

## ИССЛЕДОВАНИЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ

### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение основных электрических свойств сегнетоэлектриков и их зависимости от напряженности электрического поля.

### 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

#### 2.1. Спонтанная поляризация

Сегнетоэлектрики – диэлектрики, состоящие из областей-доменов с самопроизвольной (спонтанной) поляризацией. Направление и значение вектора спонтанной поляризации доменов может быть изменено внешним электрическим полем.

Сегнетоэлектрические домены представляют собой совокупность элементарных кристаллических ячеек, имеющих одинаковое направление вектора спонтанной поляризации, т. е. домены обладают макроскопической электрической поляризацией  $P_{СП}$  в отсутствие внешнего электрического поля. Отдельные домены имеют различные направления электрических моментов, и в целом кристалл не создает вокруг себя электрического поля (рис. 8, а).

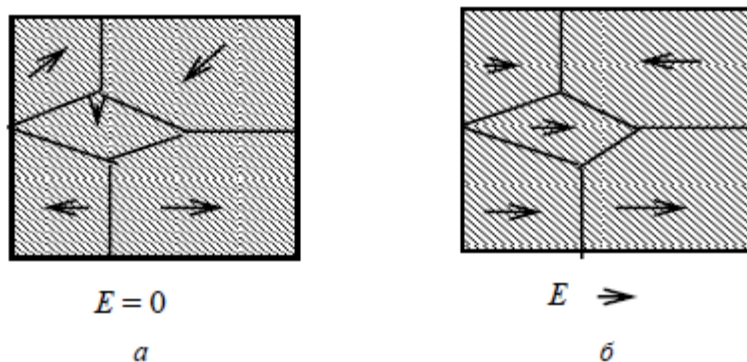


Рис. 8. Схема доменов в сегнетоэлектрике

Спонтанная поляризация  $P_{СП}$  существует только в определенном температурном интервале, когда сегнетоэлектрик имеет доменную структуру.

При температуре фазового перехода, называемой температурой Кюри, происходит изменение структуры кристалла, сопровождаемое возникновением (исчезновением) спонтанной поляризации. При  $t^\circ > t^\circ_{Кюри}$  исчезает электрическая асимметрия элементарной ячейки, пропадает дипольный момент и домены распадаются. В области фазового перехода резко меняются и имеют аномалии почти все свойства кристалла: электрические, оптические, механические и др.

При воздействии внешнего электрического поля электрические моменты доменов ориентируются вдоль поля, создавая наряду с электронной и ионной поляризацией еще один вид – доменную поляризацию (рис. 8, б). Эта поляризация преобладает над другими механизмами. При  $t^\circ > t^\circ_{Кюри}$  домены исчезают и в сегнетоэлектрике наблюдаются только ионная и электронная поляризации (рис. 9). Закон, описывающий поведение диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от температуры в области  $t^\circ > t^\circ_{Кюри}$ , называется законом Кюри-Вейсса и имеет вид:

$$\varepsilon = C/(T - T_{Кюри})$$

где  $C$  – постоянная Кюри, характеризующая материал,  $T$  – температура в К и  $T_{Кюри}$  – температура Кюри, также измеренная в К. Считается, что температура фазового перехода соответствует максимуму диэлектрической проницаемости.

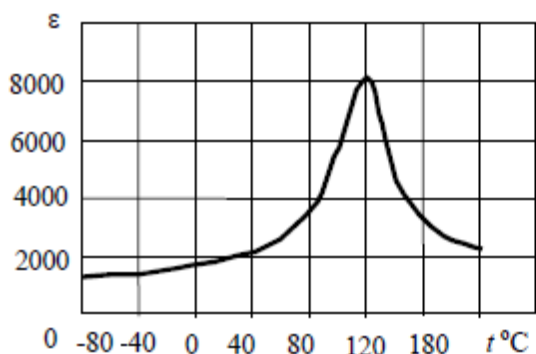


Рис. 9. Зависимость диэлектрической проницаемости  $BaTiO_3$  от температуры

Наиболее распространенным сегнетоэлектриком ионного типа (см. табл. 3) является титанат бария  $BaTiO_3$ . На его примере рассмотрим механизм образования доменов. При температуре выше  $t^\circ_{Кюри}$  ( $120^\circ C$ )  $BaTiO_3$  имеет кубическую элементарную кристаллическую ячейку (рис. 10, а). В центре каждой ячейки расположен ион титана, в вершинах – ионы

