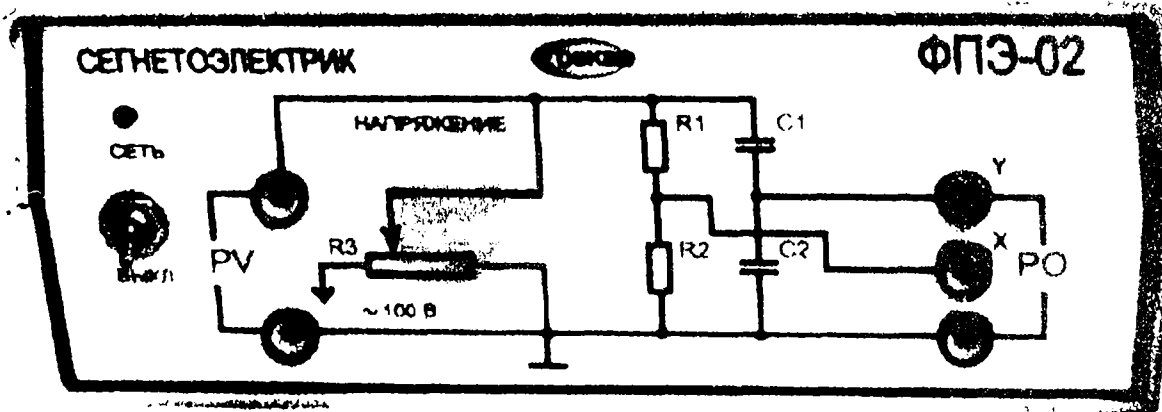


# Лабораторная работа 2.01

## Изучение электрических свойств сегнетоэлектриков



$$C_2 = 0,047 \mu\text{F} \pm 10\% \quad C_1 \ll C_2$$

$$R_1 = 470 \text{ k}\Omega \pm 5\%$$

$$R_2 = 11 \text{ k}\Omega \pm 5\%$$

$$S_{C_2} = 1 \text{ cm}^2 \quad h = 1 \text{ mm.}$$

Работа ФПЭ-02. ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: изучение поляризации сегнетоэлектриков в зависимости от напряженности электрического поля  $E$ , получение кривой  $\epsilon = f(E)$ , изучение диэлектрического гистерезиса, определение диэлектрических потерь в сегнетоэлектриках.

ВВЕДЕНИЕ

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

$$\vec{p}_e = q\vec{l}, \quad (2.1)$$

где  $q$  — абсолютная величина суммарного заряда одного знака в молекуле (т.е. заряда всех ядер или всех электронов);  $\vec{l}$  — 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:

$$\vec{p} = \frac{\sum_{\Delta V} \vec{p}_e}{\Delta V}, \quad (2.2)$$

где  $\sum_{\Delta V} \vec{p}_e$  — векторная сумма дипольных электрических моментов всех молекул диэлектрика в физически бесконечно малом объеме  $\Delta V$

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

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}, \quad (2.3)$$

где  $\chi$  — коэффициент, не зависящий в первом приближении от  $E$  и называемый диэлектрической восприимчивостью вещества;

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  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

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (2.4)$$

С учетом (2.3) вектор смещения можно представить в виде

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}, \quad (2.5)$$

где  $\epsilon = 1 + \chi$  — безразмерная величина, называемая диэлектрической проницаемостью среды. Для всех диэлектриков  $\chi > 0$ , а  $\epsilon > 1$ .

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.

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.

1. Сегнетоэлектрики характеризуются очень высокими значениями диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ . Она может достигать величин порядка  $10^3 - 10^6$ . Например, диэлектрическая проницаемость сегнетовой соли  $\text{NaKCS}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  при комнатной температуре ( $\sim 20^\circ\text{C}$ ) близка к 10000.

2. Особенностью сегнетоэлектриков является нелинейный характер зависимости поляризованности  $P$ , а значит, и электрического смещения  $D$  от напряженности поля  $E$  (рис. 2.1). При этом диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков  $\epsilon$  оказывается зависящей от  $E$ . На рис. 2.2 показана зависимость  $\epsilon$  от  $E$  для сегнетовой соли при температуре  $20^\circ\text{C}$ .

