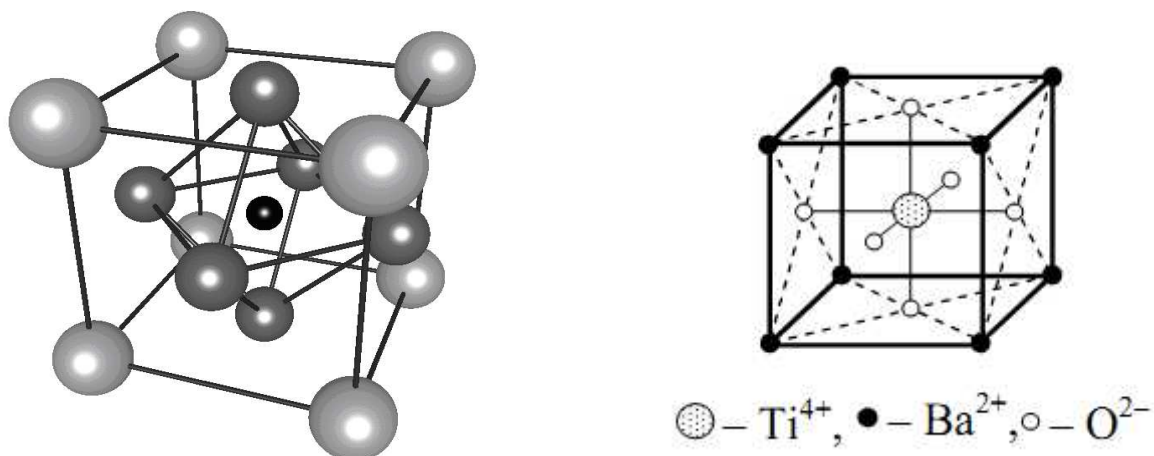


Рис. 1.6. Элементарная ячейка титанита бария при температурах выше точки Кюри $T_c \approx 120^\circ\text{C}$

Титанат бария BaTiO_3 представляет собой поликристаллический неорганический диэлектрик (керамический диэлектрик), изготавливаемый путем обжига смеси порошков углекислого бария и двуокиси титана TiO_2 . Диэлектрическая проницаемость этого сегнетоэлектрика равна 1000-1200. При $T_c \approx 120^\circ\text{C}$ у него наблюдается точка Кюри, в которой происходит превращение кристалла из тетрагональной модификации в кубическую, и спонтанная поляризация исчезает. Это открытие сыграло важную роль в развитии представления о сегнетоэлектрических явлениях и послужило началом многих работ по исследованию и созданию новых сегнетоэлектриков.

В настоящее время известно более сотни сегнетоэлектриков. Отечественной промышленностью разработана большая группа сегнетокерамических материалов с высокими нелинейными свойствами, отличающихся разнообразием электрических характеристик. На основе этих материалов создана серия сегнетоэлектриков "варикондов", предназначенных для эксплуатации в самых различных режимах.

Как было сказано выше, ячейка сегнетоэлектрика титаната бария BaTiO_3 - кубическая, в центре находится атом титана, в вершинах куба - атомы бария, а в центрах граней - атомы кислорода. Элементарная ячейка не обладает дипольным моментом, так как все заряды расположены симметрично. Если, однако, ионы Ti^{4+} и O^{2-} смещаются (в результате флуктуации) относительно ионов Ba^{2+} , образуются диполи с определенной конфигурацией.

Предположим, что ион Ti^{4+} смещается в направлении, иона O^{2-} , расположенного на одной из граней куба, элементарный куб приобретает при этом дипольный момент в указанном направлении. Если такое смещение ионов титана происходит во всех элементарных ячейках кристалла, то возникает суммарная поляризация всего твердого тела. Исследования показали, что в BaTiO_3 имеет место смещение как ионов Ti^{4+} , так и ионов O^{2-} . Ионы Ti^{4+} смещаются относительно ионов Ba^{2+} на величину $+0,05 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$), а ионы O^{2-} на величину $-0,10 \text{ \AA}$. Такие смещения ионов титана и кислорода

приводят к возникновению вектора поляризации.

На рис. 1.7 представлена температурная зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков BaTiO_3 и ВК-1. Как видно из рисунка, зависимость $\epsilon=f(T)$ имеет резко выраженный максимум. Температуру, соответствующую максимальному значению ϵ , называют точкой Кюри. Большое значение диэлектрической проницаемости вблизи точки Кюри объясняется тем, что при этой температуре происходит перестройка кристаллической структуры, и даже слабое внешнее поле вызывает значительную индуцированную поляризацию.

Исследования показали, что вблизи точки Кюри диэлектрическая проницаемость подчиняется закону Кюри-Вейса:

$$\epsilon = \frac{C}{|T - \theta|} \quad (1.16)$$

где: C - постоянная (для керамических сегнетоэлектриков $C = 10^5 \text{ K}$);

T - температура сегнетоэлектрика; $\theta = T_C$ - температура Кюри.

