

## Работа 3.4

### Исследование диэлектрических свойств сегнетоэлектриков

**Оборудование:** исследуемый образец (триглицинсульфат), повышающий трансформатор, конденсатор, два резистора, источник переменного напряжения, электронный цифровой прибор Ц4313, звуковой генератор, трубчатый электронагреватель, электронный цифровой прибор М890G, соединительные провода.

#### Введение

Любой *диэлектрик* при внесении его во внешнее электрическое поле *поляризуется*. Для характеристики *степени поляризации* диэлектрика введена векторная величина  $\vec{P}$ , равная *суммарному дипольному моменту единицы объема*. Называется эта величина *поляризованностью* диэлектрика. В однородных изотропных диэлектриках поляризованность  $\vec{P}$  в любой точке пропорциональна напряженности поля  $\vec{E}$  в той же точке:

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \vec{E}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0$  — *электрическая постоянная*,  $\chi$  — *электрическая восприимчивость* диэлектрика. Величина

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (2)$$

называется *электрическим смещением* (*электрической индукцией*). Подставив соотношение (1) в формулу (2), получим:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \varepsilon_0 \chi \vec{E} = \varepsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} \quad \text{или} \quad \vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon = 1 + \chi$  — *относительная диэлектрическая проницаемость* диэлектрика.

В кристаллических диэлектриках имеет место *анизотропия*, поэтому направления векторов  $\vec{P}$  и  $\vec{E}$  могут не совпадать. Для таких диэлектриков свойственны и другие особенности, связанные с их поляризацией. Например, в некоторых ионных кристаллах поляризация может возникнуть при их деформации без внешнего поля. Это явление получило название *пьезоэлектрического эффекта*.

Среди пьезоэлектриков есть кристаллы, у которых решетка положительных ионов смещена относительно решетки отрицательных ионов и они оказываются поляризованными даже в отсутствие электрического поля. Такая поляризация называется *спонтанной* (*самопроизвольной*). Кристаллы, в которых наблюдается спонтанная поляризация, называются *пироэлектриками*. В некоторых пироэлектриках спонтанная поляризация наблюдается только в определенном интервале температур. Для них характерно наличие нескольких кристаллических модифика-

ций. Модификация, в которой существует спонтанная поляризация, называется *полярной фазой*, а модификация, в которой спонтанная поляризация не возникает — *неполярной (пароэлектрической)*. Температура  $T_k$ , при которой происходит переход из полярной фазы в неполярную (или наоборот), называется *точкой Кюри*. Эти кристаллы называются *сегнетоэлектриками*.

Характерной особенностью сегнетоэлектриков является их способность к переполяризации, это значит изменению направления вектора спонтанной поляризации  $\vec{P}$  под действием электрического поля.

Сегнетоэлектрики обычно не являются однородно поляризованными, а состоят из *доменов* — участков кристалла, спонтанно поляризованных в одном направлении. У разных доменов направление спонтанной поляризации разное, поэтому суммарный электрический дипольный момент всего образца при отсутствии внешнего поля равен нулю.

Если сегнетоэлектрик внести во внешнее электрическое поле, то произойдет переориентация электрических моментов доменов и весь образец оказывается поляризованным.

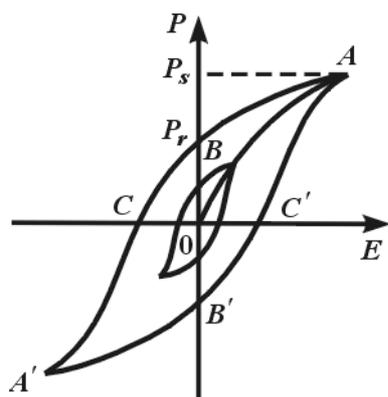


Рис. 3.9

Наличие в сегнетоэлектриках доменной структуры приводит к тому, что процесс их поляризации отличается рядом особенностей. Одна из них заключается в том, что в полярной фазе их диэлектрическая проницаемость имеет аномально большое значение (до  $10^4$  —  $10^5$ ). Зависимость поляризованности  $\vec{P}$  и электрического смещения  $\vec{D}$  от напряженности поля  $\vec{E}$  не является линейной, это значит, диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  зависит от напряженности поля  $\epsilon = f(E)$ . Значение поляризованности  $\vec{P}$  и электрического смещения  $\vec{D}$  определяется не только значением напряженности поля

$\vec{E}$ , но зависит и от предшествовавших состояний поляризации, это значит, для сегнетоэлектриков характерно явление *гистерезиса*.