3. Всем сегнетоэлектрикам свойственно явление диэлектрического гистерезиса, заключающееся в запаздывании изменения поляризованности  $P$  (или смещения  $D$ ) при изменении напряженности поля  $E$ . Это запаздывание связано с тем, что величина  $P$  (или  $D$ ) не

только определяется значением поля  $E$ , но и зависит еще от предшествовавшего состояния поляризации образца. При циклических изменениях напряженности поля  $E$  зависимость поляризованности  $P$  и смещения  $D$  от  $E$  выражается кривой, называемой петлей гистерезиса.

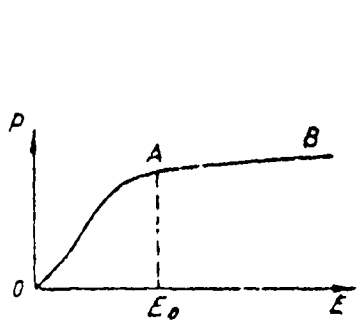


Рис. 2.1

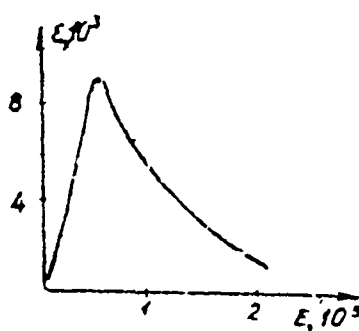


Рис. 2.2

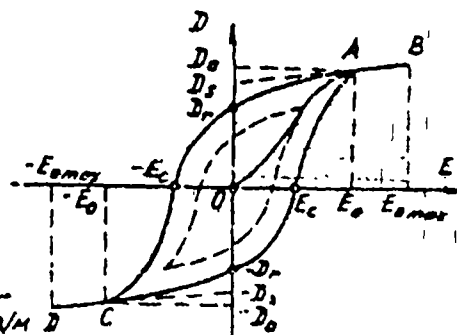


Рис. 2.3

На рис. 2.3 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 BA гистерезис отсутствует), а затем (от точки A) изменение смещения отстает от изменения напряженности. Когда напряженность поля  $E = 0$ , сегнетоэлектрик остается поляризованным и величина электрического смещения, равная  $D_r$ , называется остаточным смещением.

Для снятия остаточного смещения к сегнетоэлектрику необходимо приложить электрическое поле противоположного направления с напряженностью  $-E_c$ . Величину  $E_c$  принято называть 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. 2.3).

Если же при максимальной напряженности поля насыщение не достигается, то получается так называемая петля частного цикла, лежащая внутри предельного цикла (пунктирная кривая на рис. 2.3). Частных циклов переполаризации может существовать бесконечное множество, но при этом максимальные значения смещения  $D$  частных циклов всегда лежат на основной кривой поляризации OA.

4) 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. Для титаната бария  $BaTiO_3$  точка Кюри равна  $120^\circ\text{C}$ . Некоторые сегнетоэлектрики имеют две точки Кюри (верхнюю и нижнюю) и ведут себя как сегнетоэлектрики лишь в температурном интервале между этими точками Кюри. К числу таковых относится сегнетова соль, для которой точки Кюри равны  $-18^\circ\text{C}$  и  $+24^\circ\text{C}$ .

На рис. 2.4 приведен график температурной зависимости диэлектрической проницаемости монокристалла  $BaTiO_3$ <sup>ж)</sup>. В достаточно большом интервале температур значения  $\epsilon$   $BaTiO_3$  существенно превышают значения  $\epsilon$  обычных диэлектриков (для которых  $\epsilon = 1 - 10$ ). Вблизи точки Кюри наблюдается значительное возрастание  $\epsilon$  (аномалия).

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 не превышают  $10^{-6}$  м.

