

Лабораторная работа 3.06

Изучение электрических свойств сегнетоэлектриков

Цель работы

1. Определение значений электрического смещения насыщения D_s , остаточной поляризации P_r , коэрцитивной силы E_c для предельной петли гистерезиса сегнетоэлектрика.
2. Расчет диэлектрических потерь за цикл переполяризации сегнетоэлектрика.
3. Получение зависимостей смещения D и диэлектрической проницаемости ε от напряженности электрического поля E .
4. Определение значений начальной и максимальной диэлектрической проницаемости.

Введение

Как известно, молекулы диэлектриков по своим электрическим свойствам эквивалентны электрическим диполям и могут обладать электрическим моментом

$$\vec{P}_e = q\vec{\ell}, \quad (1)$$

где q - абсолютная величина суммарного заряда одного знака в молекуле (т.е. заряда всех ядер или всех электронов); $\vec{\ell}$ - вектор, проведенный из «центра тяжести» отрицательных зарядов электронов в «центр тяжести» положительных зарядов ядер (плечо диполя).

Поляризация диэлектриков обычно описывается на основе представлений о жестких и индуцированных диполях. Внешнее электрическое поле либо упорядочивает ориентацию жестких диполей (ориентационная поляризация в диэлектриках с полярными молекулами), либо приводит к появлению полностью упорядоченных

индуцированных диполей (поляризация электронного и ионного смещения в диэлектриках с неполярными молекулами). Во всех этих случаях диэлектрики поляризуются.

Поляризация диэлектрика заключается в том, что под действием внешнего электрического поля суммарный электрический момент молекул диэлектрика становится отличным от нуля.

Количественной характеристикой поляризации диэлектрика служит вектор поляризованности (или вектор поляризации), который равен электрическому моменту единицы объема диэлектрика:

$$\vec{P} = \frac{\sum_{\Delta V} \vec{P}_e}{\Delta V}, \quad (2)$$

где $\sum_{\Delta V} \vec{P}_e$ - векторная сумма дипольных электрических моментов всех молекул диэлектрика в физически малом объеме ΔV .

У изотропных диэлектриков поляризованность \vec{P} связана с напряженностью электрического поля \vec{E} в той же точке соотношением

$$\vec{P} = \chi_e \varepsilon_0 \vec{E}, \quad (3)$$

где χ_e - коэффициент, не зависящий в первом приближении от \vec{E} и называемый диэлектрической восприимчивостью вещества; $\varepsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ - электрическая постоянная.

Для описания электрического поля в диэлектриках, кроме напряженности \vec{E} и поляризованности \vec{P} , используют вектор электрического смещения \vec{D} , определяемый равенством

$$\vec{D} = \vec{P} + \varepsilon_0 \vec{E}, \quad (4)$$

С учетом (3) вектор смещения можно представить в виде

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}, \quad (5)$$

где $\varepsilon = 1 + \chi_e$ - безразмерная величина, называемая диэлектрической проницаемостью среды. Для всех диэлектриков $\chi_e > 0$, а $\varepsilon > 1$.

Сегнетоэлектрики представляют собой особую группу кристаллических диэлектриков, обладающих в отсутствие внешнего электрического поля в определенном интервале температур и давлений спонтанной (самопроизвольной) поляризацией, направление которой может быть изменено электрическим полем и, в ряде случаев, механическими напряжениями.

Сегнетоэлектрики применяются для изготовления конденсаторов большой емкости, но малых размеров, для создания различных нелинейных элементов. Во многих радиотехнических устройствах используются вариконды — сегнетоэлектрические конденсаторы с резко выраженными нелинейными свойствами: емкость таких конденсаторов сильно зависит от величины приложенного к ним напряжения. Вариконды характеризуются высокой механической прочностью, устойчивостью к вибрации, тряске, влаге. Недостатки варикондов — ограниченный диапазон рабочих частот и температур, высокие значения диэлектрических потерь.

В отличие от обычных диэлектриков сегнетоэлектрики обладают рядом характерных свойств, которые были изучены советскими физиками И.В.Курчатовым и П.П.Кобеко. Рассмотрим основные свойства сегнетоэлектриков.

Сегнетоэлектрики характеризуются очень высокими значениями диэлектрической проницаемости ϵ , которая может достигать величин порядка $10^3 \div 10^6$. Например, диэлектрическая проницаемость сегнетовой соли $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ при комнатной температуре (20°C) близка к 10000.