При циклическом изменении поля зависимость поляризованности  $\vec{P}$  от напряженности поля  $\vec{E}$  имеет вид кривой, приведенной на рис. 3.9. Эта кривая называется *петлей гистерезиса*. При включении поля  $\vec{E}$  и его возрастании поляризованность  $\vec{P}$  сначала резко возрастает, а затем достигает насыщения  $\vec{P}_s$  (кривая  $OA$ ). С убыванием  $\vec{E}$  поляризованность  $\vec{P}$  уменьшается медленнее, чем по кривой  $OA$ , и при  $\vec{E} = 0$  значение  $\vec{P} \neq 0$ . Эта поляризованность  $\vec{P}_r$  называется *остаточной*. На рис. 3.9 ей соответствует отрезок  $OB$ . Для того, чтобы уменьшить поляризованность  $\vec{P}_r$  до нуля, необходимо приложить поле  $\vec{E}_c$  противоположного направления (отрезок  $OC$ ). Это поле называется *коэрцитивным полем*. При

дальнейшем изменении поля опять наступает насыщение (точка  $A'$ ), и замыкание цикла происходит по кривой  $A'B'C'A$ . Если изменение поляризованности происходит от насыщения в одном направлении до насыщения в другом, петля гистерезиса называется *максимальной*. Если поляризованность образца не доводить до насыщения, а напряженность поля постепенно уменьшать, то получается семейство петель гистерезиса меньших размеров, одна из которых приведена на рис. 3.9. Вершины этих петель располагаются на кривой  $OA$ , которая описывает первоначальную поляризованность.

Очевидно, что истинное значение коэрцитивного поля  $\vec{E}_c$ , остаточной поляризации  $\vec{P}_r$  и спонтанной поляризации  $\vec{P}_s$  можно получить только на максимальной петле гистерезиса. Аналогичные петли гистерезиса получаются, если на оси ординат откладывать электрическое смещение, потому что в сегнетоэлектриках  $\epsilon_0 \vec{E} \ll \vec{D}$  и слагаемым  $\epsilon_0 \vec{E}$  в формуле (2) можно пренебречь.

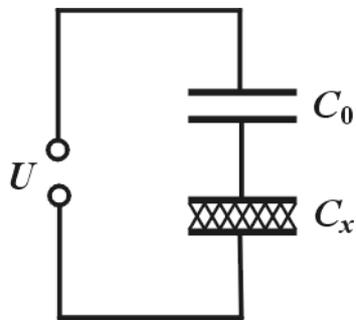


Рис. 3.10

Для экспериментального исследования зависимости  $\vec{D} = f(\vec{E})$  можно использовать схему (рис. 3.10), где к источнику напряжения  $U$  подключены два последовательно соединенные конденсатора  $C_x$  и  $C_0$ . Между пластинами плоского конденсатора  $C_x$  находится исследуемый сегнетоэлектрик. Конденсатор  $C_0$  является эталонным и его емкость выбирается такой, чтобы выполнялось условие  $C_0 \gg C_x$ . Для того, чтобы установить зависимость  $\vec{D}$  от  $\vec{E}$ , достаточно при разных значениях  $U$  измерить напряжение  $U_x$  на пластинах конденсатора  $C_x$ , которое пропорционально напряженности поля  $|\vec{E}|$  и  $U_0$  на конденсаторе  $C_0$ , которое пропорционально  $|\vec{D}|$ . Действительно, при последовательном соединении конденсаторов заряды на их обкладках одинаковы,  $Q_x = Q_0$ , но

$$Q_x = C_x U_x, \quad Q_0 = C_0 U_0,$$

откуда

$$U_x = \frac{Q_x}{C_x}, \quad U_0 = \frac{Q_0}{C_0} = \frac{Q_x}{C_0}.$$

Если выразим  $Q_x$  через поверхностную плотность заряда  $\sigma$  и площадь пластин  $S$  ( $Q_x = \sigma S$ ), то получим:

$$U_x = \frac{\sigma S}{C_x}, \quad U_0 = \frac{\sigma S}{C_0}.$$

Для определения  $\sigma$  используем формулу  $|\vec{E}| = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon}$  и получим:

$$U_x = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon |\vec{E}| S}{C_x}, \quad U_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon |\vec{E}| S}{C_0}.$$

