

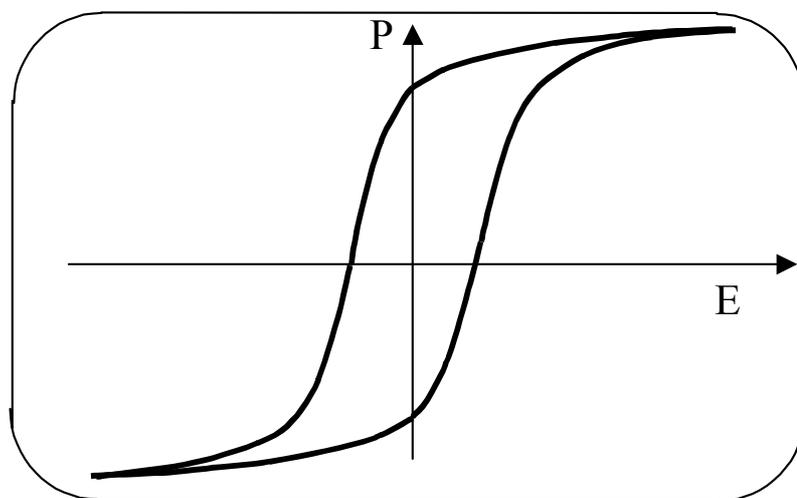


**Московский государственный университет им.
М.В.Ломоносова**

Лабораторный практикум по общей физике

Электричество и магнетизм

Изучение сегнетоэлектриков



МОСКВА 2008

Изучение сегнетоэлектриков

В данной работе исследуются диэлектрические свойства сегнетовой соли.

Введение

Сегнетоэлектрики относятся к классу ионных кристаллов, а электрические свойства кристаллов тесно связаны с их симметрией. Симметрия характеризует особенности расположения электрических зарядов в кристаллах. Можно выделить три типа этого расположения для диэлектриков.

В первом из них расположение положительных и отрицательных зарядов является центросимметричным, т.е. центры суммарных зарядов каждого знака совпадают друг с другом. В пределах одной элементарной ячейки такое совпадение означает, что эти центры совпадают с центром ячейки. Такие кристаллы называются *неполярными*.

В диэлектриках второго 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). Такие кристаллы называют *полярными*.

В диэлектриках третьего типа центры суммарных положительных и отрицательных зарядов совпадают, но распределение зарядов каждого знака не является центросимметричным. Отсутствие центросимметричности в распределении зарядов каждого знака разрешает наличие полярных направлений, однако, геометрическая сумма всех дипольных моментов оказывается равной нулю. Такие кристаллы называют *полярно-нейтральными*.

Примером полярных диэлектриков служат *сегнетоэлектрики* – вещества, которые ниже некоторой температуры (или в некотором интервале температур) в отсутствие внешнего поля имеют области спонтанной (самопроизвольной) поляризации – домены. Соответствующие интервалы температур называются *полярными областями*. На границе таких 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, характерная кривая зависимости диэлектрической проницаемости от температуры с резким пиком в точке Кюри (t_k) и гистерезис в зависимости электрической индукции и поляризованности сегнетоэлектрика от напряженности поля в области существования полярной фазы (рис. 1).

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

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} + \vec{P}_0, \quad (1)$$

где \vec{E} — среднее макроскопическое поле в сегнетоэлектрике; \vec{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); \vec{P}_0 — электрический момент спонтанной поляризации (спонтанная поляризованность). Векторы \vec{E} и \vec{P} имеют одинаковое направление, а вектор \vec{P}_0 в общем случае может иметь другое направление. В случае, если вектора \vec{P} и \vec{P}_0 пропорциональны вектору напряженности электрического поля \vec{E} , полная диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика, обусловленная и поляризацией, вызываемой внешним полем, и спонтанной поляризацией, равна отношению

$$\varepsilon = \frac{D}{\varepsilon_0 E}.$$

Тогда из уравнения (1) получаем

$$\varepsilon = 1 + \frac{P}{\varepsilon_0 E} + \frac{P_{0E}}{\varepsilon_0 E}. \quad (2)$$

Здесь P_{0E} — проекция \vec{P}_0 на направление поля \vec{E} .

В общем случае, когда P_{0E} и \vec{P} не пропорциональны напряженности поля, можно определить лишь так называемую дифференциальную диэлектрическую проницаемость:

$$\varepsilon = 1 + \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{\partial P}{\partial E} + \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{\partial P_{0E}}{\partial E} \quad (3)$$

С увеличением внешнего поля полный электрический момент единицы объема $\vec{P}_{\text{полн}}$ увеличивается по двум причинам: во-первых, в результате роста электрического момента индуцированной поляризации \vec{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 \vec{P}_0 . \vec{P}_0 возрастает до некоего предельного значения, соответствующего ситуации, когда дипольные моменты всех доменов будут сориентированы вдоль поля \vec{E} (эффект насыщения спонтанной поляризации). В дальнейшем рост $\vec{P}_{\text{полн}}$ 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).