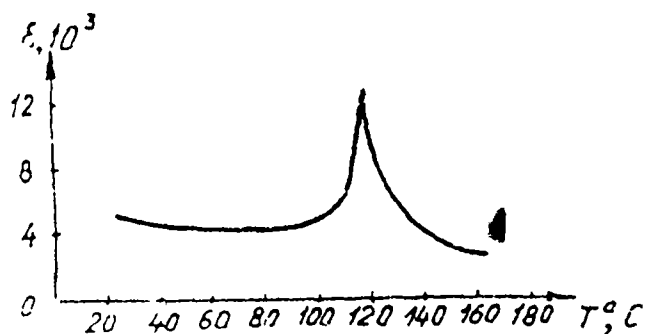


Рис. 2.4

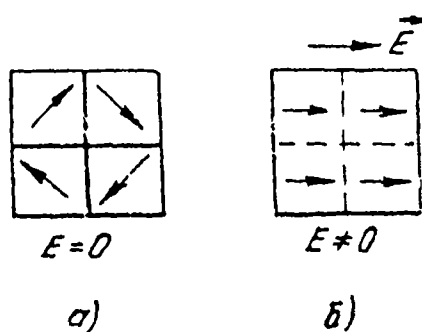


Рис. 2.5

ж) Кристалл  $BaTiO_3$  в сегнетоэлектрическом состоянии анизотропен. На рис. 2.4 левая ветвь графика относится к направлению в кристалле, перпендикулярному к оси спонтанной поляризации.

В отсутствие внешнего электрического поля поляризованность всех доменов различна по направлению, поэтому в целом кристалл оказывается неполяризованным. Это показано на рис. 2.5, 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: а) смещением доменных стенок (домены, поляризованность которых составляет острый угол  $\theta$  с внешним полем, растут за счет доменов, у которых  $\theta > \frac{\pi}{2}$ ); б) поворотом электрических моментов доменов в направлении поля; в) 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  $\rho$  кристалла (нелинейный участок OA на рис. 2.1 и 2.3). При этом вклад в суммарную поляризованность  $\rho$  помимо спонтанной поляризации, вносит также и индуцированная поляризация электронного и ионного смещения, т.е.  $\rho = \rho_s + \rho_i$

При некоторой напряженности поля (в точке А) во всем кристалле устанавливается единое направление спонтанной поляризации, совпадающее с направлением поля (рис. 2.5, б). Говорят, что кристалл становится однодоменным с направлением спонтанной поляризации, параллельным полю. Это состояние называется насыщением. Увеличение поля  $E$  после достижения насыщения сопровождается дальнейшим ростом общей поляризованности  $\rho$  кристалла, но теперь уже только за счет индуцированной поляризации (участок АВ на рис. 2.1 и 2.3). При этом поляризованность  $\rho$  и смещение  $D$  практически линейно зависят от  $E$ . Экстраполируя линейный участок АВ на ось ординат, можно оценить спонтанную поляризацию насыщения  $\rho_{s \max}$ , которая приблизительно равна значению  $D_s$ , отсекаемому экстраполированным участком на оси ординат:  $\rho_{s \max} \approx D_s$ . Это приближенное равенство вытекает из того, что для большинства сегнетоэлектриков  $\epsilon_0 E \ll \rho$  и  $D = \epsilon_0 E + \rho \approx \rho$

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 спонтан-

ная 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: а) отставанием во времени поляризованности  $P$  от напряженности поля  $E$  из-за молекулярно-теплового движения; б) наличием небольших токов проводимости; в) 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  $\delta$ , называемый углом потерь. Диэлектрические потери в конденсаторах оцениваются тангенсом угла потерь

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{R}{X}, \quad (2.6)$$

где  $X$  — 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 (2.6), может быть использовано выражение

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W}, \quad (2.7)$$

где  $\Delta W$  — 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 (2.7) для оценки потерь энергии, вызванных диэлектрическим гистерезисом. Эти потери, как и сам гистерезис, есть следствие необратимого характера процессов, ответственных за переориентацию спонтанной поляризации.

Перепишем соотношение (2.7) в виде

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{2\pi} \frac{w_r}{w_0}, \quad (2.8)$$

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

$$w = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 E^2, \quad (2.9)$$

то при увеличении напряженности поля на  $dE$  объемная плотность энергии соответственно изменяется на

$$dw = E d(\epsilon \epsilon_0 E) = E dD$$

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 формулой

$$w_r = \oint E dD \quad (2.10)$$

и численно равна площади петли гистерезиса в координатах  $D, E$ . Максимальная плотность энергии электрического поля в кристалле составляет

$$w_0 = \frac{E_0 D_0}{2}, \quad (2.11)$$

где  $E_0$  и  $D_0$  — амплитуды напряженности и смещения электрического поля.

