

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)
Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)

Н.И. Кузбных, Р.М. Капилевич

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ

*Руководство к лабораторной работе для студентов специальности
211000 Конструирование и технология электронных средств*

СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение.....	3
2 Общие сведения о сегнетоэлектриках.....	3
2.1 Спонтанная поляризация кристаллов.....	3
2.2 Доменная структура сегнетоэлектриков.....	5
2.3 Поведение сегнетоэлектриков во внешнем электрическом поле.....	7
2.3.1 Зависимость поляризованности кристалла от напряжённости поля.....	7
2.3.2 Петля гистерезиса.....	8
2.3.3 Зависимость диэлектрической проницаемости от напряжённости электрического поля.....	9
2.3.4 Зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от температуры.....	10
3 Экспериментальная часть.....	11
3.1 Описание лабораторной установки.....	11
3.2 Основы осциллографического метода исследования сегнетоэлектриков.....	12
3.3 Порядок выполнения лабораторной работы	13
3.4 Методические указания.....	14
3.4.1 Подготовка лабораторной установки к исследованиям.....	14
3.4.2 Расчетные соотношения.....	15
4 Контрольные вопросы.....	16
Рекомендуемая литература.....	16

1 ВВЕДЕНИЕ

Сегнетоэлектрики – кристаллические диэлектрики, обладающие в определенном диапазоне низких температур (до точки Кюри T_K) **спонтанной поляризацией**. Они, в отличие от пассивных диэлектриков, **самопроизвольно поляризованы** при отсутствии внешнего электрического поля и относятся к **активным** диэлектрикам. Свое название «Сегнетоэлектрики» получили от *сегнетовой соли*, в которой впервые были обнаружены эти необычные свойства. Но сегнетова соль из-за низких физических свойств оказалась непригодной для практических целей. Лишь с открытием спонтанной поляризации у *титаната бария* ($BaTiO_3$) сегнетоэлектрики получили широкое применение, прежде всего в радиоэлектронике. Благодаря высоким значениям диэлектрической проницаемости ϵ они используются в качестве диэлектрика в производстве низкочастотных сегнетокерамических конденсаторов, обладающих высокой удельной емкостью. Существенная зависимость ϵ сегнетоэлектриков от напряженности электрического поля используется в нелинейных конденсаторах – варикондах. Сегнетоэлектрики относятся к числу наиболее перспективных материалов твердотельной электроники.

Целью данной работы является экспериментальные исследования диэлектрических свойств сегнетоэлектриков при изменении напряженности электрического поля и температуры.

2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКАХ

2.1 Спонтанная поляризация кристаллов

Сегнетоэлектрик - это диэлектрик, обладающий спонтанной поляризацией. Рассмотрим явление спонтанной поляризации на примере титаната бария, на основе которого разработано большое количество материалов, широко применяемых в электронной технике.

Кристаллическая структура титаната бария в зависимости от температуры может принимать различную форму. Температура, при которой происходит изменение кристаллической структуры, называется *температурой сегнетоэлектрического фазового перехода* или *точкой Кюри* (T_K).

При температурах выше T_K титанат бария имеет кубическую структуру, схематическое изображение которой приведено на рис 2.1, а. В узлах куба расположены ионы бария, ионы кислорода находятся в центрах граней, а ион титана – в центре куба. Ион титана окружён шестью ионами кислорода, образующими октаэдр (рисунок 2.1,б). При этом расстояние между ионами кислорода в октаэдре больше размеров иона титана, что позволяет ему перемещаться между ионами кислорода. При температурах выше точки Кюри ($T > T_K$) ион титана располагается в центре октаэдра (энергия связей минимальна), а ячейка титаната бария имеет центр симметрии и электрический момент его равен нулю ($m = 0$). Поэтому он вдет себя как линейный диэлектрик.

