

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**имени М. В. Ломоносова**

---

**Физический факультет**  
**кафедра общей физики и физики конденсированного состояния**

**Методическая разработка**  
**по общему физическому практикуму**

**Лаб. работа № 68**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО**  
**ГИСТЕРЕЗИСА В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКАХ**

**Составил описание доц. Горшков С.Н.**

**Москва 2012 г.**

Подготовил методическое пособие к изданию доц. Авксентьев Ю.И.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГИСТЕРЕЗИСА В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКАХ

**Цель работы** - изучение явления диэлектрического гистерезиса, определение параметров предельной петли гистерезиса и их зависимости от температуры.

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И СООТНОШЕНИЯ

Явление диэлектрического гистерезиса в сегнетоэлектриках состоит в том, что в этих материалах при определенных температурах такие величины, как поляризация  $P$ , полный электрический момент  $p$  образца и электрическая индукция  $D$  являются неоднозначными функциями напряженности электрического поля  $E$  и зависят от предыстории изменения поля в образце. При циклическом изменении величины напряженности поля  $E$  графическое изображение зависимости величин  $P$ ,  $p$ ,  $D$  от  $E$  имеет вид петли, называемой петлей диэлектрического гистерезиса.

В данной задаче явление диэлектрического гистерезиса изучается на примере гистерезисной зависимости электрической индукции  $D$  от напряженности электрического поля  $E$  в сегнетоэлектрическом кристалле триглицинсульфата (сокращенно ТГС), в котором имеется единственная точка Кюри  $T_K = 49^\circ\text{C}$ . Для исследования используется кристаллический образец в виде пластинки, вырезанной из кристалла ТГС перпендикулярно направлению, в котором возникает спонтанной поляризации при температурах ниже  $T_K$ . На широкие поверхности пластинки нанесены металлические обкладки, образующие

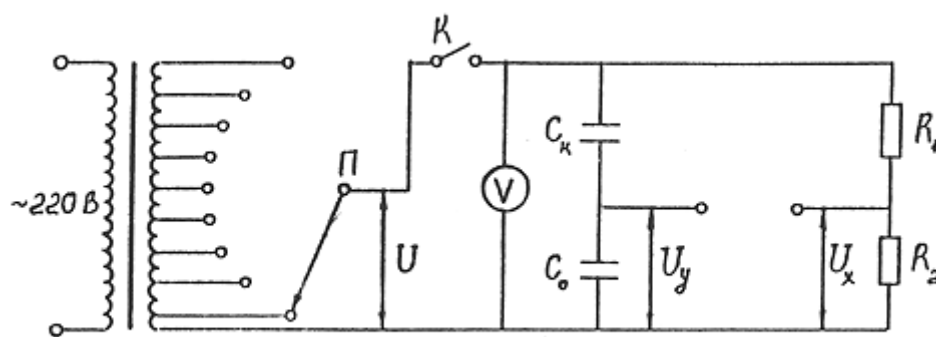


Рис. I

плоский конденсатор и позволяющие при подаче на них переменного напряжения создавать в образце переменное

электрическое поле с напряженностью  $E = U/a$ , где  $d$  - толщина образца. В качестве переменного напряжения в задаче используется напряжение с частотой городской сети ( $f = 50 \text{ Гц}$ ).

Для наблюдения петли диэлектрического гистерезиса используется осциллограф, на горизонтально отклоняющие пластины которого подается напряжение  $U_x$ , пропорциональное напряженности электрического поля  $E$  в кристалле, а на вертикально отклоняющие пластины - напряжение  $U_y$ ,

пропорциональное электрической индукции  $D$ . На экране осциллографа в соответствующем масштабе будет при этом воспроизводиться изображение петли гистерезиса, которое электронный луч пробегает с частотой  $50 \text{ Гц}$  в секунду.