Подставляя (2.10) и (2.11) в формулу (2.8), получим следующее выражение для тангенса угла диэлектрических потерь в сегнетоэлектриках

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\pi} \frac{\oint E dD}{E_0 D_0} \quad (2.12)$$

Сегнетоэлектрики используются для изготовления конденсаторов большой емкости, но малых размеров, применяются 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 — ограни-



ченый диапазон рабочих частот и температур, высокие значения диэлектрических потерь.

### ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

1. ФПЭ - 02 - модуль.
2. PV - цифровой вольтметр.
3. PO - осциллограф.

На рис. 2.6 приведена структурная схема, а на рис. 2.7 - принципиальная электрическая схема, с помощью которой изучаются свойства сегнетоэлектриков.

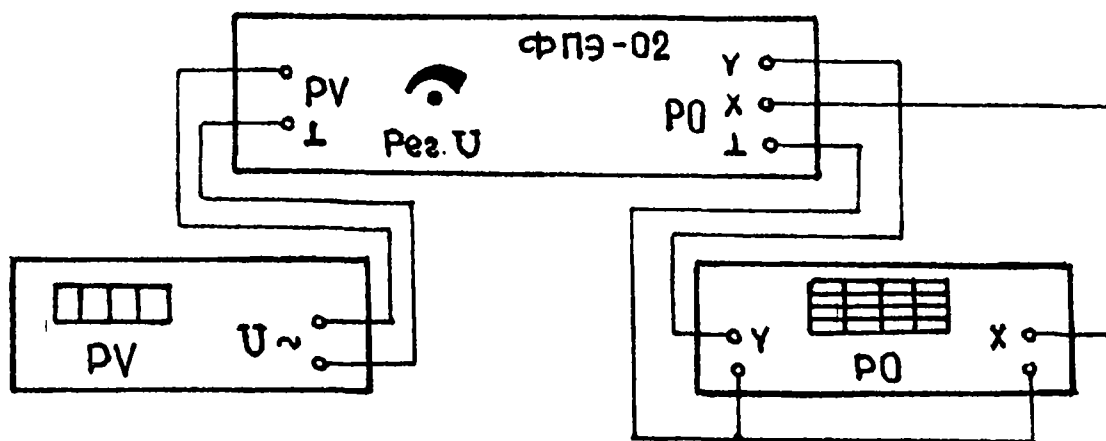


Рис. 2.6

Схема, изображенная на рис. 2.7, собрана в модуле ФПЭ-02/. На передней панели модуля имеются:

- 1) ручка "Reg U" потенциометра  $R_7$ ; 2) гнезда "PV" - для подключения вольтметра; 3) гнезда "PO" ("Y", "X", "1") - для подключения осциллографа.

От источника питания на схему поступают напряжение сети  $\sim 220$  В, 50 Гц

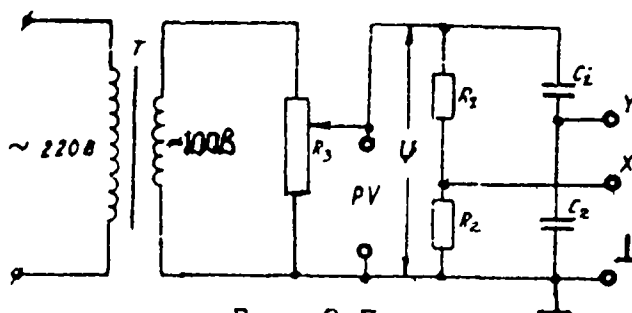


Рис. 2.7

Напряжение, снимаемое со вторичной цепи понижающего трансформатора Т (220/100), через потенциометр  $R_1$  подается на делитель напряжения, состоящий из сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ . Параллельно делителю  $R_1, R_2$  включены последовательно два конденсатора, образующие емкостной делитель: исследуемый керамический сегнетоэлектрический конденсатор  $C_1$  и эталонный конденсатор  $C_2$ . Вольтметр РV обеспечивает измерение величины напряжения, подаваемого на делители  $R_1, R_2$  и  $C_1, C_2$ .