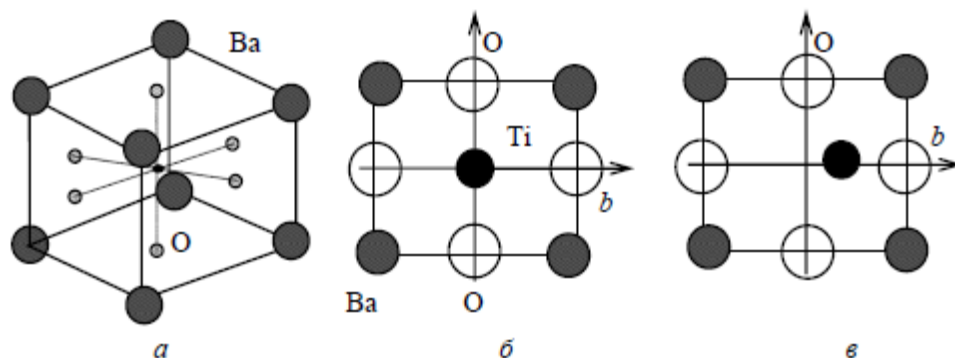


Рис. 10. Элементарная ячейка  $\text{BaTiO}_3$ :  $\bullet$  – ион бария  $\text{Ba}^{+2}$ ;  $\circ$  – ион  $\text{O}^{-2}$ ;  $\cdot$  – ион титана  $\text{Ti}^{+4}$

бария, а в центре граней – ионы кислорода. Каждый ион титана окружен шестью ионами кислорода. Между ионами кислорода и титана существует зазор, так как расстояние между их центрами больше суммы их радиусов (зазор оказывается равным  $0.1\text{E}$ ).

Благодаря своим малым размерам ион  $\text{Ti}$  может легко смещаться от одного иона кислорода к другому. При высокой температуре интенсивности теплового движения достаточно для смещения иона  $\text{Ti}$  от одного иона кислорода к другому, и нахождение  $\text{Ti}$  вблизи каждого из них равновероятно. Среднее положение центра колебаний иона  $\text{Ti}$  совпадает с центром симметрии ячейки, и средняя величина электрического момента каждой ячейки вследствие ее симметрии равна нулю (рис. 10,б).

При  $120^\circ\text{C}$  и ниже энергия теплового колебания  $\text{Ti}$  становится недостаточной, он занимает положение с минимальной энергией, смещаясь от центра кислородного октаэдра на очень малую величину к какому-либо иону кислорода. Это нарушает симметрию расположения заряженных частиц, образующих элементарную ячейку, и возникает электрический момент (рис. 10,в).

Взаимодействие между заряженными частицами соседних ячеек приводит к тому, что смещение ионов  $\text{Ti}$  происходит в них согласованно, в одном направлении. Возникают домены или области, в которых величина и направление вектора спонтанной поляризации одинаковы. В соседних доменах вектор поляризации имеет различные направления, а суммарная поляризация образца равна нулю.

## 2.2. Характерные особенности сегнетоэлектриков

Особенности сегнетоэлектриков состоят в следующем

1. Наличие диэлектрического гистерезиса – отставание поляризации от приложенного напряжения (рис. 11). Причина гистерезиса следующая: при приложении электрического поля электрические моменты доменов, противоположные направлению поля, начинают изменять свою ориентацию. С ростом поля все новые и новые домены вовлекаются в процесс переориентации, что приводит к росту суммарной поляризации образца до тех пор, пока все домены не выстроятся по направлению поля. Наступает насыщение. При уменьшении поля, всилу наличия трения между доменами, процесс переполаризации не проходит по первоначальной кривой, а идет с некоторым отставанием, сохраняя остаточное значение поляризации. Для полного снятия поляризации необходимо приложить поле  $E_c$  обратного направления, называемое коэрцитивным полем.

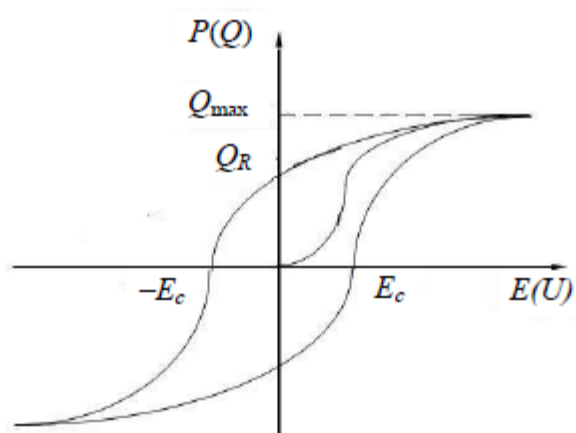


Рис. 11. Зависимость поляризованности (заряда) сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля (петля гистерезиса):

$E_c$  – коэрцитивное поле;  $Q_R$  – остаточный заряд

Площадь петли гистерезиса пропорциональна энергии, рассеянной за один период, или «потерям на гистерезис».

