

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5
ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ

Лабораторная работа разработана профессором Саврухиным А.П.

1. Цель работы.

Изучение поляризации сегнетоэлектриков.

2. Содержание работы.

Снятие основной кривой поляризации диэлектрика, определение ее параметров.

3. Краткие сведения о явлении гистерезиса сегнетоэлектриков.

В данной работе изучается процесс поляризации сегнетоэлектрика ЦТС (цирконат титанат свинца) во внешнем электрическом поле, сопровождающееся явлением гистерезиса (запаздывания) поляризованности.

Диэлектрики это вещества, не имеющие способных свободно перемещаться зарядов, то есть являющиеся изоляторами. Класс сегнетоэлектриков это диэлектрики типа ионных кристаллов с характерной симметрией, особенностью расположения электрических зарядов в кристаллах. В диэлектриках этого типа центры суммарных зарядов противоположных знаков в пределах элементарной ячейки не совпадают, а получающиеся при таком расположении электрические дипольные моменты во всех соседних ячейках параллельны. Совокупность всех построенных таким образом элементарных ячеек, образующих кристалл, делает его макроскопически поляризованным в отсутствие внешнего поля (*спонтанная поляризация*). Кристаллы с указанными свойствами называют *полярными*.

Таковыми являются *сегнетоэлектрики* – вещества, которые в некотором интервале температур (в *полярных областях*) в отсутствие внешнего поля имеют области самопроизвольной поляризации – *домены*. На границе полярных областей сегнетоэлектрики испытывают фазовые превращения, переходя в другие кристаллические модификации, в которых спонтанная поляризация не наблюдается.

Кристаллическая модификация, в которой сегнетоэлектрик спонтанно поляризован, называется *полярной фазой*, а модификация, в которой поляризации нет — неполярной. Температура, при которой сегнетоэлектрики переходят из полярной фазы в неполярную, называется *точкой Кюри*.

В сегнетоэлектриках в пределах каждого домена дипольные моменты всех элементарных ячеек ориентированы одинаково; в соседних доменах направления спонтанной поляризации отличаются друг от друга, так что геометрическая сумма электрических моментов всего кристалла в целом равна нулю. Деление на домены оказывается для кристалла энергетически выгодным, так как при этом полная энергия достигает минимума, и спонтанно поляризованный сегнетоэлектрик в полярной области температур обладает большой (в термодинамическом отношении) устойчивостью.

Следствием существования областей спонтанной поляризации в сегнетоэлектриках является наличие у них свойств, аналогичных свойствам ферромагнетиков: большие значения диэлектрической проницаемости ϵ ,

характерная кривая зависимости диэлектрической проницаемости от температуры с резким пиком в точке Кюри и гистерезис в зависимости электрической индукции \mathbf{D} и поляризованности \mathbf{P} сегнетоэлектрика от напряженности поля \mathbf{E} в области существования полярной фазы (рис. 1).

Электрическое поле в диэлектрике неоднородно, оно максимально у концов молекул (диполей), поэтому напряженность поля \mathbf{E} берётся усреднённой. Если напряженность \mathbf{E} есть интенсивность поля, то численно *электрическая индукция* $\mathbf{D}=\epsilon_0\mathbf{E}$, ($\epsilon_0=8.854\cdot 10^{-12}\text{Гн/м}$ -электрическая постоянная) есть силовая характеристика электрического поля в вакууме.

Изменение свойств при переходе через точку Кюри происходит вследствие изменения кристаллической структуры сегнетоэлектрика: в ЦТС выше точки Кюри имеет место кубическая решетка, ниже — тетрагональная. Изучаемое фазовое превращение ЦТС является фазовым превращением второго рода (или близким к нему переходом первого рода).