Принципиальная схема получения напряжений  $U_x$  и  $U_y$  представлена на рис. 1. В этой схеме конденсатор  $C_k$ , образованный металлическими обкладками, нанесенными на образец, подключается к источнику переменного напряжения и последовательно с опорным конденсатором  $C_o$  большой емкости  $C_o$ .  $C_k$  ( $C_o = 0,1 \text{ мкФ}$ ). При таком соединении конденсаторы  $C_k$  и  $C_o$  в любой момент времени имеют одинаковый заряд, который можно определить по формуле

$$Q = CU, \quad \text{где} \quad C = C_k C_o / (C_k + C_o) \quad (1)$$

емкость последовательного соединения конденсаторов  $C_k$  и  $C_o$ . В результате напряжение на конденсаторе  $C_k$  принимает вид:

$$U_k = Q/C_k = [C_o / (C_k + C_o)] U \approx U \quad (2)$$

и, следовательно, напряженность электрического поля  $E$  в кристалле оказывается пропорциональной напряжению  $U_x$  на сопротивлении  $R_2$ :

$$E = U_k / d \approx U / d = (R_1 + R_2) U_x / R_2 d. \quad (3)$$

Далее заметим, что электрическая индукция  $D$  поля в конденсаторе  $C_k$ , содержащем образец, равна  $D = \varepsilon_o E'$ , где  $E'$  - электрическое поле, которое создавалось бы в этом конденсаторе тем же зарядом  $Q$  на обкладках, но в отсутствии кристалла. Тогда можно написать

$$D = \varepsilon_o E' = Q/S = C_o U_y / S, \quad (4)$$

где  $S$  - площадь обкладок конденсатора  $C_k$ . Следовательно, электрическая индукция в кристалле  $D$  оказывается пропорциональной напряжению  $U_y$  на конденсаторе  $C_o$ .

Форма петли гистерезиса, наблюдаемая на экране осциллографа, и ее параметры - коэрцитивная сила и остаточная электрическая индукция (совпадающая по величине с остаточной поляризацией в соответствии с формулой  $D = \varepsilon_o E + P$ ) - зависят от температуры образца, поскольку от температуры зависит величина возникающей в нем спонтанной (самопроизвольной) поляризации. Для изучения температурной зависимости формы и параметров петли гистерезиса конденсатор  $C_k$ , содержащий образец, помещается внутрь нагревательной катушки, при пропускании тока через которую выделяется джоулево тепло, приводящее к увеличению температуры образца.

Для контроля за температурой образца рядом с ним внутри нагревателя (нагревательной катушки) помещается термистор - полупроводниковый прибор,

сопротивление которого изменяется по известному закону при увеличении температуры. Подключая термистор к источнику э.д.с. и измеряя протекающий через него ток, можно определить сопротивление термистора, а значит, и температуру образца в данный момент времени.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Блок-схема установки для изучения явления диэлектрического гистерезиса приведена на рис. 2 и состоит из следующих основных частей:

1. *Нагревательное устройство* - элемент установки, внутри которого размещены обмотка нагревателя, исследуемый образец и термистор, служащий для измерения температуры.

2. *Гистерезиограф* - прибор, содержащий все элементы схемы формирования напряжений  $U_x$  и  $U_y$ , схемы измерения температуры и схемы нагревателя, не вошедшие в нагревательное устройство.

3. *Осциллограф* - для наблюдения петли диэлектрического гистерезиса.

Вид нагревательного устройства (в разрезе) представлен на рис. 3.

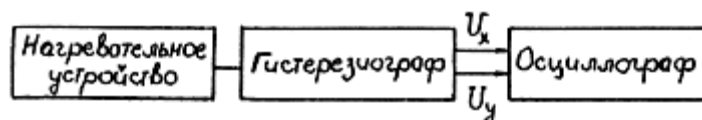


Рис. 2

Образец (исследуемый кристалл с нанесенными металлическими обкладками) 1 и термистор 2 расположены в камере 3, закрывающейся сверху крышкой 4. По периметру камеры 3 проходит обмотка нагревателя 5, при включении тока через которую температура в камере может изменяться от комнатной до примерно  $60^{\circ}\text{C}$ . Камера 3 защищена от окружающей среды теплоизолирующим стаканом 6 из

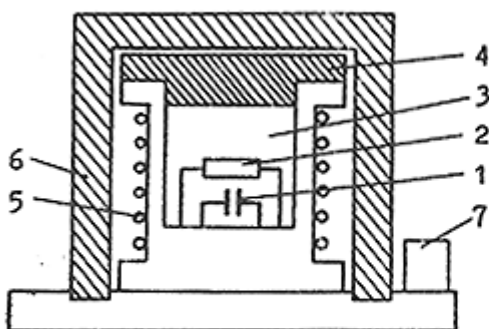


Рис. 3

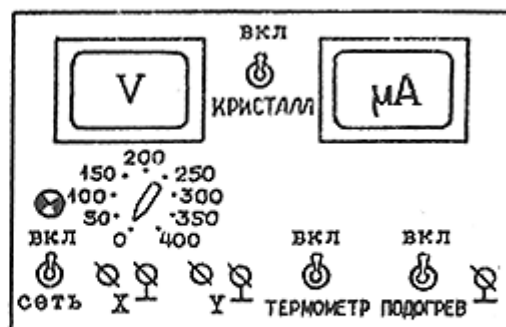


Рис. 4

пенопласта. На подставке термостата имеется электрический разъем 7 с тремя парами выводов, которые служат для подключения образца 1, термистора 2 и

нагревателя 5 к гистерезиографу.