2. Нелинейная зависимость поляризованности  $P$  или заряда  $Q$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  от напряженности внешнего электри-



ческого поля (рис. 12). Именно поэтому сегнетоэлектрики являются нелинейными диэлектриками.

3. Значительная зависимость диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  от температуры с аномально большим максимумом  $\epsilon$  при температуре Кюри. После  $t^{\circ}_{\text{Кюри}}$   $\epsilon$  резко уменьшается до значения, обусловленного электронной и ионной поляризацией.

4. Высокое и сверхвысокое значение  $\epsilon \gg 10^3 \dots 10^4$ . Эффект такой сильной поляризации обусловлен тем, что под воздействием внешнего электрического поля ориентируются электрические моменты доменов, а не отдельных атомов или молекул.

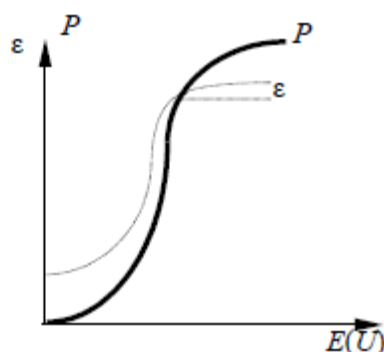


Рис. 12. Зависимости поляризованности  $P$  и диэлектрической проницаемости от величины напряженности приложенного электрического поля

### 2.3. Типы сегнетоэлектриков, их применение

В изучение сегнетоэлектричества и создание новых сегнетоэлектрических материалов большой вклад внесли работы советских ученых И.В. Курчатова, П.П. Кобеко, Б.М. Вула.

В настоящее время известно значительное число сегнетоэлектриков, отличающихся химическим составом, кристаллической структурой и свойствами. По механизму возникновения спонтанной поляризации все сегнетоэлектрики можно разделить на две группы (примеры даны в табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Кристалл	$t^{\circ}_{\text{Кюри}}$	$\epsilon$
Дополнительные сегнетоэлектрики		
$\text{KNa}(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	+ 24, - 18	$\approx 9000$
$\text{LiNH}_4(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6) \cdot \text{H}_2\text{O}$	- 167	$\approx 9000$
ионные		
$\text{BaTiO}_3$	+ 120	$\approx 10^4$
$\text{KNbO}_3$	+ 435	$\approx 10^4$
$\text{NaNbO}_3$	+ 640	$\approx 10^4$

1-я группа – возникновение  $P_{СП}$  обусловлено упорядочением определенных элементов структуры (например, водородных связей).

Сюда относятся сегнетова соль и другие дополнительные сегнетоэлектрики.

2-я группа – возникновение  $P_{СП}$  связано со смещением некоторых ионов, занимавших в структуре centrosymmetric положение при температуре выше  $t^{\circ}_{Кюри}$ . Сюда относятся титанаты и аналогичные им вещества – это ионные сегнетоэлектрики.

Сегнетоэлектрики используются для изготовления нелинейных конденсаторов (сегнетокерамика типа ВК-1, ВК-2, ВК-3, ВК-4). Такие конденсаторы-вариконды применяются в различных схемах, где нужна нелинейность: для умножения и деления частоты; для детектирования сигналов; для создания частоты модуляции в схемах реле времени; в ячейках памяти; для создания диэлектрических усилителей и других устройств. В качестве материалов для варикондов чаще всего выступают твердые растворы систем  $Ba(Ti, Sn)O_3$ ,  $Pb(Ti, Zr, Sn)O_3$ . Использование твердых растворов в системе сегнетоэлектрика позволяет варьировать основные параметры материала в широких пределах (рис. 13).