При внесении в электрическое поле сегнетоэлектрик поляризуется. Электрическая индукция \mathbf{D} сегнетоэлектрика складывается из трех векторных составляющих:

$$\mathbf{D}=\epsilon_0\mathbf{E} + \mathbf{P} + \mathbf{P}_0 \quad (1)$$

где \mathbf{E} — среднее макроскопическое поле в сегнетоэлектрике; \mathbf{P} — средний индуцированный электрический момент единицы объема (*индуцированная поляризованность*), обусловленный поляризацией ионного смещения и смещения электронных оболочек и пропорциональный напряженности электрического поля (в слабых полях); \mathbf{P}_0 — электрический момент спонтанной поляризации (*спонтанная поляризованность*). Векторы \mathbf{E} и \mathbf{P} имеют одинаковое направление, а вектор \mathbf{P}_0 в общем случае может иметь другое направление. В случае, если вектора \mathbf{P} и \mathbf{P}_0 пропорциональны вектору \mathbf{E} напряженности электрического поля, относительная диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика ϵ , обусловленная и поляризацией, вызываемой внешним полем, и спонтанной поляризацией, равна отношению $\epsilon=\mathbf{D}/\epsilon_0\mathbf{E}$. Тогда из уравнения (1) получаем

$$\epsilon=1+\mathbf{P}/\epsilon_0\mathbf{E} +\mathbf{P}_{0E}/\epsilon_0\mathbf{E} \quad (2)$$

Здесь \mathbf{P}_{0E} — проекция \mathbf{P}_0 на направление поля \mathbf{E}_0 .

С увеличением внешнего поля полный электрический момент единицы объема \mathbf{P}_n увеличивается по двум причинам: во-первых, в результате роста электрического момента индуцированной поляризации \mathbf{P} ; во-вторых, вследствие возрастания числа доменов, направление электрического момента спонтанной поляризации которых совпадает с направлением внешнего поля или образует с ним острые углы, т.е. роста \mathbf{P}_0 . Электрический момент

единицы объема $P_{\text{п}}$ возрастает до некоего предельного значения, соответствующего состоянию, когда дипольные моменты всех доменов будут сориентированы вдоль поля E (эффект насыщения спонтанной поляризации). В дальнейшем рост $P_{\text{п}}$ будет происходить только за счет индуцированной поляризации.

Поляризация сегнетоэлектрика во внешнем электрическом поле имеет гистерезисный характер. Сущность гистерезиса заключается в том, что индукция и поляризованность сегнетоэлектрика определяются не только значением напряженности поля, но и предшествовавшими состояниями поляризации. При первичном увеличении внешнего электрического поля от 0 до $+E_0$ поляризованность нарастает нелинейно (ветвь OS на рис. 1). При дальнейшем изменении поля от $+E_0$ до $-E_0$ и обратно, поляризованность (как и индукция) в сегнетоэлектрике описывает замкнутую кривую, называемую петлей гистерезиса (рис. 1).

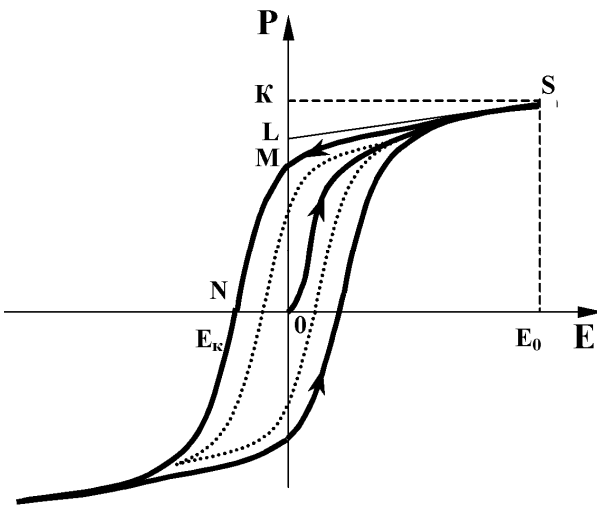


Рис. 1. Петля гистерезиса поляризованности сегнетоэлектрика.