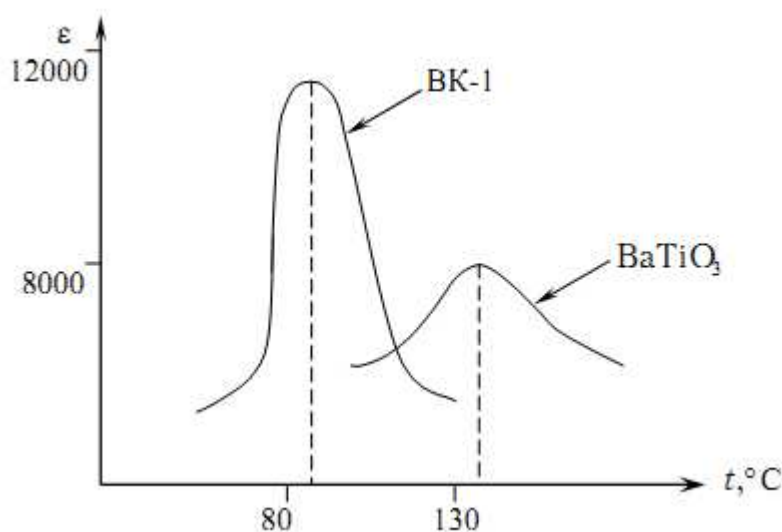


Рис. 1.7. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария и вариконда ВК-1.

В силу нелинейных зависимостей поляризации и диэлектрической проницаемости от напряженности поля сегнетоэлектрики относятся к классу нелинейных элементов. В настоящее время сегнетоэлектрики используются для создания малогабаритных конденсаторов и нелинейных управляемых емкостных элементов - варикондов.

Наиболее широко известны кристаллы сегнетовой соли, дигидрофосфата калия и титаната бария, характеристические параметры для которых приведены в табл. 1,2.

Табл.1. Сегнетоэлектрические кристаллы. T_c – температура Кюри, P_s – спонтанная поляризация (при указанной в скобках температуре), C – константа Кюри

Наименование	Химическая формула	T_c , К	P_s , 10^{-6} Кл/см ²	C , К
Сегнетова соль	$\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	297 (верхняя) 255 (нижняя)	0,25 (268 К)	$2,2 \cdot 10^3$
Дигидрофосфат калия	KH_2PO_4	123	4,75 (96 К)	$3,3 \cdot 10^3$
Титанат бария	BaTiO_3	393	26,0 (296 К)	$1,5 \cdot 10^5$

Табл. 2 Некоторые параметры сегнетоэлектриков. E_c – коэрцитивное поле при низких (≈ 60 Гц) частотах, ϵ – диэлектрическая проницаемость в слабом поле. В скобках указана температура, при которой проведены измерения

Сегнетоэлектрик	E_c , 10^5 В/м	ϵ
Титанат бария	0,5÷2 (293 К)	$(8 \div 10) \cdot 10^3$ (393 К) 160 ÷ 4000 (293 К)
Дигидрофосфат калия	2 (100 К)	$\approx 10^5$ (123 К) 50 (293 К)
Сегнетова соль	0,2 (278 К)	$\approx 10^3$ (295 К) 10 (173 К)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

Методика эксперимента.

Классическая схема для записи петли гистерезиса показана на рис. 2.1 (впервые предложена Сойер и Тауэр, 1930 г.). В данной реализации эксперимента к выходу генератора синусоидальных колебаний присоединены последовательно две емкости, одна из которых – это исследуемый образец сегнетоэлектрика (C_x), а вторая – эталонный линейный конденсатор (C_0). Пластинка сегнетоэлектрика имеет толщину d , и площадь поверхности, на которую нанесено металлическое покрытие, S_x .