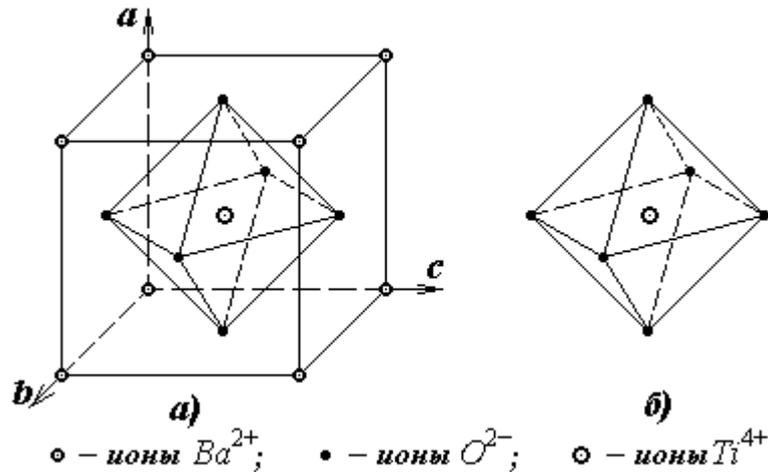


Рисунок 2.1 – Кристаллическая структура титаната бария

При снижении температуры **в точке Кюри** ($T=T_K$) происходит **фазовый переход** – кристаллическая решётка ячейки переходит из кубической формы в тетрагональную (рисунок 2.2). При этом размеры ячейки вдоль осей a и b уменьшаются, а вдоль оси c – увеличиваются. Ион титана смещается по оси c к одному из ионов кислорода. **Появляется электрический момент ячейки** ($m > 0$), то есть происходит самопроизвольная (спонтанная) поляризация. Вектор спонтанной поляризации совпадает с осью c .

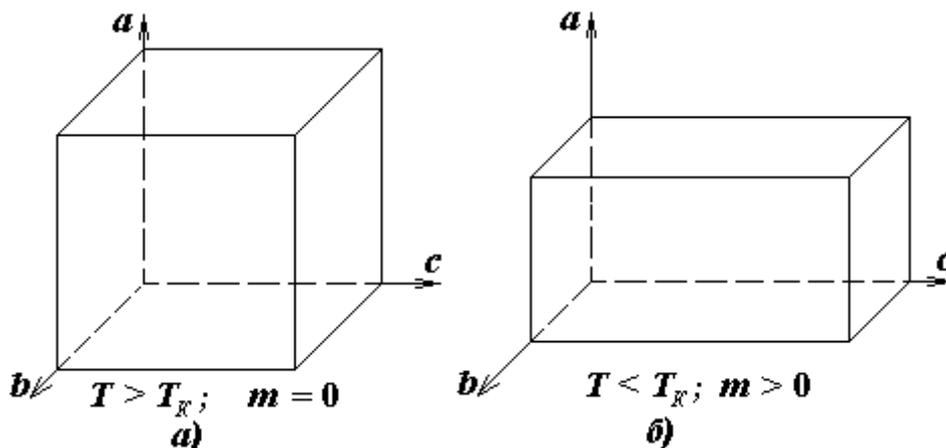


Рисунок 2.2 – Изменение структуры титаната бария при фазовом переходе

Рассмотрим подробнее взаимодействие ионов в элементарной ячейке. Известно, что в кристалле ионы располагаются на определённом расстоянии друг от друга и энергия закрепления иона (потенциальная энергия W) зависит от расстояния между ними. Возможны два вида потенциального рельефа:

1) при плотной упаковке ионов потенциальный рельеф имеет вид кривой с одним минимумом (рисунок 2.3,а);

2) при неплотной упаковке ионов потенциальный рельеф имеет вид кривой с двумя минимумами, так называемыми потенциальными ямами (рисунок 2.3,б).

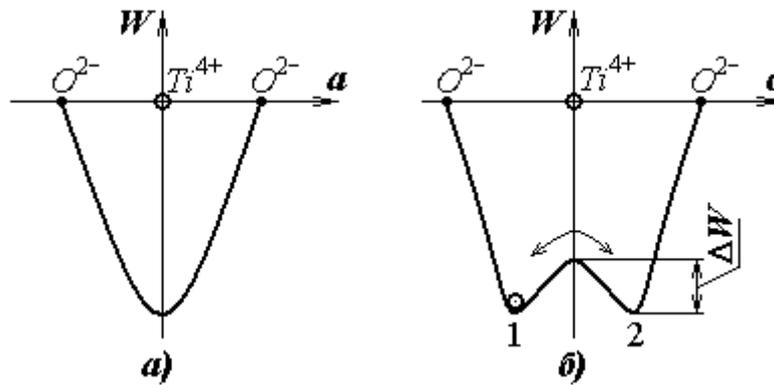


Рисунок 2.3 – Зависимость потенциальной энергии иона титана от его положения в решётке

Если температура кристалла **выше точки Кюри**, то по всем трём осям (**a**, **b** и **c**) потенциальная энергия иона титана описывается кривой с двумя минимумами. Но так как кинетическая энергия иона титана больше ΔW , то он может совершать перескоки между всеми шестью ионами кислорода. В этом случае ячейка симметричная и не имеет электрического момента.