Всем сегнетоэлектрикам свойственно явление диэлектрического гистерезиса, заключающееся в запаздывании изменения поляризованности P и смещения D при изменении напряженности поля E . Это запаздывание связано с тем, что величины P и D не только определяются текущим значением поля E , но и зависят еще от предшествовавшего состояния поляризации образца. При циклических изменениях напряженности поля E зависимость P и смещения D от E выражается кривой, называемой петлей гистерезиса.

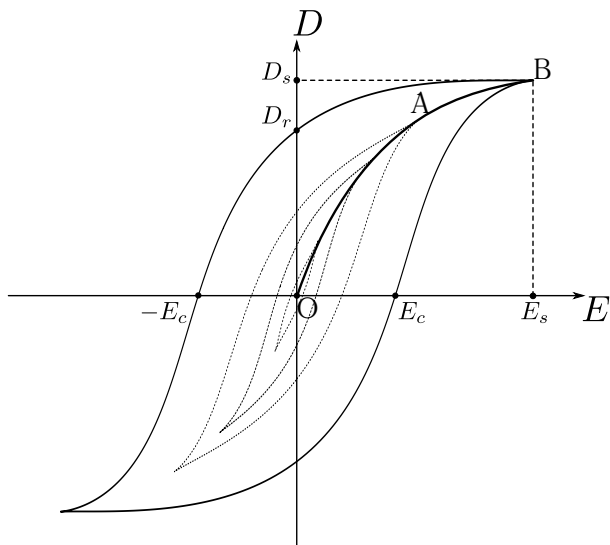


Рис. 1. Петля гистерезиса сегнетоэлектрика

На рис.1 представлена петля гистерезиса в координатах $\{D; E\}$. С увеличением поля E смещение D в образце, который первоначально не был поляризован, изменяется по кривой OAB . Эта кривая называется начальной или основной кривой поляризации. С уменьшением поля сегнетоэлектрик ведет себя сначала как обычный диэлектрик (на участке OA гистерезис отсутствует), а затем (от точки A) изменение смещения отстает от изменения напряженности. Когда напряженность поля равна нулю, сегнетоэлектрик остается поляризованным и величина D_r характеризует остаточную поляризацию.

Для снятия остаточной поляризации к сегнетоэлектрику необходимо приложить электрическое поле противоположного направления с напряженностью E_c . Величину E_c называют коэрцитивным полем.

Если максимальное значение напряженности поля таково, что спонтанная поляризация достигает насыщения, то получается петля гистерезиса, называемая петлей предельного цикла (сплошная кривая на рис.1).

Если же при максимальной напряженности поля насыщение не достигается, то получается так называемая петля частного цикла, лежащая внутри предельного цикла (пунктирные кривые на рис.1). Частных циклов переполяризации может существовать бесконечное множество, но при этом максимальные значения поляризации P частных циклов всегда лежат на основной кривой поляризации OAB .

Сегнетоэлектрические свойства сильно зависят от температуры. Для каждого сегнетоэлектрика существует такая температура T_c , выше которой его сегнетоэлектрические свойства исчезают и он превращается в обычный диэлектрик. Температура T_c называется точкой Кюри. В частности, для титаната бария $BaTiO_3$ точка Кюри равна $+120^\circ C$. Некоторые сегнетоэлектрики имеют две точки Кюри (верхнюю и нижнюю) и ведут себя как сегнетоэлектрики лишь в температурном интервале между этими точками. К числу таковых относится сегнетова соль, для которой точки Кюри равны $+24^\circ C$ и $-18^\circ C$.

Все характерные свойства сегнетоэлектриков связаны с существованием у них спонтанной поляризации. Спонтанная поляризация есть следствие собственной асимметрии элементарной ячейки кристалла, приводящей к появлению у нее дипольного электрического момента. В результате взаимодействия между отдельными поляризованными ячейками они располагаются так, что их электрические моменты ориентированы параллельно друг другу. Ориентация электрических моментов многих ячеек в одном направлении приводит к образованию областей спонтанной поляризации, называемых доменами. Очевидно, что каждый домен поляризован до насыщения. Линейные размеры доменов, как правило, не превышают 10^{-6} м.