Передняя панель гистерезиографа схематически изображена на рис. 4.

Тумблеры на передней панели гистерезиографа имеют следующее назначение:

1) тумблер *СЕТЬ* служит для включения прибора в сеть;

2) тумблер *КРИСТАЛЛ* включает схему формирования напряжений  $U_x$  и  $U_y$ , пропорциональных напряженности электрического поля и электрической индукции в образце (ключ  $K$  в схеме на рис. 1);

3) тумблер *ТЕРМОМЕТР* включает ток через обмотку нагревателя 5 (см. рис. 3).

Переключатель переменного напряжения  $0+400\text{ В}$ , расположенный на передней панели слева, служит для выбора величины напряжения  $U$  и подачи его на образец в схеме формирования напряжений  $U_x$  и  $U_y$  (переключатель  $П$  в схеме на рис. 1).

Вольтметр  $V$ , расположенный над переключателем (вольтметр  $V$  в схеме на рис. 1), служит для определения точного значения напряжения  $U$  в вольтах в каждом из положений переключателя. С клемм  $x$  и  $y$  снимаются напряжения  $U_x$  и  $U_y$  на горизонтально и вертикально отклоняющие пластины осциллографа.

В правой части передней панели гистерезиографа расположен микроамперметр  $\mu A$ , который включен в цепь термистора и предназначен для отсчета температуры. Градуировочная кривая шкалы микроамперметра, т.е. график зависимости тока через микроамперметр от температуры, помещена на столе рядом с установкой.

Для наблюдения петли гистерезиса используется осциллограф  $C1-72$ .

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧИ

### Включение экспериментальной установки и подготовка ее к работе

#### 1. Сопоставьте экспериментальную установку с блок-схемой,

приведенной на рис. 2. Найдите в установке нагревательное устройство и гистерезиограф, ознакомьтесь с передней панелью прибора.

#### 2. Включение осциллографа

Перед включением прибора в сеть установите органы управления лучом в следующие положения: ручки  $\odot$ ,  $*$ ,  $\updownarrow$ ,  $\leftrightarrow$  в среднее положение; *СТАБИЛЬНОСТЬ* - в крайнее правое положение; переключатель *ВОЛЬТ/ДЕЛЕН.* - в положение  $1$ ; кнопку *ВХОД X* - нажмите, кнопку  $\square$  отожмите. Затем, проверив, что шнур питания осциллографа подключен к сети  $\sim 220\text{ В}$ , тумблером *СЕТЬ* включите прибор. При этом должна загореться сигнальная лампочка. Через 2-3 минуты, если необходимо, отрегулируйте яркость и фокусировку возникшей на экране осциллографа светящейся точки ручками  $*$  и  $\odot$ . Если луч на экране осциллографа не виден даже при максимальной яркости, при помощи ручек  $\updownarrow$  и  $\leftrightarrow$  переместите его в пределы рабочей части экрана.

### 3. Включение гистерезиографа

Перед включением гистерезиографа в сеть установите тумблеры *ПОДОГРЕВ*, *КРИСТАЛЛ*, *ТЕРМОМЕТР* на его передней панели в положение *ВЫКЛ.* Затем, проверив, что шнур питания гистерезиографа подключен к сети  $\sim 220\text{ В}$ , включите прибор тумблером *СЕТЬ*. При этом около тумблера *СЕТЬ* на приборе должна загореться красная сигнальная лампочка.

4. Установите переключатель напряжений  $0\div 400\text{ В}$  на передней панели гистерезиографа в положение  $400\text{ В}$  и тумблером *КРИСТАЛЛ* включите схему формирования напряжений  $U_x$  и  $U_y$ , пропорциональных напряженности электрического поля  $E$  и электрической индукции  $D$  в образце. При этом на экране осциллографа должно появиться изображение петли гистерезиса. С помощью ручек осциллографа  $\leftrightarrow$  и  $\updownarrow$  установите изображение петли гистерезиса в центре экрана электронно-лучевой трубки и отрегулируйте яркость и фокус изображения (с помощью ручек  $*$  и  $\odot$ ).