Осциллограф РО служит для наблюдения и изучения поляризации сегнетоэлектрического конденсатора  $C_1$  при подаче на него переменного гармонического напряжения.

#### МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

На вертикально отклоняющиеся пластины осциллографа подается напряжение  $U_y$  с эталонного конденсатора

$$U_y = \frac{q}{C_2}. \quad (2.13)$$

Так как  $C_1$  и  $C_2$  соединены последовательно, то они имеют одинаковый заряд  $q$  на обкладках. Величина этого заряда может быть выражена через электрическое смещение  $D$  поля в исследуемом конденсаторе  $C_1$

$$D = \sigma = \frac{q}{S},$$

откуда

$$q = DS, \quad (2.14)$$

где  $\sigma$  - поверхностная плотность заряда на обкладках конденсатора

$C_1$ ;  $S = \frac{\pi d^2}{4}$  - площадь,  $d$  - диаметр обкладок конденсатора  $C_1$ ,

с учетом (2.14) напряжение

$$U_y = \frac{S}{C_2} D. \quad (2.15)$$

На горизонтально отклоняющиеся пластины подается напряжение  $U_x$ , снимаемое с сопротивления  $R_2$ :

$$U_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U \quad (2.16)$$

Это напряжение, как видим, составляет часть полного напряжения  $U$ , подаваемого на делитель напряжения  $R_1, R_2$ , а значит, и на емкостной делитель  $C_1, C_2$ . Емкости  $C_1$  и  $C_2$  подобраны таким образом, что  $C_1 \ll C_2$ . Поэтому с достаточной степенью точности ( $\sim \frac{C_1}{C_2}$ ) можно считать, что практически все напряжение  $U$  снимаемое с потенциометра  $R_3$ , на емкостном делителе приложено к сегнетоэлектрическому конденсатору  $C_1$ . Действительно, так как  $\frac{U_{C_1}}{U_{C_2}} = \frac{C_2}{C_1} \gg 1$ , то  $U = U_{C_1} + U_{C_2} \approx U_{C_1}$ . Тогда, полагая электрическое поле внутри конденсатора  $C_1$  однородным, имеем

$$U = E h, \quad (2.17)$$

где  $E$  — напряженность электрического поля в пластине сегнетоэлектрика;  $h$  — толщина пластины сегнетоэлектрика.

С учетом (2.17) напряжение  $U_x$  можно представить в виде

$$U_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E h \quad (2.18)$$

Таким образом, в данной электрической схеме на вертикально и горизонтально отклоняющиеся пластины осциллографа одновременно подаются периодически изменяющиеся напряжения, пропорциональные, соответственно, электрическому смещению  $D$  и напряженности поля  $E$  в исследуемом сегнетоэлектрике, в результате чего на экране осциллографа получается петля гистерезиса (см. рис. 2.3).

Выражения (2.15), (2.17) и (2.18) позволяют найти смещение  $D$  и напряженность  $E$  электрического поля в сегнетоэлектрике, если предварительно определены величины  $U_y, U_x$  и  $U$ . Напряжение  $U$  определяется по показанию вольтметра  $PV$ . Напряжения  $U_y$  и  $U_x$  измеряются с помощью осциллографа и рассчитываются по формулам:

$$U_y = K_y y, \quad (2.19)$$

$$U_x = K_x x, \quad (2.20)$$

где  $y, x$  — отклонения электронного луча на экране осциллографа по осям  $Y$  и  $X$  соответственно;  $K_y, K_x$  — коэффициенты отклонения каналов  $Y$  и  $X$  осциллографа.

Учитывая (2.19) и (2.20), из выражений (2.15) и (2.18) получим:

$$D = \frac{C_2 K_y}{S} y; \quad (2.21)$$

$$E = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot \frac{K_x}{h} x \quad (2.22)$$

Кроме того, из выражения (2.17) следует

$$E_0 = \frac{U_0}{h} = \frac{\sqrt{2}}{h} U \quad (2.23)$$

где  $U$  - эффективное значение напряжения, измеряемое вольтметром P.V.с.