При температуре **ниже точки Кюри** происходит перестройка ячейки. Вдоль осей **a** и **b** размеры ее уменьшаются. В этих направлениях ячейка будет иметь плотную упаковку, а потенциальная энергия ионов титана будет описываться кривой, представленной на рисунок 2.3,а. Вдоль оси **c** сохраняется неплотная упаковка ионов, но температура мала и кинетическая энергия иона титана меньше ΔW (рисунок 2.3,б). Поэтому ион титана закрепляется около одного из ионов кислорода, расположенных вдоль оси **c**, т.е. нарушается симметрия и появляется электрический момент ячейки. При этом электрический момент появляется без воздействия внешнего электрического поля, самопроизвольно, т.е. *самопроизвольно произошла поляризация*. Эта поляризация носит название *спонтанной*. Итак, **спонтанная поляризация** – это электрическая поляризация, возникающая в диэлектрике самопроизвольно, без внешних воздействий. В спонтанной поляризации основную роль играют ионы титана и ионы кислорода, расположенные на сегнетоэлектрической оси (их называют ещё активными ионами кислорода).

2.2 Доменная структура сегнетоэлектриков

Сегнетоэлектрический кристалл можно представить в виде упрощенной двумерной модели (рисунок 2.4,а).

Положительные ионы Ti^{4+} располагается на горизонтальных линиях, соединяющих ионы кислорода O^{2-} . В равновесном состоянии ион титана находится ближе к одному из двух соседних ионов кислорода. Причём он может быть ближе как к правому, так и к левому ионам кислорода, расположенным на оси **c**. Такая ситуация возможна, так как потенциальный рельеф между ионами имеет вид, представленный на рисунке 2.3,б.

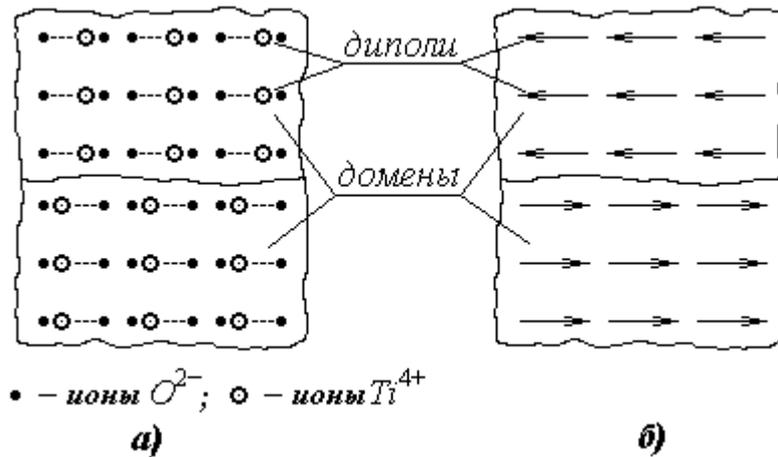


Рисунок 2.4 – Двумерная упрощенная модель сегнетоэлектрического кристалла

Для ионов Ti^{4+} между двумя активными ионами кислорода возможны два положения равновесия, соответствующие минимуму потенциальной энергии. Ионы титана могут перескакивать из одного положения в другое, но для этого им нужно сообщить энергию, достаточную для преодоления потенциального барьера ΔW . Эту энергию ион может получить либо от внешнего электрического поля, либо при нагревании сегнетоэлектрика.

В отсутствие внешнего электрического поля ионы титана в пределах некоторой конечной области располагаются ближе к ионам кислорода, находящимся слева (верхняя часть рисунка 2.4,а) или справа (нижняя часть рисунка 2,4,а). В этом случае кристалл является спонтанно поляризованным. Направление спонтанной поляризации называется *полярной осью*.

Электрическую структуру кристалла можно схематически представить в виде совокупности диполей, одинаково ориентированных в пределах некоторой части кристалла (рисунок 2.4,б). *Области в сегнетоэлектриках, имеющие пространственно-однородное упорядочение дипольных моментов элементарных ячеек, называются доменами*. Сегнетоэлектрик, имеющий одинаковую поляризацию по всему объёму, называется *однодоменным* и обладает ярко выраженной полярностью (его можно считать электрическим аналогом постоянного магнита). Однако такая полярность внешне, как правило, не проявляется. Она бывает скомпенсирована внешними зарядами, осевшими на поверхности кристалла. Обнаружить её можно, например, при нагревании образца, когда изменение поляризации приводит к появлению зарядов на поверхности кристалла. Однодоменное состояние является энергетически невыгодным, поэтому, как правило, сегнетоэлектрический кристалл в отсутствие внешнего поля состоит из нескольких (или большого числа) доменов с разным направлением поляризации. При этом в целом сегнетоэлектрический кристалл является электрически нейтральным (векторная сумма электрических моментов доменов равна нулю).

2.3 Поведение сегнетоэлектриков во внешнем электрическом поле

Наличие спонтанной поляризации и доменов в сегнетоэлектриках, в отличие от линейных диэлектриков, приводит к целому ряду особых свойств: ярко выраженная нелинейность поляризованности от напряженности электрического поля и от температуры, наличие температуры Кюри, петли гистерезиса и др.