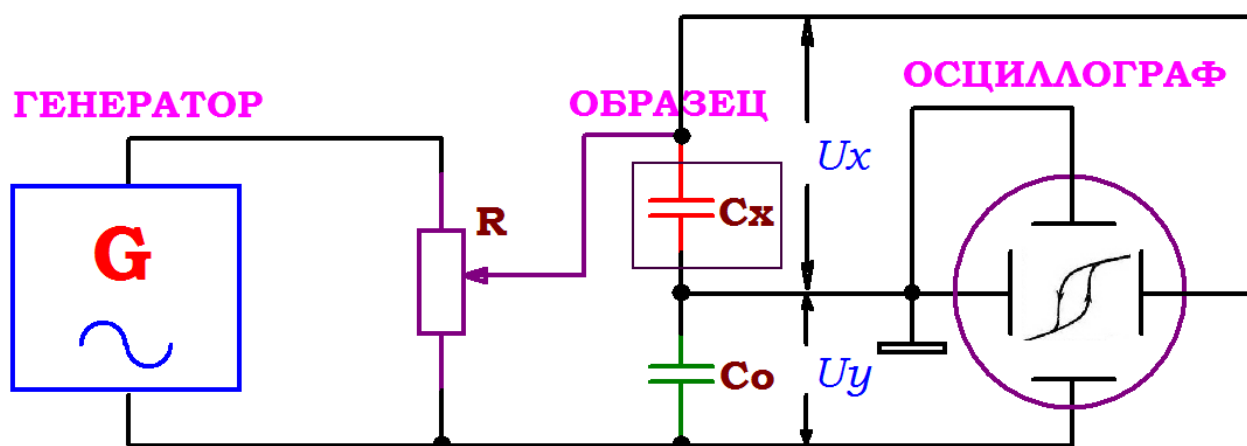


Рис. 2.1. Схема осциллографического исследования петли диэлектрического гистерезиса.

В схеме рис. 2.1 к источнику переменного напряжения «ГЕНЕРАТОР», частота которого может регулироваться, через резистивный делитель R , предназначенный для регулировки амплитуды напряжения, подключены два последовательно соединенных конденсатора C_x и C_0 . Между обмотками плоского конденсатора C_x помещен сегнетоэлектрик. Конденсатор C_0 — эталонный линейный (слюдяной) и его емкость постоянна. Напряжение U_y с конденсатора C_0 подается на вход Y (пластины вертикального отклонения луча), а напряжение U_x подается с сегнетоэлектрического конденсатора C_x на вход X (пластины горизонтального отклонения луча). Причем ёмкость подобрана так, что $C_0 \gg C_x$ и практически всё приложенное напряжение падает на исследуемом образце C_x , т. к. $U \sim \frac{1}{C}$.

Нетрудно убедиться, что напряжение U_x пропорционально напряженности E электрического поля в сегнетэлектрике, а напряжение U_y - пропорционально индукции D этого поля (напомним, что для сегнетоэлектриков $\vec{D} \approx \vec{P}$ и гистерезисные кривые $P = f(E)$ и $D = f(E)$ практически совпадают).

Для расчета примем во внимание, что, поскольку конденсаторы соединены последовательно, то заряды q на их обкладках одинаковы, т. е. $q = C_x U_x = C_0 \cdot U_y$. Напряжение на конденсаторе с сегнетоэлектриком C_x равно:

$$U_x = \frac{q}{C_x} \quad (2.1)$$

Как известно, для плоского конденсатора модуль вектора электрической индукции D равен поверхностной плотности заряда на обкладках:

$$D = \sigma = \frac{q}{S_9} \quad (2.2)$$

где S_9 - площадь пластины конденсатора с сегнетоэлектриком C_x ; q - заряд конденсатора.

Выражение (2.2) может быть получено по теореме Остроградского-Гаусса и рассматривается в курсе электродинамики и высшей математики.

Зная значение вектора электрического смещения D , по формуле (1.12) легко найти напряженность электрического поля E , прикладываемого к сегнетоэлектрическому конденсатору C_x :

$$E = \frac{D}{\varepsilon \varepsilon_0} \quad (2.3)$$

Подставляя выражение для модуля вектора D из (2.2) в (2.3) получим:

$$E = \frac{q}{S_9 \varepsilon \varepsilon_0} \quad (2.4)$$

Выразим из (2.4) величину заряда q на обкладках конденсатора и подставим найденное значение в выражение (2.1):

$$U_x = \frac{E S_9 \varepsilon \varepsilon_0}{C_x} \quad (2.5)$$

Исследуемый образец сегнетоэлектрика C_x представляет собой плоский конденсатор и можно записать выражение для его электрической ёмкости:

$$C_x = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S_9}{d} \quad (2.6)$$

где d - расстояние между обкладками (то есть толщина слоя сегнетоэлектрика).

Подставляя выражение (2.6) для ёмкости C_x плоского сегнетоэлектрического конденсатора в (2.5) найдем напряжение U_x , подаваемое на горизонтально отклоняющие пластины электронного осциллографа (вход X):

$$U_x = E d \quad (2.7)$$

Как видно из (2.7), это напряжение пропорционально напряженности внешнего электрического поля E :

$$E = \frac{U_x}{d} \quad (2.8)$$

Напряжение U_y на эталонном линейном конденсаторе C_0 равно:

$$U_y = \frac{q}{C_0} \quad (2.9)$$

Напомним, что так как конденсаторы соединены последовательно, заряды на них равны $q = C_x U_x = C_0 \cdot U_y$.