Учитывая, что емкость плоского конденсатора  $C_x = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$ , а согласно (3)  $\varepsilon_0 \varepsilon \vec{E} = \vec{D}$ , получим:

$$U_x = |\vec{E}| d \quad \text{и} \quad U_0 = \frac{S |\vec{D}|}{C_0}. \quad (4)$$

Изменяя напряжение источника  $U$  и измеряя каждый раз  $U_x$  и  $U_0$ , по формулам (4) можно вычислить

$$|\vec{D}| = \frac{C_0 U_0}{S}, \quad |\vec{E}| = \frac{U_x}{d} \quad (5)$$

и построить график зависимости  $\vec{D} = f(\vec{E})$ .

Если определить  $|\vec{D}|$  при разных значениях  $|\vec{E}|$ , то по формуле (3) можно подсчитать  $\varepsilon = \frac{|\vec{D}|}{\varepsilon_0 |\vec{E}|}$  и построить график  $\varepsilon = f(E)$ .

В неполярной фазе сегнетоэлектрик ведет себя как обычный диэлектрик, в котором поляризованность  $\vec{P}$  пропорциональна напряженности поля  $\vec{E}$ , но вблизи точки Кюри диэлектрическая проницаемость имеет аномально большое значение и очень сильно зависит от температуры. Эта зависимость описывается законом Кюри — Вейса.

$$\varepsilon = \frac{C}{T - T_k}, \quad (6)$$

где  $C$  — постоянная Кюри — Вейса,  $T_k$  — температура Кюри. Соотношение (6) используется для определения точки Кюри, для чего необходимо построить график  $1/\varepsilon = f(T)$ , представляющий собой прямую линию, продолжение которой пересекается с горизонтальной осью в точке  $T_k$ .

Цель работы состоит в изучении особенностей поляризации сегнетоэлектриков и исследовании температурной зависимости их диэлектрической проницаемости.

В работе изучаются диэлектрические свойства монокристаллического триглицинсульфата. Определяется его точка Кюри, исследуется зависимость

диэлектрической проницаемости и электрического смещения от напряженности поля, а также температурная зависимость диэлектрической проницаемости.

**У п р а ж н е н и е 1.** *Исследование поляризации триглицинсульфата под действием внешнего электрического поля.*

**Описание установки и метода.** Измерительная схема представлена на рис. 3.11. Источником напряжения  $U$ , подводимого к последовательно соединенным конденсаторам  $C_x$  и  $C_0$ , служит повышающий трансформатор  $Tr$ ,

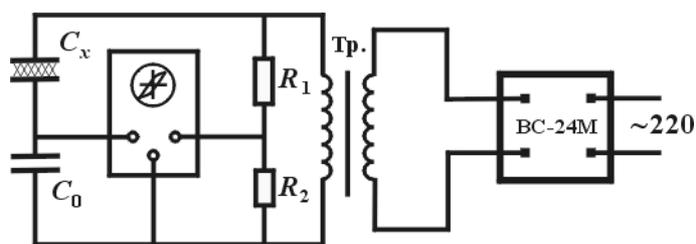


Рис. 3.11

питаемый от регулятора напряжения ВС-24М. На вертикально отклоняющие пластины осциллографа подается напряжение  $U_0$ , снимаемое с конденсатора  $C_0$ , пропорциональное  $|\vec{D}|$ . На горизонтально отклоняющие пластины подается напряжение

$U_x \sim |\vec{E}|$  с конденсатора  $C_x$ . Однако поскольку  $C_x \ll C_0$ , то  $U_x \gg U_0$ . Поэтому с помощью делителя из двух последовательно соединенных резисторов  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 3.11) на горизонтальный вход осциллографа подается не все напряжение  $U_x$ , а только его часть:

$$U'_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_x. \quad (7)$$

Таким образом, на вертикальный вход осциллографа подается напряжение, пропорциональное  $|\vec{D}|$ , а на горизонтальный — пропорциональное  $|\vec{E}|$ , и на его экране возникает петля гистерезиса.

За один период синусоидального изменения напряжения след электронного луча на экране осциллографа опишет полную петлю гистерезиса, а каждый последующий период в точности ее повторит. При частоте колебаний напряжения 50 Гц на экране видна неподвижная петля гистерезиса  $|\vec{D}| = f(E)$ .

