

**Государственное образовательное учреждение  
Московский государственный технологический университет  
«СТАНКИН»**

**Кафедра физики**

**Лабораторная работа**

**«Изучение электрических свойств сегнетоэлектриков  
(ферроэлектриков)»**

**Цель работы.** Получение на экране осциллографа кривой поляризации  $\vec{D}(E) = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}(E) = \varepsilon_0 \varepsilon(E) \vec{E}$  для сегнетоэлектрика. Здесь  $\vec{D}(E)$  - электрическое смещение (электрическая индукция),  $\vec{E}$  - вектор напряженности электрического поля,  $\vec{P}(E)$  - поляризованность (вектор поляризации, равный сумме дипольных моментов всех атомов в единице объема),  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$  - электрическая постоянная,  $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость. Определение основных параметров кривой поляризации:  $D_1$  - остаточного электрического смещения,  $E_1$  - коэрцитивной силы и относительных потерь  $\gamma$  энергии на переполяризацию сегнетоэлектрика за один цикл.

### Введение

К сегнетоэлектрикам относятся полярные диэлектрики (атомы диэлектрика обладают отличным от нуля постоянным дипольным моментом в отсутствие внешнего электрического поля), которые могут спонтанно (самопроизвольно) поляризоваться в отсутствие внешнего электрического поля, если температура сегнетоэлектрика меньше температуры Кюри  $T_K$ . В результате поляризации суммарный дипольный момент единицы объема сегнетоэлектрика  $\vec{P}(E=0) \neq 0$ . Кроме того, зависимость  $\vec{P}(E)$  от  $E$  для сегнетоэлектрика является нелинейной, а величина  $\varepsilon(E)$  зависит от предыстории поляризации сегнетоэлектрика и может достигать величин порядка  $10^3$  и выше. При температуре Кюри в сегнетоэлектрике происходит фазовый переход II рода и в области температур  $T > T_K$  он ведет себя как обычный диэлектрик. В случае понижения температуры до значений, меньших температуры Кюри наблюдается обратный фазовый переход диэлектрик – сегнетоэлектрик.

На рис. 1 приведена типичная зависимость электрического смещения  $D$  сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля  $E$ . Пусть в отсутствие внешнего электрического поля

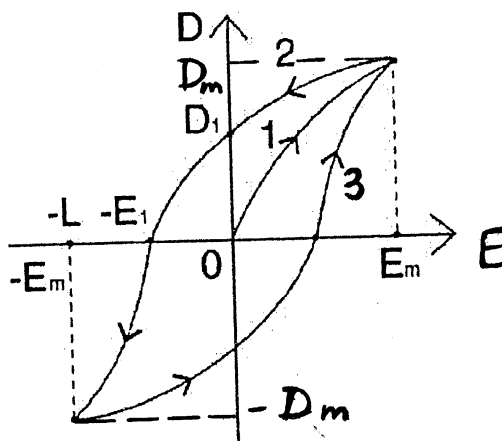


Рис. 1.

сегнетоэлектрик не был поляризован:  $E = 0, P = 0, D = 0$ . При монотонном увеличении поля  $E$  от нуля до  $E_m$  смещение  $D$  монотонно растет до величины  $D_m$  согласно кривой 1 на рис. 1. Если величину поля  $E$  монотонно уменьшать до нуля и изменить направление вектора

напряженности  $\vec{E}$  на обратное с последующим возрастанием  $|\vec{E}|$  до величины  $E_m$ , то смещение  $D$  будет изменяться согласно кривой 2, не совпадающей с кривой 1. Величина электрического смещения  $D_1$ , получаемая при  $E = 0$ , называется *остаточной*, а величина напряженности электрического поля  $E_1$ , которую необходимо создать для устранения остаточного электрического смещения, называется *коэрцитивной силой*. Как видно из рис. 1, для ликвидации остаточного смещения  $D_1$  необходимо приложить электрическое поле  $-E_1$ , направление которого противоположно направлению электрического поля, вызвавшего поляризацию сегнетоэлектрика.

При последующих периодических изменениях внешнего электрического поля от  $E_m$  до  $-E_m$  смещение  $D(E)$  описывается одной и той же гистерезисной петлей 23. В области достаточно больших величин  $E$  наступает насыщение поляризации сегнетоэлектрика, где  $P = const$ . Площадь петли гистерезиса на рис. 1 определяет величину потерь энергии электрического поля на переполяризацию сегнетоэлектрика за один цикл. Эти потери связаны с преобразованием энергии электрического поля во внутреннюю энергию сегнетоэлектрика (тепло).

### **1. Получение кривой зависимости $D(E)$ на экране осциллографа**

Принципиальная схема установки, позволяющей получить кривую зависимости  $D(E)$  на экране осциллографа, приведена на рис. 2. Переменное напряжение  $U_{вн}$  от внешнего источника подается на потенциометр  $R$ , с которого напряжение  $U_R$  прикладывается к двум последовательно соединенным плоским конденсаторам емкостью  $C$ , где между обкладками конденсатора находится сегнетоэлектрик и емкостью  $C_0$ , где между обкладками находится обычный диэлектрик. Напряжение с обкладок конденсатора  $C$  подается на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа, а напряжение с обкладок конденсатора  $C_0$  – на вертикально отклоняющие пластины осциллографа  $O$ .