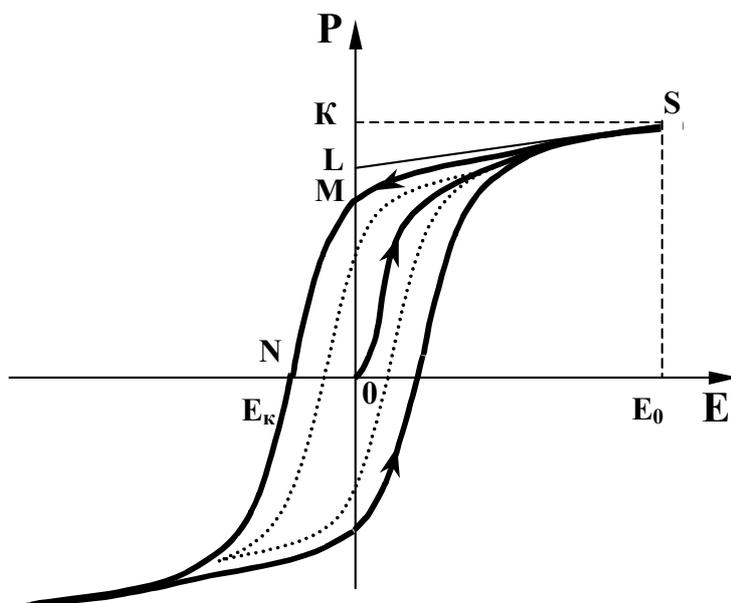


Рис. 1. Петля гистерезиса поляризованности сегнетоэлектрика.

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 $P_{полн}$ (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_0 , Отрезок OM — остаточной поляризованности $P_{ост}$, 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 $P_{полн}$.

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 изучается процесс поляризации сегнетовой соли во внешнем электрическом поле (явление гистерезиса поляризованности), а также исследуется температурная зависимость петли гистерезиса сегнетовой соли в области температур, включающей верхнюю точку Кюри.

Упражнение 1. Изучение явления гистерезиса в сегнетовой соли.

Образец представляет собой плоскопараллельную пластинку сегнетовой соли с металлизированными поверхностями, называемую сегнетоконденсатором.