Величины напряжений  $U'_x$  и  $U_0$  можно определить, если при данном усилении известны цена деления  $S_x$  горизонтального и  $S_y$  вертикального входов осциллографа (цена деления — это напряжение, которое вызывает отклонение электронного луча вдоль оси  $X$  или вдоль оси  $Y$  на одно деление масштабной сетки шкалы). Если напряжение  $U_1$  вызывает отклонение электронного луча вдоль горизонтальной оси  $X$  на величину  $x_1$ , то  $S_x = U_1 / x_1$ . Аналогично  $S_y = U_2 / y_1$ .

Так как при измерении  $U$  вольтметр показывает эффективное значение переменного напряжения, а отклонение электронного луча определяется его амплитудным значением, то

$$S_x = \frac{\sqrt{2} U_1}{x_1}, \quad S_y = \frac{\sqrt{2} U_2}{y_1}, \quad (8)$$

где  $U_1, U_2$  — показания вольтметра.

При известных значениях  $S_x$  и  $S_y$  можно определить  $U'_x = S_x x$  и  $U'_y = S_y y$ , а вместо (5) с учетом (7) получим:

$$|\vec{D}| = \frac{C_0}{S} S_y y, \quad (9)$$

$$|\vec{E}| = \frac{R_1 + R_2}{R_2 d} S_x x. \quad (10)$$

Исследуемый образец сегнетоэлектрика находится в пробирке с маслом. Параметры образца, емкость эталонного конденсатора  $C_0$ , и сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R_2$  указаны на установке.

### Порядок выполнения упражнения

1. Соберите схему согласно рис. 3.11.
2. Включите шнур осциллографа в сеть 220 В.
3. Ручки управления «Яркость», «Фокус», «Смещение X», «Смещение Y» установите в среднее положение. «Усиление X» и «Усиление Y» — в крайнее левое. «Диапазон» — в состояние «0», «Синхронизация» — в состояние «Внутренняя», а «Ослабление» — в состояние «1:1». Включите тумблер «Сеть». Когда на экране возникнет светящаяся точка, установите ее в центре экрана.
4. Установите ручку регулятора переменного напряжения прибора ВС-24М в крайнее левое положение и включите его в сеть 220 В.
5. Поворачивая ручку прибора ВС-24М по часовой стрелке и пользуясь ручками осциллографа «Усиление Y», «Усиление X», добейтесь того, чтобы петля гистерезиса имела участок насыщения и занимала большую часть экрана.
6. Снимите координаты 10 — 12 точек петли гистерезиса (в том числе в точках  $A, B, C$ , рис. 3.9) в делениях координатной сетки экрана.
7. Зарисуйте петлю гистерезиса на миллиметровой бумаге в таком же масштабе, как на координатной сетке осциллографа.
8. Поворачивая ручку прибора ВС-24М против часовой стрелки, получите на экране осциллографа семейство петель гистерезиса и запишите для каждой из них координаты вершин (точка  $B$ , рис. 3.9). Делайте это до того времени, пока петля не стянется в точку.

9. На графике петли гистерезиса постройте кривую начальной поляризации (кривая  $OA$ , рис. 3.9).

10. Подготовьте прибор М890G для измерения переменного напряжения до 2 В. Для этого переключатель пределов измерения поставьте в состояние «V □ 2». Определите цену деления масштабной сетки шкалы осциллографа  $S_x, S_y$ .

11. Найдите  $D, E$  и  $\varepsilon$  по формулам (9), (10) и (3). Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу:

| № п/п | $X, \text{ мм}$ | $Y, \text{ мм}$ | $E, \text{ В/м}$ | $D, \text{ Кл/м}^2$ | $\varepsilon$ |
|-------|-----------------|-----------------|------------------|---------------------|---------------|
|-------|-----------------|-----------------|------------------|---------------------|---------------|

12. Постройте график  $\varepsilon = f(E)$ .

13. Определите коэрцитивное поле  $E_c$ , остаточную поляризованность  $P_r$  и спонтанную поляризованность  $P_s$  исследуемого образца сегнетоэлектрика.

**У п р а ж н е н и е 2.** *Исследование температурной зависимости диэлектрической проницаемости триглицинсульфата.*

**Описание установки и метода.** Исследуемый образец монокристалла триглицинсульфата находится между пластинами плоского конденсатора, помещенного в трубчатый электронагреватель ЭН (рис. 3.12).