Из (2.2) следует, что величина заряда q на обкладках обоих конденсаторов может быть определена как:

$$q = D \cdot S_y \quad (2.10)$$

Тогда, подставляя (2.10) в (2.9), найдем напряжение U_y , подаваемое на вертикально отклоняющие пластины электронного осциллографа (вход Y):

$$U_y = \frac{D \cdot S_y}{C_0} \quad (2.11)$$

Следовательно, величина вектора электрического смещения D пропорциональна напряжению U_y , снимаемому с обкладок эталонного линейного конденсатора C_0 :

$$D = \frac{U_y \cdot C_0}{S_y} \quad (2.12)$$

Таким образом, из уравнений (2.7) и (2.11) видно, что если напряжение U_y подать на вход вертикальной развёртки осциллографа (Y), а напряжение U_x – на вход горизонтальной развёртки (X), то электронный луч в направлении оси Y будет отклоняться пропорционально электрической индукции D (или, что тоже самое, поляризованности P) сегнетоэлектрика, а в направлении оси x – пропорционально напряжённости внешнего электрического поля E . За один период синусоидального изменения напряжения электронный луч на экране опишет полную петлю гистерезиса, и за каждый последующий период в точности повторит её. Поэтому на экране будет наблюдаться неподвижная петля.

Из вышеизложенного следует вывод, что на экране осциллографа будет воспроизводиться зависимость $D=f(E)$, то есть петля гистерезиса сегнетоэлектрика.

Приборы и оборудование.

Лабораторная работа по исследованию явления диэлектрического гистерезиса в сегнетоэлектриках выполняется на учебной установке ФЭЛ-21, принципиальная схема которой повторяет схему рис. 2.1 с некоторыми изменениями и приведена рис. 2.2.

Установка учебная ФЭЛ-21

"Изучение свойств и явления гистерезиса сегнетоэлектриков"

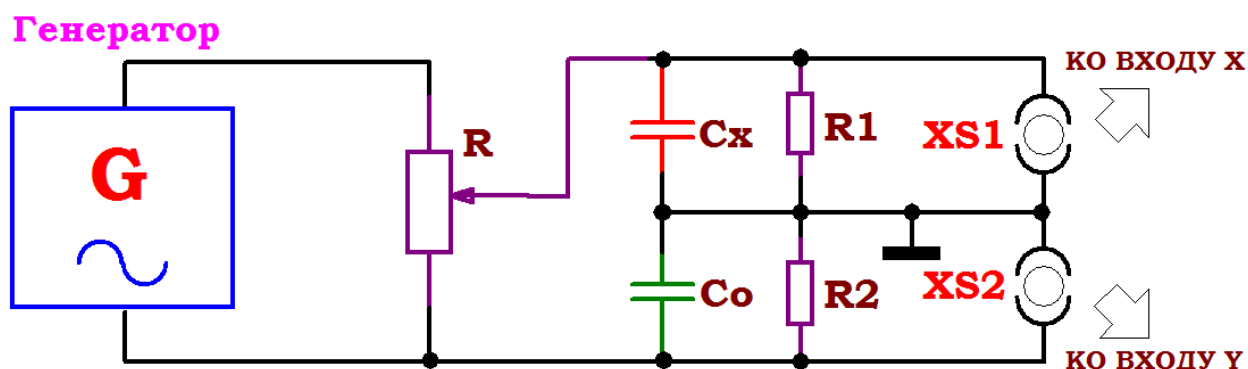


Рис. 2.2. Схема осциллографического исследования петли диэлектрического гистерезиса на учебной установке ФЭЛ-21.

Переменное напряжение ~ 150 В с генератора G регулируется потенциометром R (ручка «АМПЛИТУДА»). Два конденсатора C_x (сегнетоэлектрический, диэлектриком в котором служит сегнетоэлектрическая керамика типа ВК-2 или эквивалентная) и C_0 (эталонный линейный) соединены последовательно и подключены к данному регулируемому источнику переменного напряжения.

Параллельно этой цепочке конденсаторов включены два резистора. Резистор R1 обладает эквивалентным омическим сопротивлением исследуемого сегнетоэлектрика, а резистор R2 служит для подбора равенства фаз напряжений, подаваемых на вход осциллографа (ЭО). Величины сопротивлений резисторов R1 и R2 подбираются экспериментально для каждого экземпляра учебной установки и их регулировка в процессе эксплуатации не требуется (резисторы впаяны в основную плату управления, находящуюся в корпусе прибора).

Частота генератора плавно регулируется с помощью кнопок «ЧАСТОТА» - текущее значение частоты генератора выводится на дисплей, амплитуда выходного напряжения устанавливается с помощью ручки «АМПЛИТУДА», измеряется цифровым вольтметром и выводится на LCD индикатор.

Изменение частоты и измерение амплитуды напряжения генератора возможно только при выключенном генераторе! Генератор включается и отключается кнопкой «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ». Для надежного срабатывания кнопок необходимо удерживать их нажатыми в течение ~ 2

секунд.

Максимальная амплитуда U переменного напряжения с генератора ограничена величиной $U \approx 150$ В. Это напряжение делится на двух последовательно соединенных конденсаторах C_0 и C_x . Для того чтобы гистерезисная кривая выходила на насыщение необходимо, чтобы напряжение на C_x было $U_x > E \cdot d \approx 2 \cdot 10^5 [\text{В/м}] \cdot 3 \cdot 10^{-4} [\text{м}] \approx 120$ В именно поэтому мы должны обеспечить условие $C_0 \gg C_x$.