В общем случае и спонтанный, и индуцированный дипольные моменты единицы объема сегнетоэлектрика являются нелинейными функциями напряженности поля. Однако в области используемых в эксперименте не очень сильных полей индуцированный дипольный момент пропорционален напряженности поля. Тогда полную поляризованность $P_{\text{п}}$ (отрезок OK на рис. 1), вызываемую полем E_0 , можно разделить на две составляющие. Для этого экстраполируют ветвь насыщения петли гистерезиса (рис.

1) к значению поля, равному нулю. Отрезок KL при этом соответствует индуцированной поляризованности P , отрезок LO — спонтанной поляризованности $P_{\text{осп}}$, отрезок OM — остаточной поляризованности $P_{\text{ост}}$, а ON — напряженности коэрцитивного поля (коэрцитивной силе) E_K . При значениях поля $\pm E_0$, меньших поля насыщения, формируются петли гистерезиса меньших размеров, вершины которых лежат на линии OS (рис. 1). Для этих петель можно определить лишь значения полной поляризованности $P_{\text{п}}$.

Гистерезис можно наблюдать, подводя к образцу сегнетоэлектрика с металлизированными поверхностями (сегнетоконденсатору) переменное напряжение, при этом значения $\pm E_0$ будут соответствовать амплитудам переменного сигнала.

В данной работе исследуются диэлектрические свойства ЦТС (цирконат титанат свинца), который относится к группе сегнетоэлектриков, широко применяемых в технике и представляющих большой научный интерес.

4. Описание измерительной установки и методика измерений.

Исследование гистерезиса поляризованности образца ЦТС во внешнем электрическом поле производится с помощью схемы, представленной на рис. 2.

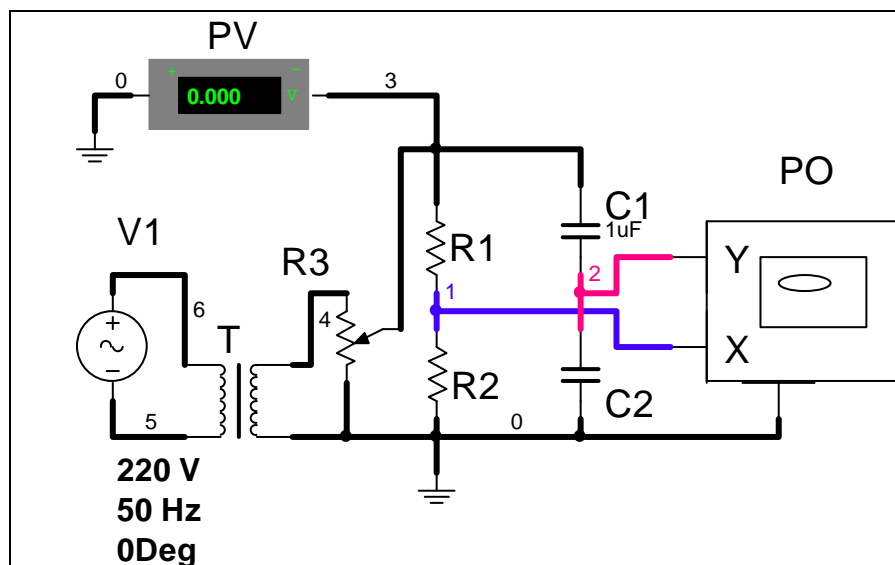


Рис. 2. Электрическая схема установки для изучения поляризации сегнетоэлектриков

Напряжение от генератора переменного напряжения V_1 подается на вход трансформатора T , выход которого подключён к потенциометру R_3 , а с него — на делитель напряжения, состоящий из сопротивлений $R_1=7\text{МОм}$ и $R_2=660\text{ кОм}$. Параллельно делителю включены два последовательно соединенных конденсатора: сегнетоконденсатор (исследуемый образец C_1) и эталонный конденсатор $C_2=0.22\text{ мкФ}$, причем $C_2 \gg C_1$.