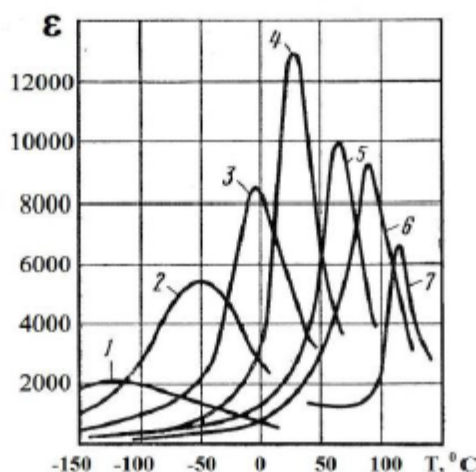


Рис. 13. Зависимости от температуры диэлектрической проницаемости твердых растворов  $BaTiO_3 - BaZrO_3$  при частоте 1 кГц и напряженности поля 1 кВ/м:

1 – 60 % мол.  $BaTiO_3$ ; 2 – 70 %; 3 – 75 %; 4 – 80 %;  
5 – 85 %; 6 – 90 %; 7 – 100 %

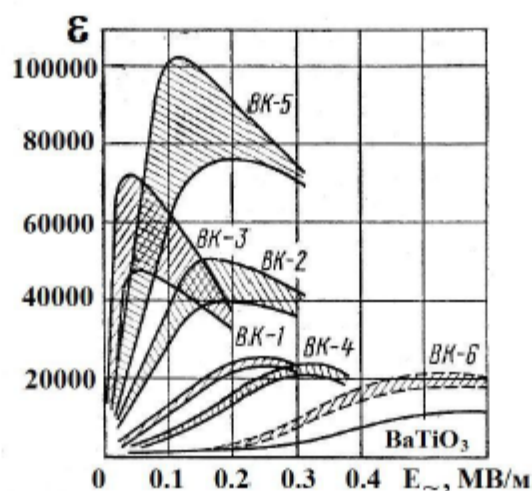


Рис. 14. Зависимости  $\epsilon$  материалов для варикондов от напряженности переменного электрического поля

На рис. 13 показана зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для одной из таких систем  $\text{BaTiO}_3 - \text{BaZrO}_3$  с разным содержанием компонентов в растворе. Ясно видно, что как значение диэлектрической проницаемости, так и величина точки Кюри сильно изменяются при изменении концентрации  $\text{BaZrO}_3$  в растворе. Аналогичное поведение можно наблюдать для распространенных варикондов типа ВК, построенных на основе титаната бария, окиси олова, окиси хрома и борной кислоты. Пример изменения величины диэлектрической проницаемости и максимальной напряженности внешнего поля для разных составов такой системы показан на рис. 14. Из этого рисунка можно видеть, что величина максимальной диэлектрической проницаемости сильно зависит от марки вариконда, т.е. от состава диэлектрика.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

#### 3.1. Описание установки

Свойства сегнетоэлектриков исследуются на осциллографической установке ИСХ1 с использованием измерительного стенда СЗ-РМ02, принципиальная схема которого показана на рис. 15.

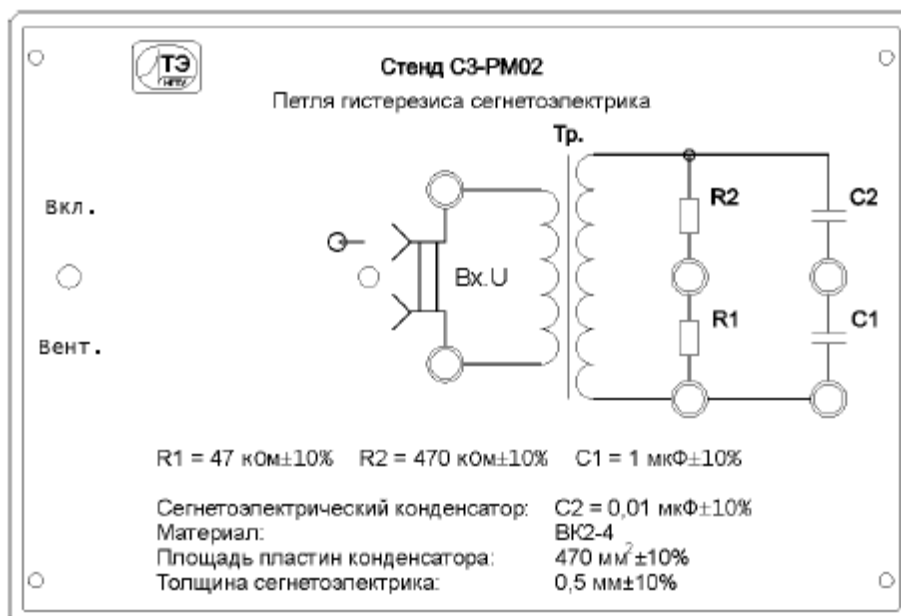


Рис. 15. Схема стенда для исследования сегнетоэлектриков

Стенд содержит группу объектов исследования, имеющих следующие характеристики:

– два постоянных резистора, формирующих делитель:

R1 = 47 кОм ±10 %;

R2 = 470 кОм ±10 %;

– два конденсатора:

C1 = 1 мкФ ±10 %;

C2 = 0.01 мкФ ±10 %, сегнетоэлектрический, находящийся на термостатированной площадке и имеющий следующие характеристики:

материал ВК2-4;

площадь пластин  $S = 470 \text{ мм}^2 \pm 10 \%$ ;

толщина сегнетоэлектрика  $D = 0.5 \text{ мм} \pm 10 \%$ .

**Устройство и принцип работы измерителя статических характеристик ИСХ1**

Органы управления прибором показаны на рис. 16, а.

На передней панели прибора расположены:

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 « $K_{yc}$ »;
- 8 – кнопка уменьшения выбранной величины «←»;
- 9 – кнопка увеличения выбранной величины «→»;
- 10 – кнопка выключателя «Сеть»;
- 11 – выход генератора;
- 12 – вход тока I;
- 13 – вход напряжения U1;
- 14 – вход напряжения U2;
- 15 – ручка регулировки контраста изображения «Контраст»;

Экран дисплея, разделенный на два поля, показан на рис. 16, б:

- поле отображения сигнала;
- информационное поле.

Поле отображения сигнала содержит координатную сетку, на которую накладывается измеряемый сигнал.

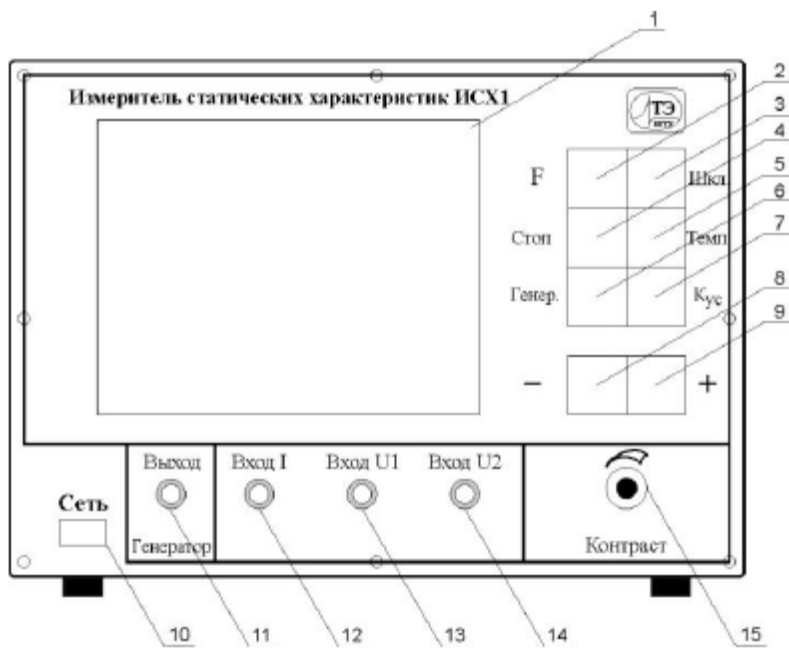
Информационное поле разделено на 4 области:

- область общих установок: отображает режим работы прибора (строка «Режим»), шкалу развертки (строка «Шкала») и состояние стоп-кадр (строка «Стоп»);