Петля диэлектрического гистерезиса изображается на экране в некотором масштабе в координатах (x ; y), причем:

$$U_x = K_x X; \quad U_y = K_y Y \quad (3.1)$$

где X и Y - измеряются в «делениях шкалы» экрана осциллографа.

Следует учесть, что ось X горизонтального отклонения луча осциллографа в режиме XY фигур Лиссажу не откалибрована, а сигнал на вход X подаётся через резистивный делитель напряжения, встроенный в учебную установку (ручка «УСИЛЕНИЕ X »). Следовательно, при расчете значений напряженности внешнего поля E по формуле (2.8), следует учесть коэффициент чувствительности оси X K_x [ВОЛЬТ/ДЕЛ], определяемый экспериментально путем калибровки оси X с использованием цифрового вольтметра, встроенного в лабораторную установку.

Перепишем выражение (2.8) с учетом (3.1):

$$E = \frac{U_x}{d} = \frac{K_x \cdot X}{d} \quad (3.2)$$

На вход Y сигнал подаётся также через резистивный делитель, но встроенный в осциллограф. В данном случае значения коэффициента чувствительности оси Y K_y определяются подписями около ручки ВОЛЬТ/ДЕЛ оси Y осциллографа (ручка ПЛАВНО VOLT VAR. при этом должна быть повернута до упора по часовой стрелке).

Перепишем выражение (2.12) с учетом (3.1):

$$D = \frac{U_y \cdot C_0}{S_y} = \frac{K_y \cdot Y \cdot C_0}{S_y} \quad (3.3)$$

ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЁТОВ

Емкость эталонного конденсатора $C_0 = 10$ мкФ $= 10^{-5}$ Ф

Площадь пластины конденсатора с сегнетоэлектриком $S_y = 1,23 \cdot 10^{-3}$ м²

Расстояние между обкладками (толщина слоя сегнетоэлектрика)
 $d = 3 \cdot 10^{-4}$ м

Порядок выполнения.

1. Перед включением следует проверить целостность всех соединительных и сетевых проводов устройств. Разобраться в назначении ручек, кнопок и измерительного прибора. **Все соединительные провода и контрольные точки использовать следует только по назначению, запрещается замыкать выходы контрольных точек, которые не предназначены для этого в данной работе! Перед началом работы обязательно ознакомиться с паспортом на исследуемый осциллограф. НЕ ДОПУСКАЙТЕ ДЛИТЕЛЬНОГО СВЕЧЕНИЯ ТОЧКИ НА ЭКРАНЕ ОСЦИЛЛОГРАФА В ОДНОМ МЕСТЕ, ЭТО МОЖЕТ ПРИВЕСТИ К ПОСТЕПЕННОМУ ВЫГОРАНИЮ ЛЮМИНОФОРА В ДАННОЙ ОБЛАСТИ ЭКРАНА!**
2. Включите лабораторный модуль в сеть ~ 220 В.
3. Перевести переключатель СЕТЬ на панели установки и электронного осциллографа в положение «ВКЛ» при этом должны загореться соответствующие сигнальные светодиоды «СЕТЬ». Дать приборам прогреться не менее 5 минут.
4. Подключить входы X и Y осциллографа соединительными проводами к соответствующим выходам учебной установки. Два измерительных осциллографических провода типа «BNC –тюльпан» предназначены для снятия сигнала с исследуемого сегнетоэлектрического конденсатора C_x (клемма XS1, подключается ко входу X осциллографа) и сигнала с эталонного линейного конденсатора C_0 (клемма XS2, подключается ко входу Y осциллографа).
5. Кнопками «ЧАСТОТА» на передней панели модуля установить частоту для исследования явления гистерезиса сегнетоэлектрического образца (оптимальное значение частоты $\sim 300 - 600$ Гц), текущее значение частоты генератора индуцируется на ЖКД дисплее учебной установки. **Для надежного срабатывания кнопки необходимо удерживать её нажатой в течение ~ 2 секунд.**
6. С помощью ручки «АМПЛИТУДА» на панели установки установить уровень сигнала с выхода генератора $U \sim 140 - 150$ В. Измерение значения амплитуды выходного напряжения генератора возможно только при отключенном генераторе. Генератор включается и отключается кнопкой «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ».
7. **Включить генератор гармонического сигнала кнопкой «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ»** и перевести осциллограф в режим сложения двух колебаний (режим фигур Лиссажу), для чего установить переключатель «SLOPE» слева от входа X осциллографа в положение «XY».
8. Ручкой ВОЛЬТ/ДЕЛ (VOLTS/DIV) оси Y установить уровень сигнала, обеспечивающий наилучший масштаб для наблюдения петли гистерезиса (рекомендуемое значение **.5 - 1** ВОЛЬТ/ДЕЛ). Ручка ПЛАВНО VOLT VAR. при этом должна быть повернута до упора по часовой стрелке, так