5. Установите переключатель *ВРЕМЯ/ДЕЛЕН*, на передней панели осциллографа в такое положение (например  $0,2\text{ }\mu\text{s}$  или  $0,5\text{ }\mu\text{s}$ ), при котором петля гистерезиса на экране осциллографа становится наиболее удобной для наблюдения.

6. Определите температуру образца в термостате в момент включения установки. С этой целью включите схему измерения температуры с помощью тумблера *ТЕРМОМЕТР* и снимите показание микроамперметра  $\mu\text{A}$  на передней панели гистерезиографа; по градуировочному графику, находящемуся на столе рядом с установкой, определите температуру и запишите ее значение в тетрадь.

### Упражнение 1

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЕТЛИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГИСТЕРЕЗИСА

1. Установите переключатель напряжений  $0\div 400\text{ В}$  на передней панели гистерезиографа последовательно в положения  $0, 50, 100, \dots, 400\text{ В}$  и проследите, как при этом меняется форма петли гистерезиса на экране осциллографа. Убедитесь, что при последних переключениях - площадь петли гистерезиса практически перестает увеличиваться: на экране осциллографа начинает наблюдаться так называемая предельная петля гистерезиса, характеризующаяся тем, что максимальное достигаемое в ней значение поляризации в образце совпадает с величиной его спонтанной поляризации. Схематически зарисуйте в тетрадь на одном чертеже форму петель гистерезиса, отвечающих положениям переключателя напряжений  $100, 200$  и  $400\text{ В}$ .

Далее во всех пунктах данного упражнения и в упр. 2 будут исследоваться параметры предельной петли гистерезиса, для чего переключатель напряжений следует установить в положении  $400\text{ В}$ .

2. Определите амплитудное значение переменного напряжения, подаваемого на образец в положении переключателя напряжений  $400\text{ В}$ ,  
по формуле

$$U_0 = U \cdot \sqrt{2},$$

где  $U$  - действующее (эффективное) значение этого напряжения. Точное значение величины  $U$  в данном положении переключателя определите по показанию вольтметра гистерезиографа.

3. Определите максимальное значение напряженности электрического поля в образце  $E_{max}$ , отвечающее концам петли гистерезиса, по формуле

$$E_{max} = U/d, \quad (5)$$

где  $d$  - толщина образца ( $d = 0,5$  мм).

4. Определите максимальное значение электрической индукции в образце  $D_{max}$ , отвечающее концам петли гистерезиса, по формуле

$$D_{max} = C_0(U_y)_{max}/S = C_0 Y_{max} \gamma / 2S, \quad (6)$$

где  $C_0$  - емкость опорного конденсатора ( $C_0 = 0.1$  мкФ),  $Y_{max}$  - полная протяженность петли по вертикали, выраженная в больших делениях шкалы на экране осциллографа,  $\gamma$  - чувствительность осциллографа по оси  $Y$ , определяемая положением переключателя *ВОЛЬТ/ДЕЛЕН* осциллографа и в положении *1* этого переключателя имеющая значение  $\gamma = 1$  В/деление,  $S$  - площадь обкладок конденсатора  $C_k$ ,  $S = 9$  мм<sup>2</sup>. Для определения величины  $Y_{max}$  удобно отключить вход осциллографа от клемм  $x$  гистерезиографа, прекращая тем самым подачу напряжения и на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа; в результате на экране электронно-лучевой трубки будет наблюдаться вертикальная линия, длина которой равна протяженности петли гистерезиса по вертикали и легко может быть измерена. После измерения величины  $Y_{max}$  для восстановления изображения петли гистерезиса на экране достаточно вновь подать напряжение  $U_x$  с клемм  $x$  гистерезиографа на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа.

5. Определите значение диэлектрической проницаемости в кристалле *ТГС* при напряженности электрического поля в нем  $E = E_{max}$  по формуле

$$\varepsilon = D_{max} / \varepsilon_0 E_{max}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/М. В качестве значений  $E_{max}$  и  $D_{max}$  используйте значения этих величин, найденные в п. 3, 4 данного упражнения.