Рассмотрим зависимость свойств сегнетоэлектриков от напряжённости электрического поля при следующих условиях:

- 1) температура окружающей среды значительно ниже температуры Кюри и не изменяется ($T_{окр.} = \text{const}$);
- 2) ограничимся двумерной моделью сегнетоэлектрика (рисунок 2.4);
- 3) направление внешнего электрического поля совпадает с направлением сегнетоэлектрической оси c (рисунок 2.1).

2.3.1 Зависимость поляризованности кристалла от напряжённости поля

Сегнетоэлектрики – ионные кристаллические диэлектрики. В них кроме спонтанной существуют упругие поляризации – электронная и ионная.

Предположим, что первоначально кристалл состоит из одинакового числа положительных и отрицательных доменов (с диполями, ориентированными вправо и влево, как показано на рисунке 2.4). В этом случае суммарная поляризованность кристалла в отсутствие внешнего поля равна нулю. Если на кристалл действует в положительном направлении слабое электрическое поле, которое не в состоянии переориентировать домены (перебросить ионы титана от одного иона кислорода к другому по направлению электрического поля), то связь между поляризованностью P и напряжённостью поля E за счёт упругой поляризации будет близка к линейной и кристалл будет вести себя как обычный диэлектрик. На графике зависимости $P(E)$ (рисунок 2.5) этот процесс отображен на участке **1** – линейная зависимость.

При дальнейшем увеличении напряжённости электрического поля векторы электрических моментов доменов, не совпадающие с направлением E , начнут переориентироваться в направлении вектора поля. Поляризованность будет быстро нарастать (участок **2**, рисунок 2.5) до тех пор, пока векторы всех доменов не будут ориентированы по полю. В конце участка **2** кристалл будет состоять только из одного домена. Очевидно, что ориентация электрических моментов доменов, уже ориентированных по полю, не меняется. Дальнейшее увеличение E приведёт к незначительному линейному росту поляризованности в результате увеличения электрического момента каждого диполя (электронная и ионная поляризации, участок **3**, рисунок 2.5). Зависимость поляризованности от напряжённости поля на третьем участке можно описать уравнением

$$P = P_{сп} + \chi \cdot E, \quad (2.1)$$

где $P_{сп}$ – поляризованность, за счёт спонтанной поляризации;

$\chi \cdot E$ – упругие поляризации (электронная и ионная);

χ – диэлектрическая восприимчивость.

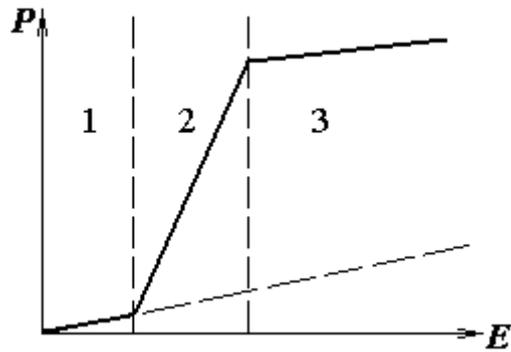


Рисунок 2.5 – Зависимость поляризованности от напряжённости поля

Таким образом, при увеличении напряжённости электрического поля поляризованность сегнетоэлектрического кристалла изменяется резко нелинейно.

2.3.2 Петля гистерезиса

Второй особенностью сегнетоэлектриков является наличие петли гистерезиса при воздействии на него переменного электрического поля (рисунок 2.6).

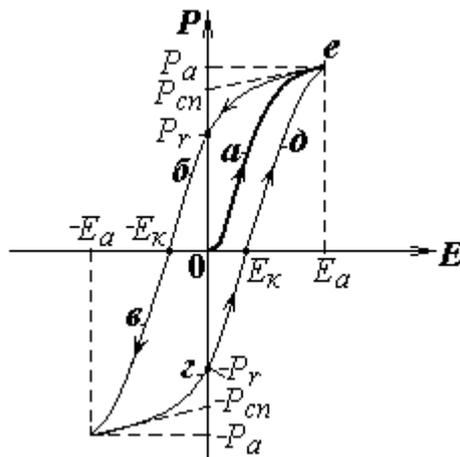


Рисунок 2.6 – Петля гистерезиса титаната бария

Если сегнетоэлектрик не поляризован, то на начальном этапе его поляризация пойдет по кривой a , называемой *начальной кривой поляризации*. Насыщение до спонтанной поляризации сегнетоэлектрика наступает при напряжённости поля E_a . Затем при уменьшении напряжённости поля поляризованность тоже уменьшается, но по другому закону (участок b на рисунке 2.6). При напряжённости поля $E = 0$ значительная часть доменов остается ориентированной в положительном направлении поля, то есть в кристалле будет наблюдаться *остаточная поляризованность* P_r . Экстраполяция линейного участка кривой b до пересечения с осью поляризации P даёт величину спонтанной поляризованности при насыщении P_{sp} . Чтобы уменьшить поляризованность кристалла до нуля, необходима напряжённость поля E_k в отрицательном направлении. Такая

напряжённость электрического поля, необходимая для переориентации сегнетоэлектрических доменов, называется *коэрцитивной силой*.