В отсутствие внешнего электрического поля поляризованность всех доменов различна по направлению, поэтому в целом кристалл оказывается неполяризованным. Это иллюстрирует рис.2 (а), где схематически изображены домены образца, стрелками показаны направления спонтанной поляризации различных доменов. Под влиянием внешнего электрического поля в многодоменном

кристалле происходит переориентация спонтанной поляризации. Этот процесс осуществляется:

- смещением доменных стенок (домены, поляризованность которых составляет острый угол θ с внешним полем, растут за счет доменов у которых $\theta \geq \frac{\pi}{2}$;
- поворотом электрических моментов доменов в направлении внешнего поля;
- образованием и прорастанием зародышей новых доменов, электрические моменты которых направлены по полю.

Перестройка доменной структуры, происходящая при наложении и увеличении внешнего электрического поля, приводит к появлению и росту суммарной поляризованности P кристалла (нелинейный участок OA на рис.1). При этом вклад в суммарную поляризованность P , помимо спонтанной поляризации, вносит также и индуцированная поляризация электронного и ионного смещения, т.е. $P = P_s + P_i$.

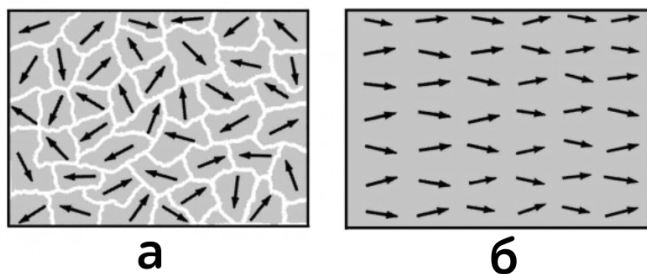


Рис. 2. Схематическая модель структуры доменов сегнетоэлектриков

При некоторой напряженности поля (в точке A) во всем кристалле устанавливается единое направление спонтанной поляризации, совпадающее с направлением поля (рис. 2 (б)). Говорят, что кристалл становится однодоменным с направлением спонтанной поляризации, параллельным полю. Это состояние называется насыщением. Увеличение напряженности поля E по достижении

насыщения сопровождается дальнейшим ростом общей поляризованности P кристалла, но теперь уже только за счет индуцированной поляризации (участок AB на рис.1). При этом поляризованность P и смещение D практически линейно зависят от E . Экстраполируя линейный участок AB на ось ординат, можно оценить спонтанную поляризацию насыщения P_s , которая приблизительно равна значению, отсекаемому экстраполированным участком на оси ординат: $P_s \approx D_s$. Это приблизительное равенство вытекает из того, что для большинства сегнетоэлектриков $\varepsilon_0 E \ll P$ и $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \approx \vec{P}$.

Как отмечалось выше, в точке Кюри при нагревании сегнетоэлектрика исчезают его особые свойства и он превращается в обычный диэлектрик. Это объясняется тем, что при температуре Кюри происходит фазовый переход сегнетоэлектрика из полярной фазы, характеризующейся наличием спонтанной поляризации, в неполярную, в которой спонтанная поляризация отсутствует. При этом изменяется симметрия кристаллической решетки. Полярная фаза часто называется *сегнетоэлектрической*, а неполярная — *параэлектрической*.

В заключение обсудим вопрос о диэлектрических потерях в сегнетоэлектриках вследствие гистерезиса.

Потери энергии в диэлектриках, находящихся в переменном электрическом поле, называемые диэлектрическими, могут быть связаны со следующими явлениями:

- отставанием во времени поляризованности P от напряженности поля E из-за молекулярно-теплового движения;
- наличием небольших токов проводимости;
- явлением диэлектрического гистерезиса.

Во всех этих случаях происходит необратимое преобразование электрической энергии в теплоту.

Диэлектрические потери приводят к тому, что на участке цепи переменного тока, содержащем конденсатор, сдвиг по фазе между колебаниями тока и напряжения никогда не бывает точно равным $\frac{\pi}{2}$, а всегда оказывается меньше, чем $\frac{\pi}{2}$, на угол δ , на-

зываемый углом потерь. Диэлектрические потери в конденсаторах оцениваются тангенсом угла потерь:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{R}{X_c}, \quad (6)$$

где X_c - реактивное сопротивление конденсатора; R - сопротивление потерь в конденсаторе, определяемое из условия: мощность, выделяемая на этом сопротивлении при прохождении по нему переменного тока, равна мощности потерь в конденсаторе.