6. Вычислите величину коэрцитивной силы  $E_c$  в кристалле *ТГС* (при температуре, при которой в данный момент находится образец и которая была определена выше), по формуле:

$$E_c = (X_c / X_{max}) E_{max}, \quad (8)$$

где  $X_{max}$  и  $X_c$ , соответственно, полная протяженность петли гистерезиса по



горизонталь и ее ширина, выраженные в (больших) делениях шкалы на экране осциллографа. Для определения величины  $X_c$  следует с помощью ручек  $\leftrightarrow$ ,  $\updownarrow$  управления лучом осциллографа расположить центр петли гистерезиса в начале координат масштабной шкалы на экране осциллографа и определить длину отрезка, отсекаемого петлей на оси  $x$ , в больших делениях шкалы. Для определения величины  $X_{max}$  удобно отключить вход осциллографа от клемм  $Y$  гистерезиографа, прекращая тем самым подачу напряжения и на вертикально отклоняющие пластины осциллографа; в результате на экране будет наблюдаться горизонтальная полоска, длина которой равна протяженности петли гистерезиса по горизонтали и легко может быть измерена. После измерения величины  $X_{max}$  для восстановления изображения петли гистерезиса на экране осциллографа достаточно вновь подать напряжение  $U_y$  с клемм  $Y$  на вертикально отклоняющие пластины осциллографа. Величина  $E_{max}$  в формуле (8) была определена в п. 3 данного упражнения.

7. Определите величину спонтанной поляризации кристалла ТГС (при температуре, которую в данный момент имеет образец), по формуле

$$P_s = D_{max} - \varepsilon_0 E_{max}, \quad (9)$$

где величины  $E_{max}$  и  $D_{max}$  определены выше в пунктах 3 и 4. Легко видеть, что если диэлектрическая проницаемость

$$\varepsilon = D_{max} / \varepsilon_0 E_{max} \quad (10)$$

при напряженности электрического поля в кристалле  $E = E_{max}$  удовлетворяет соотношению  $\varepsilon \gg 1$ , то вместо формулы (9) для определения величины спонтанной поляризации можно использовать формулу

$$P_s \cong D_{max}. \quad (11)$$

## Упражнение 2

### ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СПОНТАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА ТГС (выполняется по указанию преподавателя)

1. Включите тумблер *ПОДОГРЕВ* на передней панели гистерезиографа. При включении этого тумблера через обмотку нагревателя в термостате начинает протекать некоторый постоянный ток, температура образца увеличивается, что приводит к уменьшению сопротивления и возрастания тока в цепи термистора.

2. Пользуясь градуировочной кривой шкалы микроамперметра гистерезиографа, определите, каким значениям тока через микроамперметр соответствуют температуры образца в термостате  $t = 30, 37, 43, 48, 49$  °C. Полученные значения тока выпишите в тетрадь. При достижении током через микроамперметр каждого из указанных значений определите параметр  $Y_{max}$

петли гистерезиса аналогично тому, как это было сделано в п. 4 упр. 1. Схематически зарисуйте (на одном чертеже) форму петли гистерезиса для температур образца 30, 43 и 49 °С и дайте качественное объяснение характера изменения этой формы с увеличением температуры кристалла.

**Внимание! После выполнения задания данного пункта выключите нагревательный ток термостата, поставив тумблер ПОДОГРЕВ на передней панели гистерезиографа в положение ВЫКЛ.**

3. Используя полученные в предыдущем пункте значения величины  $Y_{\max}$  для каждого из значений температуры 30, 37, 43, 48, 49 °С вычислите спонтанную поляризацию кристалла ТГС по формуле

$$P_s = D_{\max} - \varepsilon_0 E_{\max} = C_0 Y_{\max} / 2S - \varepsilon_0 E_{\max}, \quad (12)$$

где величина  $E_{\max}$  определена в п. 3 Упр.1.

4. Постройте график зависимости спонтанной поляризации  $P_s$  кристалла ТГС от температуры. При построении графика используйте также значение спонтанной поляризации кристалла до включения подогрева, найденное в п. 7 Упр. 1.

## ЛИТЕРАТУРА

Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. Пособие. В 5 кн. Кн. 2. Электричество и магнетизм - 4-е изд., перераб. - М.: Наука. Физматлит. 1998. - 336.

Глава 2. Электрическое поле в диэлектриках.

§ 2.1. Полярные и неполярные молекулы.

§ 2.2. Поляризация диэлектриков.

§ 2.3. Поле внутри диэлектриков.

§ 2.4. Объемные и поверхностные связанные заряды.

§ 2.5. Вектор электрического смещения.

Глава 3. Проводники в электрическом поле.

§ 3.3. Емкость.

§ 3.4. Конденсаторы.