Горизонтальные отклонения электронного луча на экране осциллографа пропорциональны напряжению U_{C_1} , приложенному к исследуемому образцу. Вертикальные отклонения пропорциональны напряжению на эталонном конденсаторе C_2 , которое, в свою очередь, пропорционально заряду Q_{C_2} на пластинах этого конденсатора, равного и заряду Q_{C_1} на сегнетоконденсаторе:

$$U_{C2} = Q_{C2}/C2 = Q_{C1}/C1 \quad (3)$$

Образец представляет собой плоскопараллельный диск диаметром 8 мм и толщиной 0.1 мм, образованный путём спекания порошков, содержащих цирконий, титан и свинец, с посеребрёнными поверхностями, называемый сегнетоконденсатором.

При полном цикле переменного напряжения электронный луч опишет замкнутую кривую зависимости заряда на конденсаторе от приложенного к нему напряжения. Эта кривая и представляет собой петлю гистерезиса. Поскольку заряд на пластинах эталонного конденсатора, точнее – поверхностная плотность заряда, определяет величину индукции D или, что практически то же самое при $\epsilon \gg 1$, поляризованность образца, то наблюдаемая на экране кривая изображает и зависимость индукции $D(E)$, и зависимость поляризованности $P(E)$ от напряженности поля (в соответствующих единицах измерения величин E и D).

Электрическая схема для изучения гистерезиса смонтирована на специальной панели, которая изображена на рис. 3.

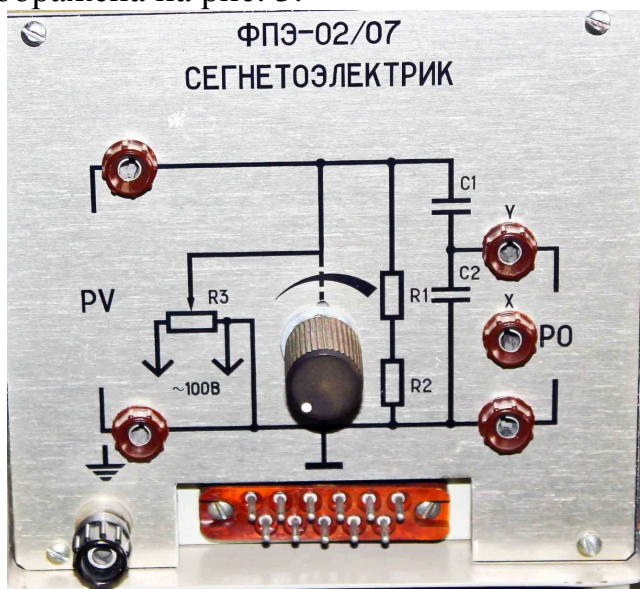


Рис. 3. Внешняя панель измерительного устройства.

Напряжение с трансформатора T подается с блока питания по кабелю на нижний разъём панели. К клеммам на панели подключаются соответствующие входы осциллографа. Напряжение можно изменять вращением ручки (в центре), приводящей в движение ползунок потенциометра $R3$.

5. Приборы для выполнения работы.

Источник питания, модуль ФПЭ-07, осциллограф, вольтметр, соединительные провода.

6. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений.

1.-Присоединить к блоку «ФЭП – 02/07 сегнетоэлектрик» блок питания, осциллограф, вольтметр.

-Установить ручку "РЕГ" на блоке в крайнее левое положение.

-Включить аппаратуру, получить на экране осциллографа точку (развёртка выключена, усиление установить 5v/дел); вольтметр включён на предел 200 V

-Увеличивая напряжение ручкой "РЕГ" наблюдать на экране осциллографа петлю гистерезиса при различных напряжениях.

-Для того, чтобы по наблюдаемой на экране осциллографа петле гистерезиса произвести расчёт некоторых величин, последнюю необходимо скопировать на миллиметровую бумагу, используя координатный метод, или полупрозрачную бумагу. Копировать петли следует при напряжениях на образце 30, 35, 40, 50, 60 и 70 В.