Дальнейшее увеличение напряжённости поля в отрицательном направлении до величины $-E_a$ приводит к переориентации всех электрических моментов диполей в этом направлении (участок *в*). Если ещё раз изменить направление вектора напряжённости электрического поля E , то цикл изменения поляризации будет завершён (участки *г* и *д*). Таким образом, зависимость $P(E)$ будет описываться петлёй гистерезиса.

Параметры петли гистерезиса определяются физической природой сегнетоэлектрика и, в частности, формой и параметрами потенциальной кривой (рисунок 2.3). Очевидно, что чем выше потенциальный барьер ΔW , тем больше величина коэрцитивной силы E_k . Наклон участка насыщения (участок *з*, рисунок 2.5) определяется крутизной стенок потенциальной кривой. Чем они круче, тем более пологим является участок насыщения.

2.3.3 Зависимость диэлектрической проницаемости от напряжённости электрического поля

Известно, что диэлектрическая проницаемость ϵ связана с поляризованностью P следующим уравнением:

$$\epsilon = 1 + \frac{P}{\epsilon_0 E} = 1 + \frac{P_{уп}}{\epsilon_0 E} + \frac{P_{СП}}{\epsilon_0 E} \quad (2.2)$$

где P – поляризованность результирующая;

ϵ_0 – электрическая постоянная;

E – напряжённость электрического поля в диэлектрике;

$P_{уп}$ – поляризованность за счёт упругих процессов поляризации;

$P_{СП}$ – поляризованность за счёт спонтанной поляризации.

В сегнетоэлектриках диэлектрическая проницаемость зависит как от упругих процессов поляризации, так и от спонтанной поляризации. Зная зависимость поляризованности сегнетоэлектрика от напряжённости поля (рисунок 2.5), можно объяснить и зависимость диэлектрической проницаемости от напряжённости поля. Эти зависимости приведены на рисунке 2.7.

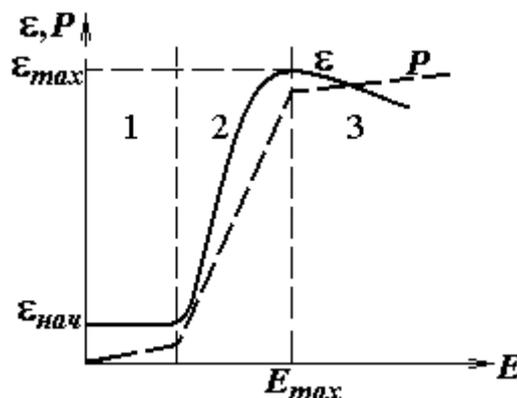


Рисунок 2.7 – Зависимость поляризованности и диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от напряжённости поля

На участке **1** в области слабых полей изменений ориентации электрических

моментов доменов ещё не происходит, то есть сумма спонтанных моментов доменов равна нулю. Диэлектрическая проницаемость определяется только упругими процессами поляризации. Так как $P_{уп}$ линейно зависит от напряжённости E , то $\epsilon = \epsilon_{нач}$ и не зависит от E .

На участке 2 начинается переориентация электрических моментов доменов, резко возрастает спонтанная поляризованность, диэлектрическая проницаемость возрастает за счёт третьего слагаемого уравнения (2.2) – $P_{СП}/\epsilon_0 E$ и достигает максимальной величины ϵ_{max} при $E = E_{max}$.

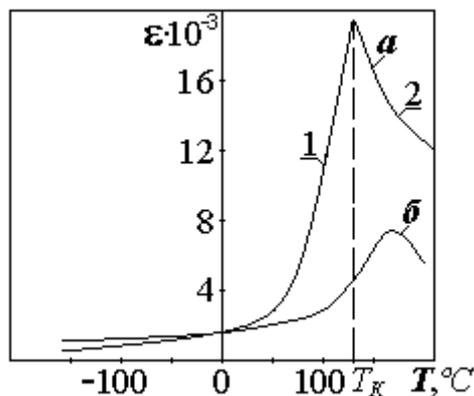
На участке 3 спонтанная поляризация, достигнув максимума, больше не изменяется с увеличением E ($P_{СП} = const$), а диэлектрическая проницаемость уменьшается за счёт второго слагаемого уравнения (2.2) по закону $1/E$.

Как видно из графика (рисунок 2.7), начальную величину диэлектрической проницаемости ($\epsilon_{нач}$) можно определить в слабом электрическом поле.