Тангенс угла потерь есть величина, обратная добротности Q : $\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{Q}$, и для его определения, наряду с (6), может быть использовано выражение

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W}, \quad (7)$$

где ΔW - потери энергии за период колебаний (в элементе цепи или во всей цепи); W - энергия колебаний (максимальная для элемента цепи и полная для всей цепи).

Воспользуемся формулой (7) для оценки потерь энергии, вызванных диэлектрическим гистерезисом. Эти потери, как и сам гистерезис, есть следствие необратимого характера процессов, ответственных за переориентацию спонтанной поляризации. Перепишем (7) в виде

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{2\pi} \frac{w_r}{w_0}, \quad (8)$$

где w_r - потери энергии переменного электрического поля на диэлектрический гистерезис в единице объема сегнетоэлектрика за время одного периода; w_0 - максимальная плотность энергии электрического поля в кристалле сегнетоэлектрика.

Так как объемная плотность энергии электрического поля равна

$$w = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2}, \quad (9)$$

то при увеличении напряженности поля на dE она соответственно изменяется на $dw = \varepsilon \varepsilon_0 E dE = D dE$. Эта энергия затрачивается

на переполяризацию единицы объема сегнетоэлектрика и идет на увеличение его внутренней энергии, т.е. на его нагрев. Очевидно, что за один полный период величина диэлектрических потерь в единице объема сегнетоэлектрика определяется как

$$w_r = \oint DdE, \quad (10)$$

и численно равна площади петли гистерезиса в координатах $\{D; E\}$. Максимальная плотность энергии электрического поля в кристалле составляет:

$$w_0 = \frac{E_s D_s}{2}, \quad (11)$$

где E_s и D_s - амплитуды напряженности и смещения электрического поля, соответственно.

Подставляя (10) и (11) в (8), получим следующее выражение для тангенса угла диэлектрических потерь в сегнетоэлектриках:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\pi} \frac{\oint DdE}{D_s E_s}. \quad (12)$$

Лабораторная установка

Общий вид лабораторной установки показан на рис.3. Она состоит из рабочей части «Стенд СЗ-РМ02. Петля гистерезиса сегнетоэлектрика» с объектом исследования и измерительного прибора «ИСХ1» (Измеритель Статических Характеристики).

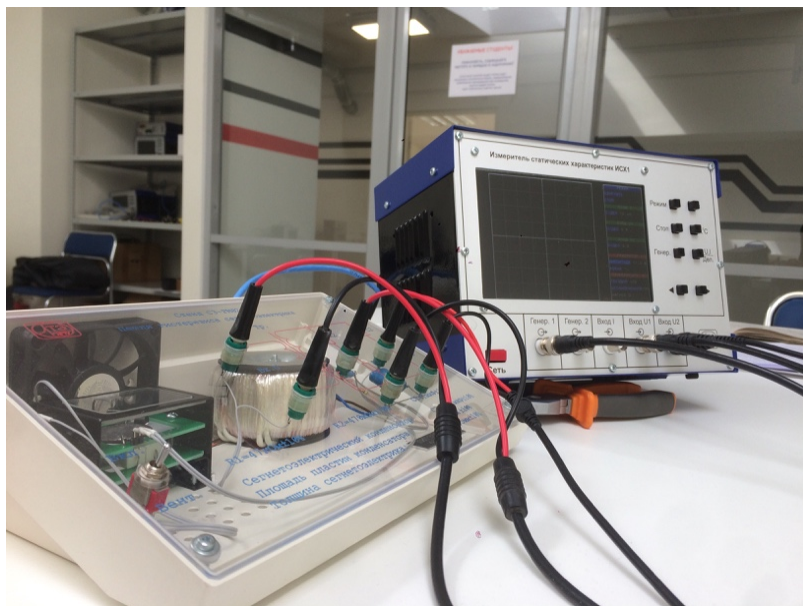


Рис. 3. Общий вид лабораторной установки

Объектом исследования является сегнетоэлектрический конденсатор (вариоконд) ВК2-4 геометрические размеры которого указаны непосредственно на стенде. На рис. 4 представлен внешний вид стенда СЗ-РМ02. Он содержит термокамеру с исследуемым сегнетоэлектрическим конденсатором, повышающий трансформатор, резистивный делитель и эталонный конденсатор с полипропиленовым изолятором.

Стенд подключается к измерителю статических характеристик «ИСХ1» через разъем на задней панели прибора.