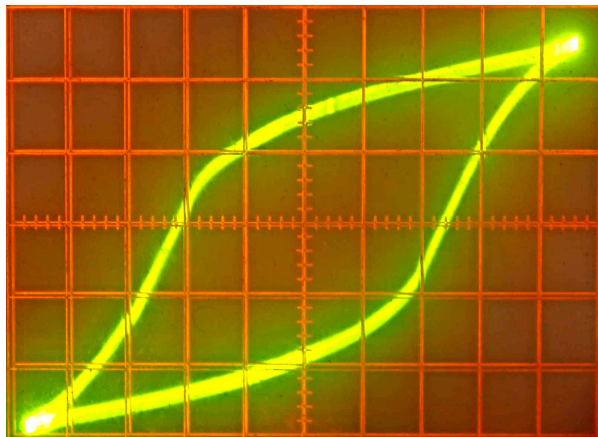


Рис. 4. Петля гистерезиса. Фото с экрана осциллографа.

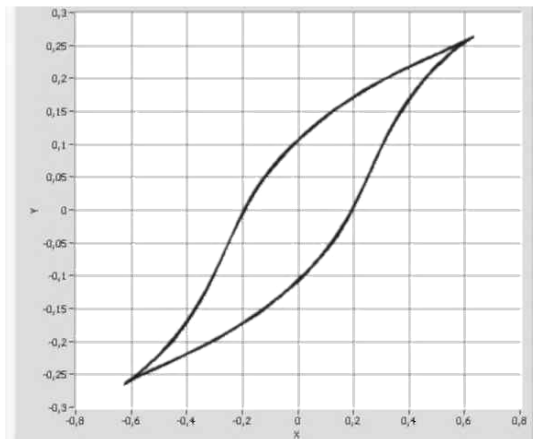


Рис. 5. Петля гистерезиса. Фото с экрана компьютера.

2.Определение тангенса угла диэлектрических потерь.

Вычислить по формуле (4) тангенс угла диэлектрических потерь при шести напряжениях на образце.

$$\operatorname{tg}(\delta)=S_{\text{гис}}/\pi x_0 y_0 \quad (4)$$

Здесь $S_{\text{гис}}$ –площадь кривой петли гистерезиса, x_0 и y_0 – координаты вершины петли гистерезиса.

3.Определение параметров предельной петли гистерезиса.

Значения параметров, необходимые для расчетов: площадь $S_{\text{сегн}}=0.64 \text{ мм}^2$, $d=0.1 \text{ мм}$ – толщина образца сегнетоконденсатора, $C2=0.22\text{мкФ}$.

Установить петлю гистерезиса предельного цикла симметрично относительно осей X и Y; определить масштабы по осям.

По оси X: напряжение на образце равно разности напряжений $U_{C1}=U_{PV} - U_{PO}$, тогда предельная напряжённость электрического поля на образце будет равна $E_0= U_{C1}/d$, коэрцитивная сила $E_K= E_0x_K/x_0$, где x_K/x_0 это отношение числа клеточек по оси X в сторону E_K и E_0 .

По оси Y: рассчитайте $P_{\text{полн}}= U_{PO}C^2/S$, определите масштаб по оси Y $m_y= P_{\text{полн}}/u_K$, где u_K - число клеточек в отрезке ОК, измерив координаты точек OM, OL рассчитайте величины P, P_o и P_{ост}.

7. Вопросы для самопроверки

1. Диэлектрики полярные и неполярные.
2. Что такое поляризация диэлектриков?
3. Сегнетоэлектрические материалы и их отличие от обычных линейных диэлектриков. Что такое домены?
4. В чем заключается поляризация диэлектриков? Какая величина является количественной характеристикой поляризации?
5. Опишите основные свойства сегнетоэлектриков.
6. Диэлектрический гистерезис. Сущность и причины, вызывающие его. Явление насыщения.
7. Виды поляризации в сегнетоэлектриках.

8. Литература

1. Савельев И.В. Курс физики, кн.2. Электричество и магнетизм. – М.: Высшая школа, 2003.
2. Калашников С.Г. Электричество. - М.: Наука, 2004.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики.Т.3. Электричество -М.:ФИЗМАТЛИТ; Изд. МИФИ, 2002.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2006.