Для напряженности поля получили две формулы. Формула (2.22) используется для определения текущего, а формула (2.23) - для определения амплитудного значения напряженности поля в сегнетоэлектрике.

Применим полученные соотношения для нахождения тангенса угла диэлектрических потерь в сегнетоэлектрике и исследования зависимости  $\epsilon = f(E)$ .

Подставляя в (2.12) выражения (2.21) и (2.22), имеем

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\pi} \frac{\oint E dD}{E_0 D_0} = \frac{1}{\pi} \frac{\oint x dy}{x_0 y_0} = \frac{1}{\pi} \frac{S_n}{x_0 y_0}, \quad (2.24)$$

где  $S_n$  - площадь петли гистерезиса в координатах  $x, y$ ;  $x_0, y_0$  - координаты вершины петли гистерезиса.

Для измерения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика  $\epsilon$  используем тот факт, что основная кривая поляризации (кривая OAB на рис. 2.3) является геометрическим местом точек вершин циклов переполаризации, полученных при различных максимальных значениях  $E_0$  напряженности поля в образце. Для каждой ее точки можем записать соотношение (2.5) в виде  $D_0 = \epsilon \epsilon_0 E_0$ , где  $D_0, E_0$  - координаты вершины циклов переполаризации. Тогда, определив с помощью формул (2.21) и (2.23) значения  $D_0$  и  $E_0$  вершин нескольких циклов, можно из (2.5) найти значения  $\epsilon$  при различных значениях  $E_0$  согласно выражению

$$\epsilon = \frac{D_0}{\epsilon_0 E_0} = \frac{C_2 h}{\sqrt{2} \epsilon_0 S} \frac{K_y y_0}{U} \quad (2.25)$$

и изучить зависимость  $\epsilon = f(E)$ .

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с описанием приборов, используемых в данной установке.

### ПОДГОТОВКА УСТАНОВКИ К РАБОТЕ

1. Установить ручку "Reg  $U$ " на панели модуля ФНЭ-02 в среднее положение.
2. Установить органы управления на панелях осциллографа Р0 в положение, обеспечивающее наблюдение фигур Лиссажу, измерение величины переменного напряжения и исследование зависимости между двумя внешними сигналами.
3. Подготовить к работе вольтметр Р V
4. Собрать схему согласно рис. 2.6.
5. После проверки схемы преподавателем или лаборантом присоединить все приборы к сети  $\sim 220$  В, 50 Гц и включить тумблеры "Сеть" на панелях всех приборов. На экране осциллографа должна появиться петля гистерезиса.
6. Установить петлю гистерезиса в центральную часть экрана осциллографа.

### Задание I. Определение тангенса угла дielekтрических потерь

1. Получить петлю гистерезиса предельного цикла. Для этого повернуть в крайнее правое положение ручку "Reg  $U$ " на панели модуля и подобрать, если это необходимо, такой коэффициент отклонения  $K_y$  осциллографа, чтобы кривая гистерезиса предельного цикла целиком размещалась в пределах экрана, занимая не меньше половины экрана (по вертикали).
2. Измерить координаты  $x_0$  и  $y_0$  вершины петли гистерезиса. Для этого, подводя каждую из вершин петли (точки А и С на рис. 2.3) сначала к оси  $X$ , а затем к оси  $Y$  (центральным, градуированным линиям сетки экрана), определить их координаты  $+x_0$  и  $-x_0$ ,  $+y_0$  и  $-y_0$  и взять среднее арифметическое из модулей полученных значений. Записать значение коэффициента отклонения  $K_y$  при измерении  $y_0$ .

3. Установить кривую гистерезиса симметрично относительно осей  $Y$  и  $X$  и перерисовать ее с экрана осциллографа на миллиметровую бумагу по точкам, снятым с помощью сетки экрана.

4. Определить площадь петли гистерезиса, используя рисунок, выполненный на миллиметровой бумаге.

5. Вычислить  $t\sigma\delta$  по формуле (2.24).