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

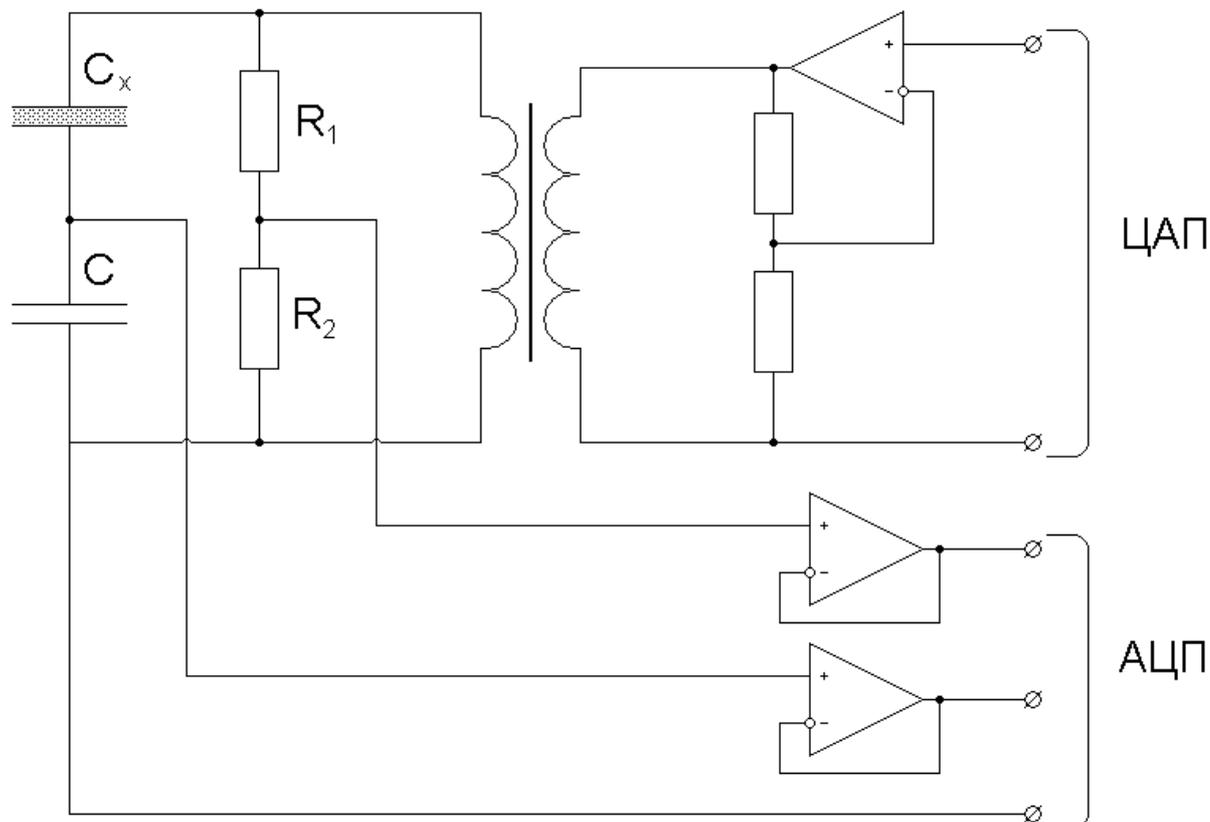


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

Напряжение от цифро-аналогового преобразователя подается на вход повышающего трансформатора, а с него — на делитель напряжения, состоящий из сопротивлений R_1 , R и R_2 . Параллельно делителю включены два последовательно соединенных конденсатора: сегнетоконденсатор с исследуемым образцом C_x и эталонный конденсатор C , причем $C \gg C_x$. Из анализа схемы можно понять, что на АЦП поступает напряжение, пропорциональное напряжению U_x , приложенному к исследуемому образцу, и напряжение на эталонном конденсаторе C , которое, в свою очередь, пропорционально заряду Q на пластинах этого конденсатора, равному и заряду Q_x на сегнетоконденсаторе:

$$U_c = \frac{Q}{C} = \frac{Q_x}{C} \quad (4)$$

При полном цикле переменного напряжения на АЦП поступят данные о зависимости заряда конденсатора от приложенного к нему напряжения $Q_x = f(U_x)$. Зависимость будет отображена на экране монитора. 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 P , 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).

Для нагрева и охлаждения образца предусмотрены нагреватель и вентилятор. Для измерения температуры образца предусмотрен температурный датчик.

Для наблюдения петель гистерезиса на экране монитора подключить экспериментальную установку с компьютером при помощи устройства сопряжения, подключить мультиметр к разъему температурного датчика, установить режим мультиметра «ТЕМР», включить экспериментальную установку и устройство сопряжения в сеть 220 В и запустить программу для управления установкой.

Установить амплитуду напряжения на образце при помощи «ручки» на экране монитора. Примерное значение амплитуды напряжения на образце можно увидеть в окне над «ручкой».

Для снятия данных о напряжении и заряде на образце нажать кнопку «эксперимент».

Меняя амплитуду напряжения на образце от 0 до максимально возможного в данной установке, т.е. увеличивая напряжение на образце, провести наблюдение за изменением вида и размеров петель гистерезиса и отрезков, характеризующих величины полной поляризованности $P_{полн}$, остаточной поляризованности, коэрцитивного напряжения. Для получения напряжения и заряда на образце необходимо подвести курсор мыши к исследуемой точке. В нижней части окна программы появятся измеренные значения.

Для нескольких (не менее 7) наблюдаемых петель определить величину полной поляризованности и соответствующую ей напряженность электрического поля в образце. Для этого необходимо измерить отрезки, равные координатам крайних точек петель (OK и OE_0 , соответственно). Для одновременного отображения всех петель необходимо перейти на вкладку «обработка».

Определить величину максимальной напряженности электрического поля E в образце, при которой петля гистерезиса еще не наблюдается, т.е. когда $P \sim E$; а также и значение $P_{полн}$ при этом поле.

Величина поляризованности находится по формуле

$$P = \sigma = \frac{Q_x}{S} = \frac{Q}{S},$$

где σ — поверхностная плотность поляризационных зарядов, S — площадь пластин сегнетоконденсатора, U_C — напряжение на входе «Y» осциллографа, B — чувствительность входа «Y» осциллографа, n — число делений, на которые отклонился луч по вертикали.

Напряженность электрического поля в образце определяется по формуле

$$E = \frac{U_x}{d},$$

где d — толщина образца, A — постоянная установки, приведенная в приложении к описанию, m — число делений, на которое отклонился луч по горизонтали.

Результаты измерений и расчетов занести в таблицу.

N	U_x , В	E , В/м	$Q_x = B$, Кл	P , Кл/м ²
1				
2				
.				

Построить график зависимости $P_{полн.}(E)$. Объяснить процессы, происходящие в сегнетоэлектрике во время поляризации.

Упражнение 2. Изучение зависимости петли гистерезиса сегнетовой соли от температуры

В той же установке допускается наблюдение петли гистерезиса при изменении температуры. Установить максимальную амплитуду напряжения на образце. Включить нагреватель. Контролируя температуру образца при помощи мультиметра, получить петли гистерезиса при разных температурах с шагом в 1 градус Цельсия. Доведя температуру образца до 30 градусов Цельсия, отключить нагреватель и включить вентилятор. Контролируя температуру образца при помощи мультиметра, получить петли гистерезиса при разных температурах с шагом в 1 градус Цельсия.

N	$T, ^\circ C$	$U_X, В$	$E, В/м$	$Q_X, Кл$	$P, Кл/м^2$
1					
2					
.					

Построить график зависимости $P_{полн.}(T)$.

Литература

1. Калашников С.Г. Электричество. М. 2004.
2. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. М. 2005.