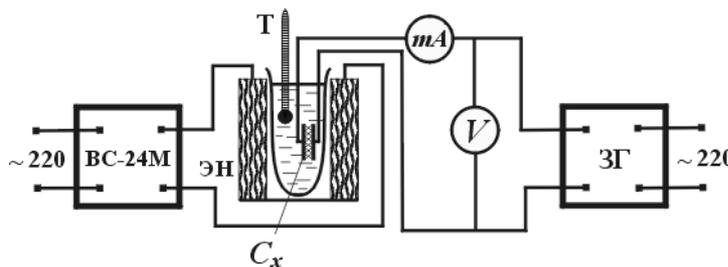


Рис. 3.12

От звукового генератора  $ЗГ$  на конденсатор  $C_x$  подается переменное напряжение, которое измеряется вольтметром  $V$ , расположенным на панели звукового генератора. Ток в цепи измеряется миллиамперметром  $mA$ .

Для питания трубчатого электронагревателя используется прибор BC-24M. В целях обеспечения более равномерного нагревания образца и более точного измерения его температуры, образец вместе с термопарой (прибор М890G) погружен в пробирку с маслом. Если измерить подведенное к образцу напряжение  $U$  и ток в цепи, то можно подсчитать сопротивление  $R_{Cx}$ , которое конденсатор  $C_x$  оказывает переменному току.

$$R_{Cx} = \frac{U}{i}. \quad (11)$$

С учетом того, что

$$R_{Cx} = \frac{1}{\omega C_x} = \frac{1}{2\pi f C_x},$$

а

$$C_x = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d},$$

где  $f$  — частота переменного тока,  $d$  — толщина исследуемого образца,  $S = ab$  — его площадь, вместо (11) получим:

$$\varepsilon = \frac{di}{2\pi f \varepsilon_0 S U}. \quad (12)$$

### Порядок выполнения упражнения

1. Соберите схему согласно рис. 3.12.
2. Включите в сеть 220 В прибор Щ4313 и подготовьте его к измерению тока в пределах до 0,05 мА (50 мкА). Прибор М890G подготовьте к измерению температуры. Для этого его термопару поместите в пробирку вместе с исследуемым образцом и поставьте переключатель в состояние «TYPE THERMOCOUPLE C». На генераторе звуковой частоты установите напряжение 10 В и частоту 1 кГц.
3. Включите в сеть 220 В прибор ВС-24СМ и установите напряжение 30 В.
4. Пробирку с образцом и термопарой поместите в трубчатый электронагреватель.
5. По мере увеличения температуры образца записывайте показания термометра и прибора Щ4313. При изменении температуры от комнатной до 45 °С и от 55 °С до 65 °С отсчеты снимайте через каждые 5 °С, а в интервале температур от 45 °С до 55 °С — через 1 °С.
6. По формуле (12) подсчитайте  $\varepsilon$  при разных температурах. Результаты измерений и расчетов запишите в таблицу:

| № п/п | $t, ^\circ\text{C}$ | $i, \text{мА}$ | $\varepsilon$ | $1/\varepsilon$ |
|-------|---------------------|----------------|---------------|-----------------|
|-------|---------------------|----------------|---------------|-----------------|

7. Постройте график зависимости  $\varepsilon = f(T)$ .
8. Постройте график  $1/\varepsilon = f(T)$  и определите температуру Кюри.

### ЗАДАНИЕ ДЛЯ УИР

Пронаблюдайте за изменением петли гистерезиса сегнетоэлектрика при его нагревании и определите температуру Кюри.



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие вещества называются сегнетоэлектриками?
2. Что такое полярная и неполярная фазы сегнетоэлектриков?

3. Перечислите характерные особенности поляризации сегнетоэлектриков.
4. Какая петля гистерезиса называется максимальной?
5. Что такое точка Кюри?
6. Запишите закон Кюри — Вейса.
7. Что такое спонтанная поляризация?
8. Объясните, почему напряжение на эталонном конденсаторе  $C_0$  (рис. 3.10) пропорционально  $D$ , а на конденсаторе  $C_x$  —  $E$ ?
9. В каких единицах измеряются  $E$ ,  $P$  и  $D$ ?
10. Почему в формулах (8) введен множитель  $\sqrt{2}$ ?
11. Что такое коэрцитивное поле и остаточная поляризованность?
12. Дайте определение вектора поляризованности.
13. Что представляют собой домены?