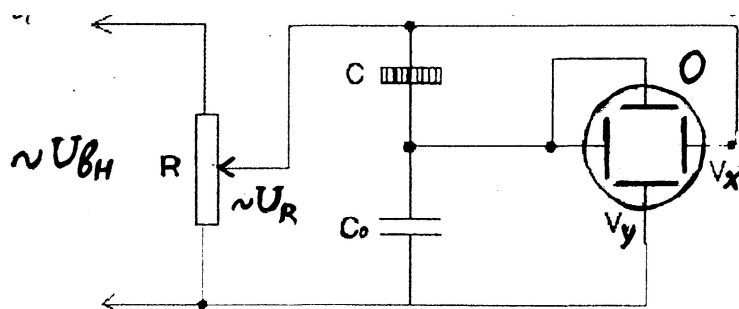


Рис. 2.

Покажем, что напряжение на обкладках конденсатора  $C_0$  пропорционально электрическому смещению (электрической индукции) внутри сегнетоэлектрика конденсатора  $C$ . Напряжение на обкладках конденсатора  $C_0$

$$U_0 = \frac{q}{C_0}, \quad (1)$$

где  $q$  – заряд конденсатора  $C_0$ , равный заряду конденсатора  $C$ , поскольку эти конденсаторы соединены последовательно. Согласно теореме Гаусса электрическое смещение  $D$  внутри конденсатора  $C$  равно поверхностной плотности заряда  $\sigma$

$$D = \sigma = \frac{q}{S}. \quad (2)$$

где  $S$  – площадь обкладок конденсатора  $C$ . Из (1) и (2) следует, что напряжение  $U_0$  на обкладках конденсатора  $C_0$  пропорционально электрическому смещению  $D$  внутри сегнетоэлектрика конденсатора  $C$

$$U_0 = \frac{SD}{C_0} \quad (3)$$

Напряжение (3) подается на вертикально отклоняющие пластины осциллографа и вызывает вертикальное смещение  $y$  электронного луча

$$U_y = U_0 = \kappa_2 y \quad (4)$$

где  $\kappa_2$  – коэффициент отклонения электронного луча по вертикали. Из (3) и (4) видно, что

$$D = \frac{C_0}{S} \kappa_2 y, \quad (5)$$

где смещение  $y$  измеряется в делениях вертикальной шкалы экрана осциллографа.

Покажем, что напряжение на обкладках конденсатора  $C$  пропорционально напряженности электрического поля внутри сегнетоэлектрика этого конденсатора. Согласно известному соотношению между напряженностью электрического поля  $E$  и напряжением на плоском конденсаторе

$$U = U_x = dE, \quad (6)$$

где  $d$  – расстояние между обкладками конденсатора. Напряжение (6), подаваемое на горизонтально отклоняющие пластины, вызывает смещение  $x$  электронного луча по горизонтали

$$U_x = \kappa_1 x, \quad (7)$$

где  $\kappa_1$  – коэффициент отклонения электронного луча осциллографа по горизонтали. Из (5) и (6) следует, что

$$E = \frac{\kappa_1}{d} x, \quad (8)$$

где смещение  $x$  измеряется в делениях горизонтальной шкалы экрана осциллографа.

Таким образом, из формул (5) и (8) следует, что на экране осциллографа с помощью измерительной схемы, показанной на рис. 2, получается кривая поляризации сегнетоэлектрика  $D(E)$ , помещенного внутри конденсатора  $C$ . Иными словами, с помощью физических процессов в цепи, показанной на рис. 2, напряженность электрического поля преобразуется в смещение

электронного луча вдоль горизонтальной оси осциллографа, а электрическое смещение – в смещение электронного луча вдоль вертикальной оси экрана осциллографа.

За один цикл переполяризации сегнетоэлектрика потери электрической энергии

$$W_1 = \oint \vec{E} d\vec{D} = \frac{C_0 \kappa_1 \kappa_2}{Sd} \oint x dy = \frac{C_0 \kappa_1 \kappa_2}{Sd} S_{II}, \quad (9)$$

где  $S_{II}$  – площадь петли гистерезиса в делениях горизонтальной и вертикальной шкал экрана осциллографа. Плотность энергии электрического поля при  $E = E_m$  и  $D = D_m$

$$W_m = \frac{1}{2} E_m D_m = \frac{C_0 \kappa_1 \kappa_2}{2dS} x_m y_m, \quad (10)$$

где использованы формулы (4) и (7). Здесь  $x_m$  и  $y_m$  – координаты вершины петли гистерезиса на экране осциллографа. С помощью (9) и (10) находим относительные потери энергии электрического поля за один цикл переполяризации сегнетоэлектрика

$$\gamma = \frac{W_1}{W_m} = 2 \frac{S_{II}}{x_m y_m}. \quad (11)$$

## **2. Описание лабораторной установки**

Установка состоит из источника питания **ИП**, вырабатывающего переменное напряжение, кассеты **ФПЭ-02**, в которой находится потенциометр, конденсаторы  $C_0$  и  $C$ , и осциллографа **О** (рис. 3). Напряжение, подаваемое на конденсаторы  $C_0$  и  $C$ , регулируется ручкой потенциометра **Р** на передней панели кассеты.