- как только в этом положении показания чувствительности K_y канала Y определяются подписями около ручки ВОЛЬТ/ДЕЛ оси Y осциллографа.
9. Вращением ручки «УСИЛЕНИЕ X» на панели учебной установки, а также ручек «POSITION» для осей X и Y на осциллографе установить изображение петли таким образом, чтобы картинка занимала $\frac{3}{4}$ экрана и была расположена **строго по центру** относительно координатной сетки осциллографа.
 10. Получить изображение предельной петли гистерезиса при насыщении сегнетоэлектрика. Признаком насыщения являются «усы» на петле и её площадь при росте напряжения не увеличивается. Проверить симметричность установки изображения относительно осей X и Y на шкале экрана и скопировать это изображение на миллиметровую бумагу по клеткам.
 11. Произведите калибровку оси X осциллографа. Для этого поставьте переключатель «DC $\underline{\underline{I}}$ (GND) AC» на передней панели осциллографа в среднее положение « $\underline{\underline{I}}$ GND» при этом ось Y выключается (заземляется), а напряжение с генератора подается на горизонтально отклоняющие пластины электронного осциллографа и на экране появляется горизонтальная линия. Измерьте l_x - длину горизонтальной линии в клетках (делениях) и отключите генератор кнопкой «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ» для измерения амплитудного значения напряжения с выхода генератора. Встроенный цифровой вольтметр измеряет **амплитудное значение** напряжение, а так как длина l_x горизонтальной линии осциллографа пропорциональна удвоенной амплитуде входного напряжения, то коэффициент $K_x = \frac{2U_0}{l_x}$, где U_0 - показания вольтметра в вольтах, l_x - длина горизонтальной линии в клетках (делениях). **Оптимальное для калибровки напряжение с выхода генератора лежит в диапазоне ~ 140-150 В.** Изменяя с помощью ручки «АМПЛИТУДА» напряжение генератора, снять зависимость l_x от напряжения U_0 , рассчитать коэффициент K_x для нескольких (3 – 4) значений напряжения U_0 и соответствующих этим напряжениям длин горизонтальных линий и определить среднее значение коэффициента чувствительности K_x (см. табл. 3). **Для измерения установленного напряжения U_0 , генератор следует отключать, при этом горизонтальная линия исчезает с экрана осциллографа.**

Таблица 3

l_x , деления	U_0 , В	$K_x = \frac{2U_0}{l_x} \left[\frac{В}{ДЕЛ} \right]$
...

$$\langle K_x \rangle = \dots [ВОЛЬТ/ДЕЛ]$$

12. ПОСЛЕ КАЛИБРОВКИ ОСИ X ПОЛОЖЕНИЕ РУЧКИ «УСИЛЕНИЕ ОСИ X» НА ПАНЕЛИ УЧЕБНОЙ УСТАНОВКИ НЕ ИЗМЕНЯТЬ! В противном случае ось придется перекалибровать согласно пп.11.
13. Включить ось Y, поставив переключатель «DC \perp AC» в какое-либо крайнее положение и верните изображение предельной петли диэлектрического гистерезиса на экран осциллографа.