2.3.4 Зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от температуры

Ранее было показано, что процесс переориентации электрических моментов-доменов связан с переходом ионов титана от одного иона кислорода к другому, т.е. с преодолением потенциального барьера ΔW (рисунок 2.3,б). Этот энергетический барьер может быть преодолен как с помощью внешнего электрического поля, так и за счёт тепловой энергии.

Рассмотрим зависимость диэлектрической проницаемости от температуры в слабых электрических полях (рисунок 2.8). При повышении температуры



а – титанат бария; б – сегнетокерамика типа ВК

Рисунок 2.8 – Зависимости диэлектрической проницаемости от температуры для сегнетоэлектриков

диэлектрика увеличивается кинетическая энергия иона титана, и он легче перемещается из одного устойчивого состояния в другое по направлению вектора напряжённости поля, чем при низких температурах. Поэтому при повышении температуры всё большее число ионов титана смещается по направлению поля. При этом увеличивается поляризованность и растёт ϵ (участок 1). Особенно резкий рост ϵ наблюдается с приближением к точке Кюри.

Это связано с увеличением «податливости» кристаллов к смещениям ионов, которые приводят к изменению структуры при фазовом переходе. При температуре Кюри происходит перестройка кристаллической решётки (см. рисунок 2.2). Выше точки Кюри тепловое движение ионов титана в решётке возрастает настолько, что всё больше препятствует направленному смещению ионов титана по вектору напряжённости поля. В связи с этим уменьшается поляризованность вещества, а значит и ϵ (участок 2 рисунок 2.8.). В точке Кюри значение диэлектрической проницаемости проходит через максимум. Различают *фазовый переход первого рода*, когда свойства сегнетоэлектрика изменяются скачком, и *второго рода* – свойства изменяются плавно. На рисунке 2.8 приведены зависимости $\epsilon(T)$ для титаната бария и для конденсаторной сегнетокерамики типа ВК. У титаната бария наблюдается фазовый переход первого рода, а у ВК – второго рода. Для всех сегнетоэлектриков характерны большие значения ϵ , особенно в области фазового перехода.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1 Описание лабораторной установки

Схема электрическая принципиальная лабораторной установки представлена на рисунке 3.1. Лабораторная установка включает в себя:

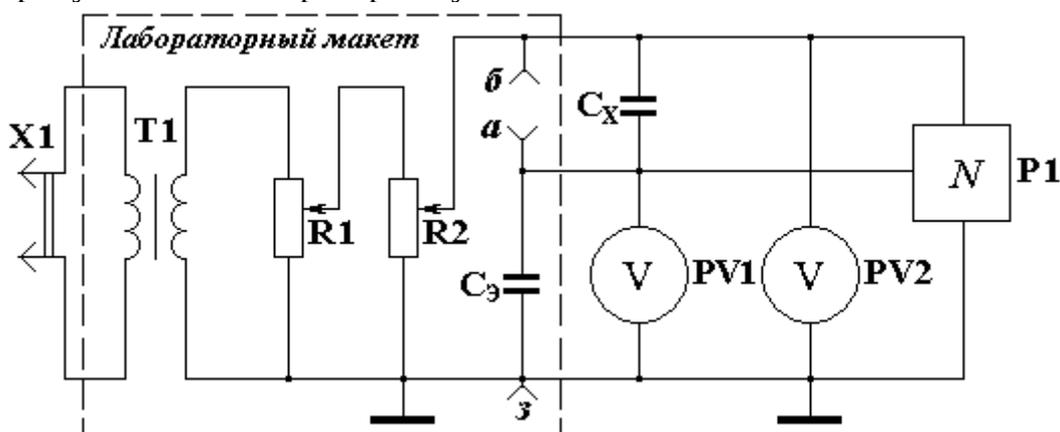


Рисунок 3.1 – Электрическая схема лабораторной установки

- лабораторный макет (на схеме выделен штриховой линией);
- два ламповых вольтметра для измерения напряжения на эталонном конденсаторе (PV1) и напряжения вторичного источника питания (PV2);
- осциллограф P1 для наблюдения характеристики поляризованности сегнетоэлектрика в переменном электрическом поле – петли гистерезиса;
- нагревательную печь для исследования зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от температуры;
- устройство для косвенного измерения температуры печи (сегнетоэлектрика) – на схеме не показано.

Лабораторный макет состоит из:

понижающего трансформатора **T1**;

делителя напряжения, реализованного на двух резисторах переменного сопротивления: **R1** для грубой настройки (ГРУБО) и **R2** для точной настройки (ТОНКО) напряжения в последовательной цепи конденсаторов C_x и C_ε ;

эталонного конденсатора C_ε ;

клемм «**a**» и «**б**», предназначенных для подключения в цепь исследуемых конденсаторов C_x ;

соединителей для подключения вольтметров и осциллографа (на схеме не показано).