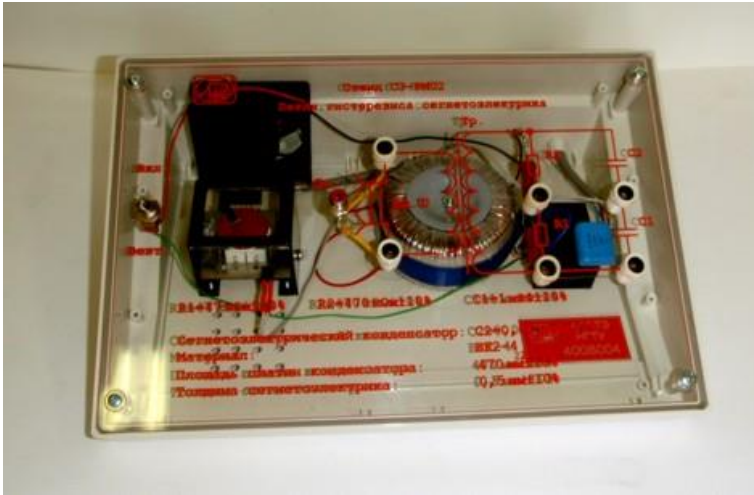


Рис. 4. Внешний вид стенда C3-PM02

Органы управления прибором «ИСХ1» показаны на рис. 5.

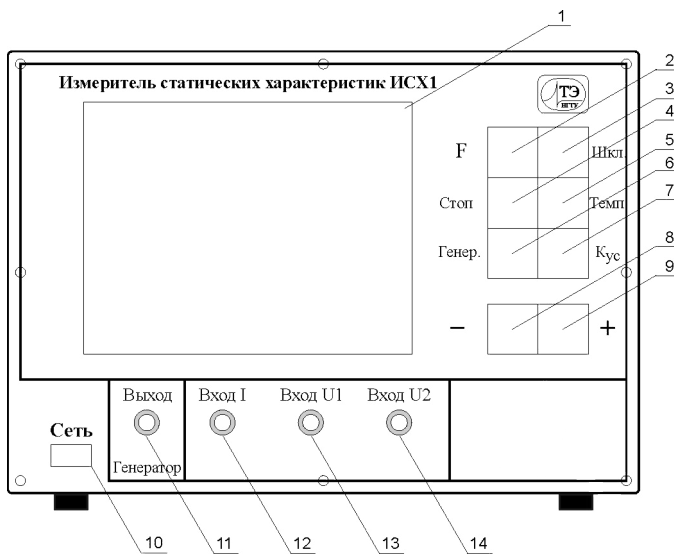


Рис. 5. Общий вид панели лицевой панели «ИСХ1»

1. графический дисплей;
2. кнопка выбора режима работы «F»;
3. кнопка выбора шкалы «Шкл.»;
4. кнопка запоминания оцифрованного сигнала «Стоп»;
5. кнопка выбора температурного режима «Темп»;
6. кнопка управления генератором «Генер.»;
7. кнопка выбора коэффициента отклонения « $K_{ус}$ »;
8. кнопка уменьшения выбранной величины «-»;
9. кнопка увеличения выбранной величины «+»;
- 10.кнопка выключателя «Сеть»;
- 11.выход генератора;
- 12.вход тока I ;
- 13.вход напряжения U_1 ;
- 14.вход напряжения U_2 ;

Экран дисплея, состоящий из двух частей: поле отображения сигнала и информационное поле, показан на рис. 6:

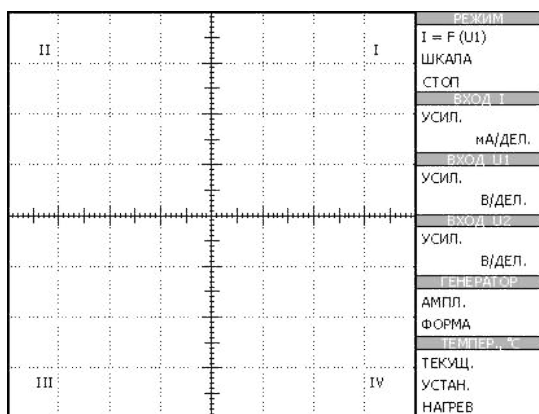


Рис. 6. Экран дисплея «ИСХ1»

Поле отображения сигнала содержит координатную сетку, на которую накладывается измеряемый сигнал. Информационное поле разделено на 4 области:

- область общих установок: отображает режим работы прибора (строка «Режим»), шкалу развертки (строка «Шкала») и состояние стоп-кадр (строка «Стоп»);
- область состояния входа I, входа U1 и входа U2: отображает коэффициенты отклонения каналов;
- область состояния генератора: отображает амплитуду выходного сигнала генератора (строка «Ампл.») и форму выходного сигнала генератора (строка «Форма»);
- область состояния терморегулятора: отображает текущую температуру образцов (строка «Текущ.»), требуемую температуру образцов (строка «Устан.») и индицирует работу нагревательного элемента (строка «Нагрев»).