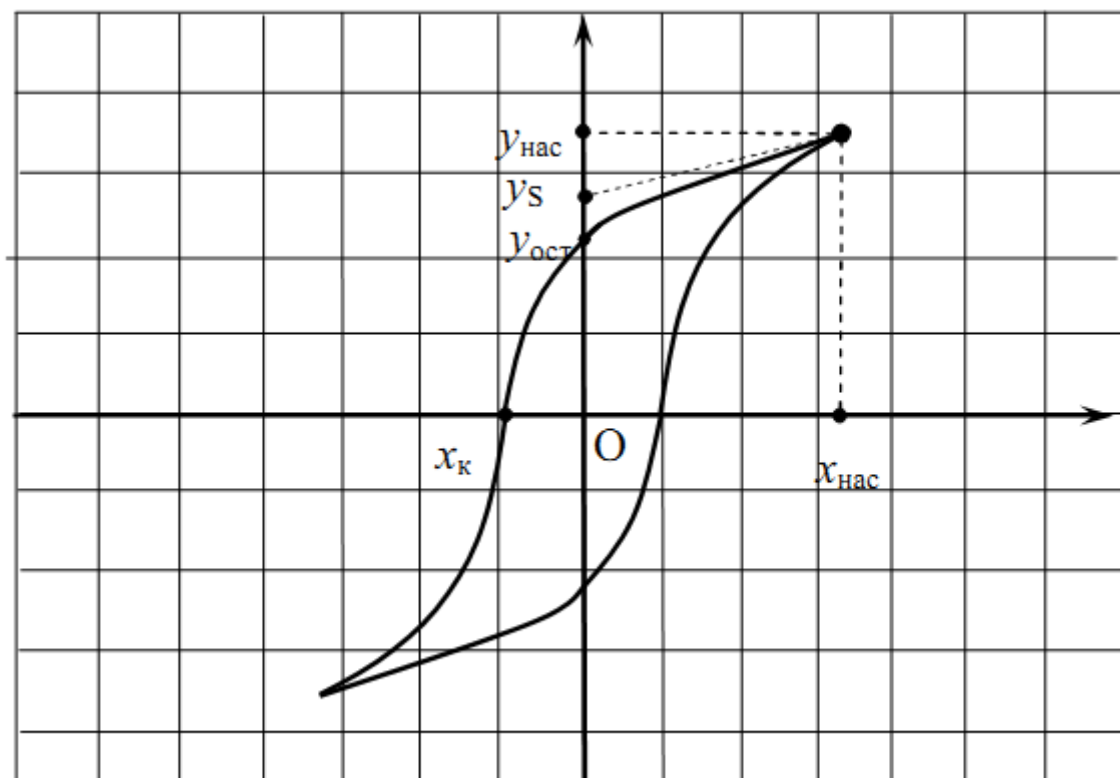


Рис. 2.3. Осциллограмма петли диэлектрического гистерезиса, получаемая на учебной установке ФЭЛ-21.

14. Измерить по масштабной сетке экрана осциллографа координаты пяти характерных точек петли: x_k , $x_{нас}$, $y_{ост}$, y_s , $y_{нас}$ (рис. 2.3). Петлю гистерезиса зарисовать или сфотографировать. По формулам (3.2), (3.3), рассчитайте значения коэрцитивного поля (коэрцитивной силы) E_k [Вольт/метр], поля насыщения $E_{нас}$ [Вольт/метр], а также остаточную электрическую индукцию $D_{ост}$ (либо, что тоже самое остаточную поляризованность $P_{ост}$) [Кл/м²], спонтанную электрическую индукцию D_s (спонтанную поляризованность P_s) [Кл/м²] и электрическую индукцию насыщения $D_{нас}$ [Кл/м²]. Для расчета этих значений, следует подставлять в формулы (3.2) и (3.3) координаты характерных точек в делениях шкалы осциллографа, найденные экспериментально из кривой гистерезиса рис. 2.3. Отметим, что экстраполируя участок насыщения до пересечения с осью поляризации, т. е. к значению $E=0$, получают значение спонтанной

поляризации P_s . Результаты измерений занести в таблицу 4.

15. Кривая, проведенная через вершины ($E_{\text{НАС}}$; $D_{\text{НАС}}$) либо ($E_{\text{НАС}}$; $P_{\text{НАС}}$) ряда частных петель диэлектрического гистерезиса, практически совпадает с основной кривой поляризации (кривая *0abc* рис. 1.5). Поэтому относительная диэлектрическая проницаемость ϵ сегнетоэлектрика может быть определена через эти максимальные значения $E_{\text{НАС}}$ и $D_{\text{НАС}}$, относящиеся к любой из частных петель гистерезиса, по формуле:

$$\epsilon = \frac{D_{\text{НАС}}}{E_{\text{НАС}} \cdot \epsilon_0} \quad (3.4)$$

16. По формуле (3.4) рассчитать значение относительной диэлектрической проницаемости ϵ для предельной петли гистерезиса, используя найденные в п. 14 значения $E_{\text{НАС}}$ и $D_{\text{НАС}}$. Результаты измерений занести в таблицу 4.
17. Изменяя напряжение с выхода генератора ручкой «АМПЛИТУДА» в пределах 10-150 Вольт установите поочередно другие значения напряжения генератора G (при низкой амплитуде петля гистерезиса практически превращается в эллипс), получите соответствующие им частные петли гистерезиса (не менее 7-9 циклов) и выполните измерения и вычисления аналогично пп. 14-16. При необходимости контролируйте установленное значение напряжение с выхода генератора, отключая его кнопкой «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ». Результаты измерений занести в таблицу 4.

Таблица 4

x_K , дел	$x_{\text{НАС}}$, дел	$y_{\text{ОСТ}}$, дел	y_s , дел	$y_{\text{НАС}}$, дел	E_K , В/м	$E_{\text{НАС}}$, В/м	$D_{\text{ОСТ}}$, Кл/м ²	$D_s \approx P_s$, Кл/м ²	$D_{\text{НАС}}$, Кл/м ²	$\epsilon = \frac{D_{\text{НАС}}}{E_{\text{НАС}} \cdot \epsilon_0}$