Задание 2. Определение остаточного смещения  $D_r$ , коэрцитивного поля  $E_c$  и спонтанной поляризации насыщения  $P_{3max}$

1. Установить петлю гистерезиса предельного цикла, полученную в задании 1, п. 1, симметрично относительно оси  $Y$ . Измерить значение  $y_c$  как половину высоты петли при  $x = 0$ . Записать значение  $K_y$ , соответствующее этому измерению.

2. Установить петлю гистерезиса симметрично относительно оси  $X$ . Измерить значение  $x_c$  как половину ширины петли при  $y = 0$ .

3. Продолжить линейные участки петли предельного цикла (AB и CD на рис. 2.3) до пересечения с осью  $Y$ , используя рисунок петли, выполненный в задании 1, п. 3. Измерить значение  $y_3$  как половину расстояния между точками пересечения экстраполированных участков с осью  $Y$ .

4. По формулам (2.21) и (2.22) рассчитать значения  $D_r$ ;  $P_{3max} = D_3$  и  $E_c$ .

5. Оценить погрешности измерения остаточного смещения  $D_r$  и коэрцитивного поля  $E_c$ .

Указание. Значения параметров, необходимые для расчетов, и точность их задания указаны в паспорте установки.

Задание 3. Получение основной кривой поляризации и изучение зависимости  $\epsilon = f(E)$

1. Для кривой гистерезиса предельного цикла, полученной в задании 1, п. 1, измерить значения координат  $x_{0max}$  и  $y_{0max}$  вершины цикла (точки B на рис. 2.3) по методике, описанной в том же задании 1, п. 2. Записать значение коэффициента  $K_y$  при измерении  $y_{0max}$ . Определить по показанию вольтметра РВ напряжению  $U$ .

2. Уменьшить напряжение  $U$  с помощью ручки "Reg  $U$ " на панели модуля и получить петлю предельного цикла, соответствующую такому амплитудному значению  $E_0$  напряженности поля, ниже которого предельный цикл исчезает (т.е. начинают изменяться площадь петли и

координаты ее вершин). Для этой петли: а) определять по показанию вольтметра Р V напряжение  $U$ ; б) зять из задания I, п. 2 значения  $x_0$ ,  $y_0$  и  $K_y$ .

3. Получить несколько частных циклов, уменьшая напряжение  $U$  ручкой "Reg U" и изменяя значения коэффициента  $K_y$  осциллографа таким образом, чтобы каждая петля гистерезиса занимала не меньше половины экрана (по вертикали). Число частных циклов должно быть не менее пяти при различных значениях коэффициента  $K_y$ .

Для каждого частного цикла: а) измерить координаты  $x_0$  и  $y_0$  его вершины; б) записать значение коэффициента  $K_y$ , при котором выполнено измерение  $y_0$ ; в) снять показание  $U$  с вольтметра Р V.

4. Результаты всех измерений по п. I - 3 занести в табл. 2.I.

5. Построить основную кривую поляризации в координатах  $x$ ,  $y$ .

6. По формулам (2.23) и (2.25) рассчитать значения  $E_0$  и  $\epsilon$  для всех исследованных циклов переполаризации.

7. Оценить погрешности измерения  $\epsilon$ .

8. Занести в табл. 2.I результаты всех вычислений.

9. Построить график зависимости  $\epsilon = f(E)$ .

Т а б л и ц а 2.I

$U$ , В	$x_0$ , дел	$y_0$ , дел	$K_y$ , В/дел	$\frac{K_y y_0}{U}$	$E_0$ , $10^4$ В/м	$\epsilon$ , $10^3$	$\Delta \epsilon$ , $10^3$	$(\epsilon \pm \Delta \epsilon)$ , $10^3$

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается поляризация диэлектриков? Какая величина является количественной характеристикой поляризации? Как эта величина связана с напряженностью электрического поля в диэлектрике?

2. Опишите различные типы поляризации: электронного смещения, ионного смещения, ориентационную, спонтанную.

3. Опишите основные свойства сегнетоэлектриков.

4. Нарисуйте принципиальную электрическую схему для получения петли гистерезиса и объясните ее работу.

5. Получите формулу, по которой в работе определяется диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика.

Литература: [I - 4].