Принципиальная электрическая схема установки представлена на рис. 7

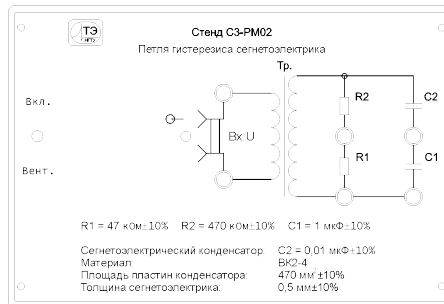


Рис. 7. Принципиальная электрическая схема установки

Перед включением установки необходимо подключить стенд СЗ-РМ02 к измерительным клеммам измерительного прибора «ИСХ1», используя соединительные провода. Для этого сигнал с генератора подается на первичную обмотку повышающего трансформатора, а на вход вертикальной развертки прибора «ИСХ1» подается напряжение с снимается с эталонного конденсатора C_1 .

Поскольку толщина конденсатора с сегнетоэлектриком существенно меньше, чем его линейные размеры в направлении перпендикулярном к вектору напряженности электрического поля \vec{E}

можно считать, что поле поляризации внутри сегнетоэлектрика является однородным и направлено перпендикулярно обкладкам. Тогда модуль вектора электрической индукции \vec{D} равен поверхностной плотности заряда на обкладках:

$$D = \sigma = \frac{q}{S} = \frac{C_2 U_{C_2}}{S} = \frac{C_1}{S} \cdot U_{C_1}, \quad (13)$$

где S - площадь обкладок сегнетоэлектрического конденсатора. (Заряды q на конденсаторах C_1 и C_2 равны, так как они соединены последовательно).

На вход горизонтальной развертки прибора «ИСХ1» подается напряжение с резистора R_1 , которое связано с общим падением напряжения во первичной обмотке U следующим образом:

$$U_{R_1} = U \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (14)$$

С другой стороны, общее напряжение на конденсаторах является суммой U_{C_1} и U_{C_2} , но поскольку в схеме $C_1 \gg C_2$, то $U_{C_2} \gg U_{C_1}$ и напряжение на выходе трансформатора приблизительно равно напряжению на конденсаторе C_2 с сегнетоэлектриком $U \cong U_{C_2}$:

$$U = U_{C_1} + U_{C_2} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} \cong \frac{q}{C_2} = U_{C_2}. \quad (15)$$

Напряженность электрического поля E в сегнетоэлектрике можно найти как отношение напряжения на обкладках конденсатора C_2 к расстоянию d между ними. С учетом (14) и (15) можно записать

$$E = \frac{U_{C_2}}{d} = \frac{U}{d} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{U_{R_1}}{d}. \quad (16)$$

Таким образом, сигнал по горизонтальной оси осциллограммы пропорционален значению напряженности электрического поля E , а по вертикальной — величине электрической индукции D в сегнетоэлектрике.

Проведение измерений

Задание 1.

Изучение предельной петли гистерезиса

1. Перед началом работы обратите внимание на то, чтобы тумблер на панели стенда должен находиться в *выключенном* состоянии — он управляет вентилятором, который в данном варианте выполнения лабораторной работы не используется.
2. Внесите в бланк рабочего протокола значения параметров установки, указанные на стенде: номиналы резисторов R_1 и R_2 , емкость эталонного конденсатора C_1 , площадь обкладок S и толщину сегнетоэлектрика d .
3. Включив «ИСХ1», настройте его так, чтобы на экране получилась петля гистерезиса, похожая на петлю на рис. 1. Для этого нужно перевести режим отображения в « $U_2 = F(U_1)$ » с помощью кнопки «Режим» и кнопок-стрелочек ◀ и ▶. Текущий режим отображается в самой верхней части экрана. Установите изображение петли гистерезиса в центре экрана.
4. Для наблюдения предельной петли гистерезиса задайте начальную величину подаваемого напряжения 17 В. Для этого нажмите кнопку «Генер.» два раза подряд, чтобы на экране был выбран режим «АМПЛИТУДА», затем с помощью кнопок-стрелок установите необходимое значение. Обратите внимание, что эти кнопки работают циклически и если нажать на кнопку ◀ при значении 0,2 В, то «ИСХ1» сразу переключится на 17 В.
5. Выберите масштаб, при котором петля будет достаточно крупной и полностью помещается на экране. Для этого нужно установить разрешение каждого из каналов с помощью кнопки « $\frac{U,I}{\text{Дел.}}$ » и кнопок-стрелочек. Рекомендуемое значения разрешение для обоих каналов 5 В/дел. Сфотографируйте или перерисуйте предельную петлю гистерезиса на лист миллиметровой бумаги с соблюдением масштаба.
6. Определите значения параметров D_s и E_s , D_r , E_c в делениях шкалы экрана и занесите эти величины в протокол измерений.