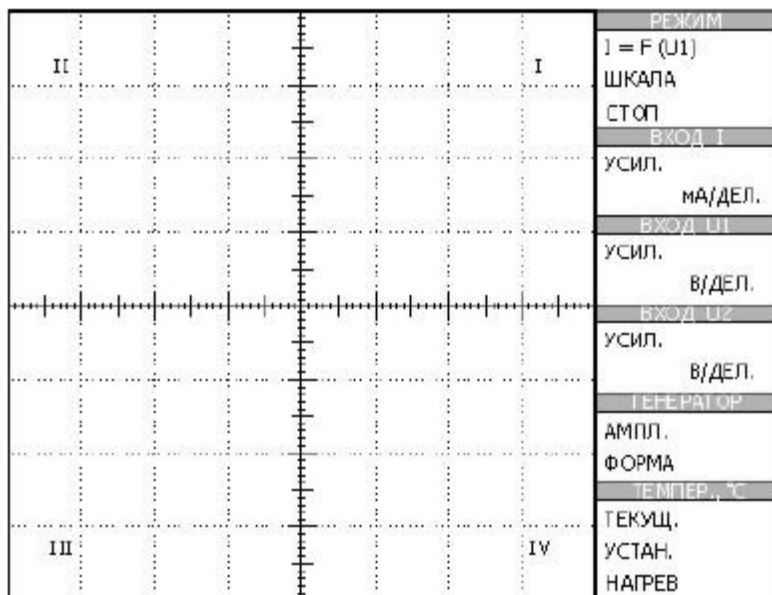
- область состояния входа I, входа U1 и входа U2: отображает коэффициенты отклонения каналов;

- 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»).



а



б

Рис. 16. Общий вид панели и экрана дисплея установки ИСХ1

### 3.2. Включение и подготовка установки к работе

После включения установки ИСХ1, используя соединительные провода, необходимо подключить стенд СЗ-РМ02 к измерительным клеммам прибора. Для этого сигнал с генератора подается на первичную обмотку повышающего трансформатора, а выходной сигнал  $U_2$  снимается с эталонного конденсатора  $C_1$ , так как напряжение на нем пропорционально его заряду (и заряду на конденсаторе  $C_2$ , так как при последовательном включении конденсаторов их заряды равны). При этом на горизонтальный вход осциллографа подается напряжение с резистора  $R_1$ , которое связано с общим падением напряжения во второй обмотке  $U$  следующим образом:  $U = U_1(1+R_2/R_1)$ . Таким образом, по горизонтальной оси осциллограммы откладывается значение напряжения, а по вертикальной – значения заряда.

#### *Порядок работы с прибором*

1. Для включения прибора нажмите кнопку «Сеть» 10, при этом загорится индикатор 1. Прогрейте прибор 5 мин.
2. Регулировка контраста изображения проводится вращением ручки 15 «КОНТРАСТ».
3. Соберите электрическую схему.
4. Для переключения режима работы нажмите кнопку 2 «F». При этом должен подсветиться текущий режим работы. Затем кнопками «+» или «-» выберите необходимый режим:  
 $I=F(U_1)$  (вольт-амперная характеристика);  
 $U_2=F(U_1)$  (статическая характеристика);  
 $U_2=F(I)$  (передаточная характеристика).
5. Установите требуемый сигнал на выходе генератора. Для этого одиночным нажатием кнопки «Генер.» подсветите строку «ФОРМА» и кнопками «+» и «-» выберите необходимую форму сигнала (синусоидальная, треугольная). **В работе используется синусоидальная форма сигнала.** Повторным нажатием кнопки «Генер.» подсветите строку «АМПЛ.» и кнопками «+» и «-» установите необходимую амплитуду выходного сигнала (в вольтах).
6. Смещение графиков сигналов относительно координатной сетки по вертикали осуществляется регуляторами 12 и 14.
7. Для смещения графиков сигналов относительно координатной сетки по горизонтали необходимо нажать кнопку 5 «↔». Кноп-

кой «+» или «-» установите нужное положение. При этом высвечивается направление смещения → или ← соответственно. Перемещение наблюдаемого сигнала осуществляется не более чем на S дисплея. При ограничении перемещения высвечивается соответствующий символ.

8. Для изменения коэффициента отклонения нажмите кнопку б «К<sub>yc</sub>». При этом подсветится надпись «УСИЛ.» того канала, который соответствует выбранному режиму работы. Если режим работы предполагает совместное использование двух каналов, то переход между выбором коэффициентов отклонения каналов осуществляется повторным нажатием кнопки б «К<sub>yc</sub>».

Установить необходимое значение коэффициента отклонения для выбранного канала можно при помощи кнопок «+» или «-».

9. Для включения режима «Стоп-кадр» необходимо нажать кнопку 4 «СТОП». При этом кадр будет остановлен для проведения измерений. Для выхода из этого режима необходимо нажать кнопку «СТОП» повторно. В режиме «Стоп-кадр» активна только кнопка «↔».

10. Установка требуемой температуры (по умолчанию образцы имеют температуру окружающей среды) осуществляется нажатием кнопки «ТЕМП» и последующим выбором кнопками «+» и «-» температуры, до которой необходимо нагреть образцы. В строке «УСТАН.» отображается заданная температура, а в строке «ТЕКУЩ.» ее текущее значение. Для регулировки температуры сегнетозлектрика стенд снабжен вентилятором.