Лабораторный макет питается от промышленной сети (220 В, 50 Гц), к которой подключается с помощью вилки **X1**.

3.2 Основы осциллографического метода исследования сегнетоэлектриков

В данной работе для исследования сегнетоэлектриков используется осциллографический метод. При использовании приведенной выше схемы на экране осциллографа можно получить зависимость поляризованности диэлектрика от напряжённости внешнего поля $P(E)$. Докажем это аналитически.

На вертикальное отклонение луча осциллографа подается напряжение U_ε , снимаемое с эталонного конденсатора (на схеме клеммы «**a**» и «**з**»). Так как исследуемый конденсатор C_x и эталонный C_ε включены последовательно, то их заряды равны, то есть справедливо равенство

$$(q_x = q_\varepsilon) = (U_x C_x = U_\varepsilon C_\varepsilon), \quad (3.1)$$

откуда следует

$$U_\varepsilon = \frac{U_x C_x}{C_\varepsilon} = \frac{q_x}{C_\varepsilon}. \quad (3.2)$$

Таким образом, вертикальное отклонение луча на экране осциллографа будет пропорционально заряду q_x конденсатора C_x .

На горизонтально отклоняющие пластины осциллографа подается напряжение питания U (клеммы «**б**» и «**з**»). Поскольку в схеме выполняется условие

$$C_\varepsilon \gg C_x, \quad (3.3)$$

то на основании уравнения (3.1) будем справедливо неравенство

$$U_x \gg U_\varepsilon. \quad (3.4)$$

Поэтому можно принять

$$U_x \approx U, \quad (3.5)$$

то есть горизонтальное отклонение электронного луча будет пропорционально напряжению, приложенному к исследуемому конденсатору C_x .

Таким образом, на экране осциллографа будет отображаться зависимость $q_x(U_x)$, что равносильно зависимости $P(E)$, так как $P \equiv q_x$, а $E \equiv U_x$. Для сегнетоэлектрика это будет петля гистерезиса, а для линейного диэлектрика – прямая, наклонная линия.

Напряжения U и U_ε измеряются ламповыми вольтметрами **PV1** и **PV2**, имеющими очень большое входное сопротивление, что предотвращает шунтирование цепи конденсаторов.

3.3 Порядок выполнения лабораторной работы

3.3.1 Подготовить лабораторную установку к исследованиям. Методические указания см. в пункте 3.4.1.

3.3.2 Получить разрешение у преподавателя на проведение исследований.

3.3.3 Снять зависимость заряда линейного конденсатора от напряжения.

Подключить к клеммам «а» и «б» слюдяной конденсатор. Включить питание установки. Плавно повышая напряжение от **0** до **100 В** (через **10 В**), снять зависимость напряжения на эталонном конденсаторе ($U_{\text{э}}$) от полного напряжения питания (U). Рассчитать величину заряда q_x по формуле (3.6).

$$q_x = C_{\text{э}} U_{\text{э}}, \quad (3.6)$$

где $C_{\text{э}} = 0,68 \text{ мкФ}$ – емкость эталонного конденсатора.

Результаты измерений и расчетов внести в таблицу 3.1 и показать преподавателю.

Построить зависимость заряда от напряжения $q_x = f(U)$.

Таблица 3.1 – Зависимость заряда от напряжения для линейного конденсатора

$U, В$										
$U_{\text{э}}, В$										
$q_x, Кл$										

3.3.4 Снять зависимость заряда сегнетоэлектрического конденсатора от величины приложенного напряжения.

Подключить к клеммам макета сегнетоэлектрический конденсатор. Плавно повышая напряжение от **0** до **100 В** (через **5...10 В**), снять зависимость $U_{\text{э}}$ от U . Рассчитать заряд сегнетоэлектрического конденсатора по формуле (3.6) и диэлектрическую проницаемость по формуле (3.9). Результаты измерений и расчетов внести в таблицу 3.2 и показать преподавателю.

Таблица 3.2 – Зависимость заряда и диэлектрической проницаемости от напряжения для сегнетоэлектрического конденсатора

$U, В$										
$U_{\text{э}}, В$										
$q_x, Кл$										
ϵ										

По полученным данным построить графики зависимости $q_x = f(U)$ и $\epsilon = f(U)$ для сегнетоэлектрического конденсатора в одних осях координат.

3.3.5 Снять зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от температуры и определить точку Кюри.

Поместить сегнетоэлектрический конденсатор и термопару в печь. Проследить, чтобы конец термопары находился рядом с конденсатором.

Воспользовавшись тарировочным графиком зависимости напряжения термоэДС термопары от температуры, определить цену деления милливольтметра в градусах Цельсия (Кельвина) ($1 \text{ K} = 1 \text{ }^\circ\text{C}$) по формуле (3.10).