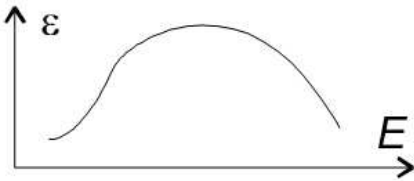
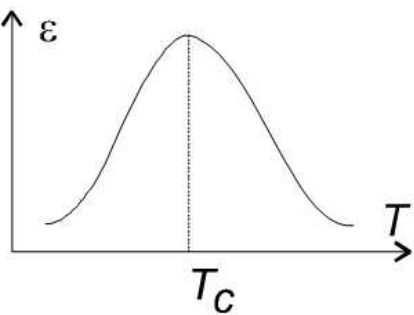
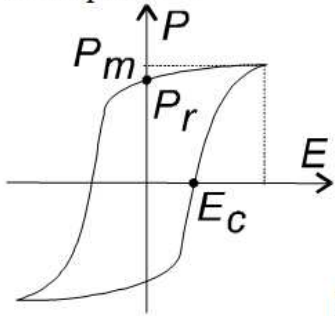
18. Сравните найденные вами значения по порядкам величин с таблицами 1,2. Учтите, что в четвертом столбце таблицы 1, значения P_s приведены в Кл/см². При этом, для получения результата, найденное из столбца значение P_s следует домножить на 10^{-6} , как это указывается в наименовании столбца. Так как вы проводили все расчеты в СИ, то для сравнения результатов переведите [Кл/м²] в [Кл/см²].
19. Постройте график зависимости $P_{\text{НАС}} \approx D_{\text{НАС}} = f(E_{\text{НАС}})$ – основную кривую поляризации сегнетоэлектрика.
20. Установив значение амплитуды генератора G на уровне 140-150 В и, изменяя частоту генератора, наблюдайте за возможным изменением формы петли на различных частотах.
21. По окончании работы поставьте все переключатели в положение «ВЫКЛ» и выньте вилки из розеток.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит явление поляризации диэлектриков? Какой величиной характеризуют поляризационные свойства веществ? Расскажите о доменном характере поляризации сегнетоэлектриков.
2. Дайте определение вектора поляризации. Как он связан с поверхностной плотностью связанных зарядов?
3. В чем физический смысл диэлектрической проницаемости ϵ ?
4. Какими отличительными свойствами обладают сегнетоэлектрики?
5. Каковы Ваши представления о природе спонтанной поляризации сегнетоэлектриков?
6. Как величина диэлектрической проницаемости ϵ сегнетоэлектриков зависит от температуры? Нарисуйте график этой зависимости.
7. В чем состоит явление гистерезиса, наблюдаемое для сегнетоэлектриков? Нарисуйте семейство петель гистерезиса. Что такое предельная петля гистерезиса?
8. Какие параметры сегнетоэлектриков можно определить с помощью петли гистерезиса?
9. Вывести формулу зависимости напряжения на пластинах осциллографа U_y от поляризации P для сегнетоэлектрика, U_x – от напряженности E переменного поля.

ПРИЛОЖЕНИЕ.

Таблица 5 Области использования нелинейных свойств сегнетоэлектрических материалов

Свойства	Применение
<p>Большие значения относительной диэлектрической проницаемости ϵ (10^5 и более)</p>	<p>Малогабаритные конденсаторы с большой удельной емкостью, включая в интегральном исполнении.</p>
<p>Нелинейная зависимость ϵ (E) в сегнетоэлектрической фазе (до T_c)</p> 	<p>Вариконды для стабилизации напряжения, умножения частоты, преобразования синусоидального напряжения в импульсное, для гашения тока.</p>
<p>Нелинейная зависимость ϵ (T)</p> 	<p>Диэлектрические термометры, термоконденсаторы с четко выраженными и размытыми фазовыми переходами для определения физиологических параметров желудочно-кишечного тракта, для стабилизации кварцевых резонаторных электронных часов.</p>
<p>Прямоугольная петля гистерезиса.</p>  <p>Коэффициент прямоугольности: $K_n = \frac{P_r}{P_m} \approx 1$</p>	<p>Запоминающие устройства с потенциальным принципом записи и сохранения информации при отключении питания и многократном считывании.</p>

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.

1. Ч. Киттель, Введение в физику твердого тела, «Наука», М., 1978 г.
2. Р. Фейнман, З. Лейтон, М. Сэндс, Фейнмановские лекции по физике, вып. 5, Электричество и магнетизм, «Мир», М., 1966 г.
3. Ф. Иона и Д. Ширане, Сегнетоэлектрические кристаллы, «Мир», М., 1965 г.
4. И. С. Желудев, Электрические кристаллы, «Наука», М., 1969 г.
5. Д. В. Сивухин. Общий курс физики. Т. 3. Электричество. «Наука», М., 1983 г.
6. Методы физических измерений, под ред. Р.И.Солоухина, Новосибирск, «Наука», Сиб. отд., 1975 г.
7. В. И. Яковлев, Классическая электродинамика, ч.1, РИЦ НГУ, 2003 г.

**ДЛЯ СВОБОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ
НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»**