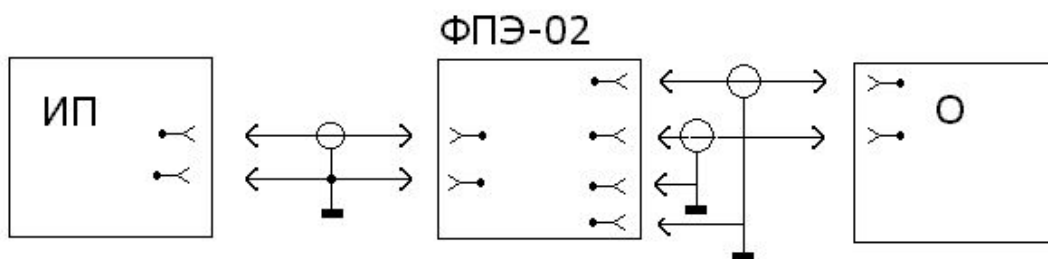


Рис. 3.

Параметры установки, используемые в формулах (5) и (8), имеют следующие значения:

$$C_0 = 220 \text{ нФ} \pm 10 \%, \quad S = 2,83 \text{ см}^2, \quad d = 1,5 \text{ мм}.$$

## **3. Проведение измерений**

### **I. Определение зависимости $D = D(E)$**

1. Соберите измерительную установку согласно рис. 3. Соблюдая меры техники безопасности, включите источник питания и осциллограф в сеть, и дайте им прогреться 5-7 мин.
2. При отсутствии напряжения на конденсаторах с помощью ручек регулировки на передней панели осциллографа установите светящуюся точку на экране в центре координатной сетки.
3. Ручкой потенциометра **Р**, а также регулируя усиление каналов **Y** и **X** осциллографа установите петлю гистерезиса так, чтобы петля занимала большую площадь экрана и имела

область насыщения. Определите координаты  $x_m$  и  $y_m$  вершин в единицах деления шкал экрана осциллографа и запишите в таблицу 1.

4. Уменьшая напряжение потенциометром **R**, снимите координаты  $x_m$  и  $y_m$  вершин еще для 3-4 петель гистерезиса.
5. С помощью формул (6) и (9) рассчитайте значения **E** и **D**, результаты запишите в таблицу 1.
6. Постройте график  $D = D(E)$ .
7. Определите погрешности измерений **E** и **D**.

Таблица 1

<i>№ п/п</i>	<i><math>x_m</math>, дел</i>	<i><math>y_m</math>, дел</i>	<i><math>E</math>, В/М</i>	<i><math>D</math>, Кл/м<sup>2</sup></i>	<i><math>\Delta E</math>, В / м</i>	<i><math>\Delta D</math>, Кл / м<sup>2</sup></i>

## II. Определение остаточного смещения и коэрцитивной силы

1. Получите на экране осциллографа максимальную петлю гистерезиса с участком насыщения.
2. Используя координатную сетку экрана, найдите координату  $y_1$ , соответствующую остаточному смещению **D**<sub>1</sub>, и координату  $x_1$ , соответствующую коэрцитивной силе **E**<sub>1</sub>.
3. С помощью формул (5) и (8) определите остаточное смещение **D**<sub>1</sub> и коэрцитивную силу **E**<sub>1</sub>.
4. Рассчитайте погрешности измерений коэрцитивной силы и остаточного смещения.

## III. Определение относительных потерь энергии

1. Получите на экране осциллографа максимальную петлю гистерезиса с участком насыщения.
2. Используя координатную сетку экрана, измерьте координаты  $x_m$  и  $y_m$  вершин полученной петли гистерезиса.
3. На миллиметровой бумаге, соблюдая масштаб, постройте в координатах  $y=f(x)$  петлю гистерезиса, и рассчитайте ее площадь.
4. С помощью формулы (11) найдите относительные потери энергии  $\gamma$ .

## Контрольные вопросы

1. Объяснить суть явления поляризации диэлектриков в электрическом поле.
2. Что такое сегнетоэлектрики?
3. Что такое коэрцитивная сила?
4. Что такое остаточное смещение?
5. Чем определяется напряженность электрического поля в диэлектрике?
6. Как определяется смещение электрического поля?
7. Что такое однородное электрическое поле?

8. Как определяется электрический дипольный момент?
9. Какими свойствами обладают полярные диэлектрики?
10. Чем отличаются диэлектрики от металлов с точки зрения данной теории?

#### *Литература*

1. Сивухин Д. В. *Общий курс физики. Т. 3. Электричество*. – М.: Наука, 1977, с. 48 – 51, 59 – 69, 141 – 173.
2. Струков Б. А. *Сегнетоэлектричество*. – М.: 1979.
3. Лайнс М., Гласс А. *Сегнетоэлектрики и родственные им материалы*. – М.: 1981.