11. Если при включении прибора или во время его работы происходят какие-нибудь сбои, рекомендуется известить преподавателя.

### **3.3. Градуировка горизонтальной и вертикальной осей осциллографа**

Вычисляют масштаб горизонтальной оси (оси напряжений) по формуле

$$M_U = \frac{U_{\max}}{L} = \frac{K_{yU1} R2}{10\text{мм} R1}, \text{ В/мм}, \quad (15)$$

где  $U_{\max}$  – амплитуда приложенного напряжения;  $K_{yU1}$  – показания коэффициента усиления сигнала по входу  $U1$  (В/дел);  $L$  – отклонение по горизонтальной оси, соответствующее амплитуде приложенного напряжения, мм.



Вычисляют масштаб вертикальной оси (оси зарядов) по формуле

$$m_Q = \frac{Q_m}{H} = \frac{K_{yU2} \cdot C1}{10\text{мм}}, \text{ (Кл /мм)},$$

$$C1 = 1 \text{ мкФ}, \quad (16)$$

где  $Q_m$  – заряд, соответствующий амплитудному значению напряжения на обкладках конденсатора  $C1$ ;  $K_{yU2}$  – показания коэффициента усиления сигнала по входу  $U2$  (В/дел);  $H$  – отклонение по вертикальной оси, мм.

Результаты расчетов сводят в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

$K_{yU1}$	$M_U$	$K_{yU2}$	$m_Q$

### 3.4. Определение основных параметров петли гистерезиса

Определение основных параметров петли гистерезиса проводится при максимальном ее размере. Для получения максимального размаха петли необходимо установить максимальное значение напряжения  $U_{ген} = 10$  В. После этого определить максимальный заряд  $Q_{max}$ , остаточный заряд  $Q_R$  и коэрцитивную силу  $E_C$  (см. рис. 11). Данные занести в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

$X_{max}$	$Y_{max}$	$Q_{max}$	$X_R$	$Y_R$	$Q_R$	$X_C$	$Y_C$	$E_C$

### 3.5. Построение основной кулон-вольтной кривой сегнетоконденсатора

При помощи генератора сигнала постепенно увеличивают напряжение  $U_{ген}$  от нуля до 10 В ступенями 1 В. На экране осциллографа получаются все увеличивающиеся петли гистерезиса. При этом каждый раз заносят в табл. 6 координаты положительной вершины петли, т.е. координаты амплитудных значений заряда  $Q_m$  и напряжения  $U_m$ .

Кривая, соединяющая вершины петель, есть основная кулон-вольтовая кривая (рис. 11, начальная кривая). Для ее построения удобно использовать режим «СТОП-кадр».

**Замечание.** Для более точного определения координат вершин при малых значениях  $U_{ген}$ , изменяйте коэффициенты усиления по осям  $K_{yU1}$ ,  $K_{yU2}$ , чтобы размер кривой был больше 5 мм x 5 мм.

### 3.6. Определение эффективной емкости и эффективной диэлектрической проницаемости

Эффективная емкость – емкость при переменном напряжении. Это емкость такого линейного конденсатора, заряд которого  $Q_m$  при амплитудном напряжении  $U_m$  равен заряду нелинейного конденсатора при том же напряжении. Эффективная емкость равна отношению максимального заряда на обкладках конденсатора к амплитуде приложенного напряжения:

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{h}, \quad (17)$$

$$C_{эф} = \frac{Q_m}{U_m}. \quad (18)$$

Поскольку основная кулон-вольтовая кривая представляет собой зависимость  $Q_m$  от  $U_m$ ,  $C_{эф}$  в любой точке прямо пропорциональна отношению  $Y/X$  в этой точке.

По построенной кулон-вольтовой кривой вычисляют величины эффективной емкости для различных напряжений (через 1 В):

$$C_{эф} = \frac{m_Q}{M_U} \frac{Y}{X}. \quad (19)$$

**Замечание.** При расчете  $C_{эф}$  следует использовать выражения (15), (16) для расчета масштабных коэффициентов при измененных значениях  $K_{yU1}$ ,  $K_{yU2}$ .