Задание 2.

Измерение зависимости смещения D от напряженности E

1. Занесите в Таблицу 1 горизонтальную X и вертикальную Y координату правой вершины предельной петли гистерезиса в делениях шкалы экрана, также указав значения коэффициентов усиления по каждому из каналов осциллографа K_x и K_y , соответственно.

2. Уменьшите напряжение U до значения при котором размеры петли гистерезиса уменьшатся примерно на половину деления шкалы экрана по горизонтальному направлению. Повторите измерения из п.1

3. Последовательно повторяя п.2 для ряда частных петель гистерезиса, полностью заполните первые пять столбцов Таблицы 1. Значение коэффициентов K_x и K_y на каждом шаге следует выбирать так, чтобы размер петли по каждому направлению составлял не менее половины экрана. Рекомендованное значение шага ΔU напряжения генератора:

$\Delta U = 2,0 \text{ В}$ в диапазоне $U = 5 \div 17 \text{ В}$,

$\Delta U = 0,6 \text{ В}$ в диапазоне $U = 0,4 \div 5,0 \text{ В}$.

4. Завершив измерения сдайте лабораторную установки во включенном состоянии дежурному инженеру.

Таблица 1: Зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля

Физические величины								
№	U , В	K_x , В/дел	K_y , В/дел	X , дел	Y , дел	E , В/м	D , Кл/м ²	ε
1	17	5	5					
2	15	5	5					
3								

Обработка результатов измерений

1. По измерениям, проделанным на предельной петле гистерезиса, с помощью формул (13) и (16) рассчитайте значения коэрцитивного поля E_c , электрической индукции в состоянии насыщения D_s и остаточной поляризации P_r . Оцените погрешность полученных результатов.
2. Найдите площадь предельной петли гистерезиса в делениях шкалы экрана по сделанной фотографии или эскизу. По найденным ранее значениям E_s и D_s в делениях шкалы и формуле (12) оцените значение тангенса угла диэлектрических потерь.
3. С помощью формул (13) и (16) и записанных в Таблице 1 значений коэффициентов усиления K_x и K_y заполните колонки E и D , рассчитав значения напряженности электрического поля и электрической индукции. Постройте график зависимости $D = D(E)$, отражающий ход основной кривой поляризации.
4. По формуле $\varepsilon = \frac{D}{\varepsilon_0 E}$ найдите значения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика для всех значениях напряженности электрического поля. Постройте график зависимости $\varepsilon = \varepsilon(E)$.
5. С помощью экстраполяции полученной зависимости к нулевому значению напряженности электрического поля найдите значение начальной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\text{нач}}$. Оцените величину его погрешности.
6. На графике $\varepsilon = \varepsilon(E)$ найдите максимальное значение диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\text{макс}}$. Оцените величину его погрешности. Определите напряженность E которому соответствует $\varepsilon_{\text{макс}}$.
7. Результаты всех расчетов в системе единиц СИ представьте в отчете в стандартной форме.

Литература

1. Методическое пособие «Обработка экспериментальных данных» / Курепин В.В., Баранов И.В., под ред. В.А. Самолетова, 2012.
2. Электромагнетизм. Основные законы / Иродов И.Е., ISBN 978-5-00101-498-0, Издательство "Лаборатория знаний 10-е изд.

Приложение. Формат рабочей таблицы протокола

№	Физические величины							
	U , В	K_x , В/дел	K_y , В/дел	X , дел	Y , дел	E , В/м	D , Кл/м ²	ε
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								