Результат вычислений заносят в табл. 6 и строят зависимость

$$C_{эф} = f(U_m).$$

Т а б л и ц а 6

$U_{ген}$	$Y$	$X$	$K_{yU1}$	$K_{yU2}$	$Q_m$	$U_m$	$C_{эф}$	$\epsilon_{эф}$	$E$

Значение эффективной диэлектрической проницаемости находят по формуле плоского конденсатора:

$$\varepsilon_{\text{эф}} = \frac{C_{\text{эф}} h}{\varepsilon_0 S}; \quad \varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} (\text{Ф/м}), \quad (20)$$

где  $h$  – толщина конденсатора;  $S$  – площадь конденсатора.

Напряженность электрического поля в образце вычисляется по формуле

$$E = \frac{U_m}{h}, \text{ В/м.} \quad (21)$$

Полученные значения  $\varepsilon_{\text{эф}}$  и  $E$  для соответствующих напряжений вписывают в табл. 6. Строится зависимость  $\varepsilon_{\text{эф}}(E)$ .

### 3.7. Определение температуры Кюри

Определение температуры Кюри проводится по зависимости диэлектрической проницаемости от температуры  $\varepsilon(T)$  для максимальной петли гистерезиса. Для этого установите напряжение генератора 10 В. Определите  $X$  и  $Y$ -координаты положительной вершины петли гистерезиса. Данные о координатах вершины и температуре занесите в табл. 7. Установите последовательно следующий температурный ряд: 30, 40, 60, 65, 70, 75 °С. **Интервал между измерениями 3 мин.** Для каждой температуры фиксируйте  $Y$ -координату вершины петли гистерезиса. По окончании измерений отключите нагрев образца и включите вентилятор на стенде. Охлаждение проводите в течение 5 мин. Все данные внесите в табл. 7.

Т а б л и ц а 7

$T, ^\circ\text{C}$	$X$	$U_m$	$Y$	$Q_m$	$C_{\text{эф}}$	$\varepsilon_{\text{эф}}$

Для расчета  $\varepsilon$  используйте выражение (20).

По результатам табл. 7 постройте зависимость  $\varepsilon_{\text{эф}}(T)$  и определите из графика температуру Кюри, как точку максимальной величины диэлектрической проницаемости.

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Принципиальная схема установки.
2. Результаты измерений, табл. 4–6.
3. Формулы, по которым ведутся расчеты.
4. Графики зависимостей  $Q_m = f(U_m)$  (основная кулон-вольтная кривая),  $C_{эф} = f(U_m)$ ,  $\varepsilon_{эф} = f(E, T)$ .
5. Выводы по проделанной работе.

#### 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие материалы называются сегнетоэлектриками? Физическая сущность спонтанной поляризации.
2. Каковы основные свойства сегнетоэлектриков?
3. Что такое диэлектрический гистерезис? Назовите его причины. Что такое остаточный заряд и коэрцитивное поле?
4. Какова зависимость диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  сегнетоэлектрика от  $t^\circ$ ? Что такое  $t^\circ_{\text{Кюри}}$ , какие процессы происходят в кристалле сегнетоэлектрика при переходе через  $t^\circ_{\text{Кюри}}$ ?
6. Объясните зависимость  $\varepsilon$  от  $E$ .
7. Почему и как с помощью гистерезисной петли можно определить потери и  $\text{tg}\delta$ ? Почему на экране осциллографа можно наблюдать зависимость  $Q-U$  для испытуемого конденсатора?
8. Типы сегнетоэлектриков, их применение.
9. Заряд плоского конденсатора с электродами  $10 \times 10 \text{ мм}^2$  равен  $0.1 \text{ нКл}$ . Определить емкость и разность потенциалов между электродами, если расстояние между ними  $5 \text{ мм}$ , а  $\varepsilon = 5$ . Как изменится емкость, если в качестве диэлектрика взять сегнетоэлектрик с  $\varepsilon = 5000$ ?
10. Заряд плоского конденсатора с электродами  $15 \times 15 \text{ мм}^2$  равен  $0.1 \text{ нКл}$ . Определить емкость и разность потенциалов между электродами, если расстояние между ними  $5 \text{ мм}$ , а в качестве диэлектрика используется титанат бария.
11. Спонтанная поляризация  $P$  монокристаллов титаната бария при комнатной температуре равна  $0.25 \text{ Кл/м}^2$ . Предполагая, что причиной возникновения спонтанной поляризации является только смещение иона титана из центра элементарной кубической ячейки, определить величину этого смещения  $\Delta l$ . Период элементарной кристаллической ячейки  $a = 0.4 \text{ нм}$ .