Подать на конденсатор напряжение $U = 10 \dots 20 \text{ В}$ и включить нагрев. Провести измерения напряжения U_Σ при изменении температуры (через $5 \dots 10 \text{ К}$) от комнатной до температуры, при которой петля гистерезиса на экране осциллографа превратится в прямую линию. Рассчитать диэлектрическую проницаемость по формуле (3.9). Результаты измерений и расчетов внести в таблицу 3.3 и показать преподавателю.

Построить график зависимости $\epsilon = f(T)$ и определить точку Кюри.

Таблица 3.3 – Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для сегнетоэлектрического конденсатора

$T, \text{ }^\circ\text{C}$										
$U_\Sigma, \text{ В}$										
$\epsilon, \text{ Кл}$										

3.3.6 В процессе всей работы вести наблюдение за экраном осциллографа. Обратит внимание на различие характеристик поляризованности для слюдяного и сегнетоэлектрического конденсаторов. Проследить за изменением петли гистерезиса в зависимости от напряжения и температуры для сегнетоэлектрического конденсатора. Объяснить все замеченные эффекты.

3.4 Методические указания

3.4.1 Подготовка лабораторной установки к исследованиям

1) Собрать установку по схеме (рисунок 3.1) для исследования сегнетоэлектриков. Если установка собрана, то проверить правильность ее сборки. Обратит внимание на наличие заземления у макета и всех приборов.

2) Ручки регулировки напряжения на макете (ГРУБО и ТОНКО) вывести влево.

3) На ламповых вольтметрах переключатель ПРЕДЕЛЫ поставить в положение «0».

4) Подготовить к работе осциллограф, для чего:

- переключатель ОСЛАБЛЕНИЕ уставить в положение «1:1»;
- рукоятки АМПЛИТУДА СИНХРОНИЗАЦИИ, ЧАСТОТА, ПЛАВНО, ДИАПАЗОН ЧАСТОТ, а также УСИЛЕНИЕ ПО ГОРИЗОНТАЛИ и

УСИЛЕНИЕ ПО ВЕРТИКАЛИ вывести в крайнее левое положение;

- **получить разрешение у преподавателя на включение приборов;**
- включить осциллограф и вольтметры в сеть для прогрева – перевести выключатели СЕТЬ в верхнее положение;
- после прогрева осциллографа (через 8-10 минут), включить тумблер ЛУЧ и рукоятками ЯРКОСТЬ, ФОКУС, ОСЬ установить чёткое изображение пятна в центре экрана.

3.4.2 Расчетные соотношения

а) Так как исследуемый сегнетоэлектрический конденсатор представляет собой дисковую пластинку сегнетоэлектрика с вождёнными электродами, то, зная его геометрические параметры, можно рассчитать **диэлектрическую проницаемость** сегнетоэлектрика ϵ , как для плоского конденсатора, по формуле

$$\epsilon = \frac{d_X}{\epsilon_0 S_X} \cdot C_X, \quad (3.7)$$

где d_X – толщина сегнетоэлектрической пластины, м;

$\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – электрическая постоянная;

S_X – активная площадь диэлектрика – диска исследуемого конденсатора, м^2 .

Для определения емкости исследуемого конденсатора воспользуемся уравнениями (3.1) и (3.5), из которых следует

$$C_X = \frac{U_{\text{Э}} C_{\text{Э}}}{U_X} \approx \frac{U_{\text{Э}} C_{\text{Э}}}{U}. \quad (3.8)$$

Тогда
$$\epsilon = \frac{d_X}{\epsilon_0 S_X} \cdot C_X \approx \frac{d_X}{\epsilon_0 S_X} \cdot \frac{U_{\text{Э}} C_{\text{Э}}}{U} = K_X \cdot \frac{U_{\text{Э}}}{U}, \quad (3.9)$$

где $K_X = \frac{d_X C_{\text{Э}}}{\epsilon_0 S_X} = \text{const}$ – постоянная величина.

б) **Цену** одного маленького **деления милливольтметра в градусах Цельсия** (Кельвина) k_T можно рассчитать, воспользовавшись очевидным соотношением

$$k_T = k_U \cdot \frac{E_{\text{Э}}}{T_{\text{Э}}} = \frac{U_{\text{ПР}}}{N} \cdot \frac{E_{\text{Э}}}{T_{\text{Э}}}, \text{ К/дел.} \quad (3.10)$$

где k_U – цена деления милливольтметра, мВ/дел ;

$E_{\text{Э}}$ и $T_{\text{Э}}$ – значения термоэдс (мВ) термопары и соответствующей температуры (К) по тарировочному графику;

$U_{\text{ПР}}$ – предел измерения милливольтметра;

N – число маленьких делений милливольтметра.

4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1 К какому типу диэлектриков относятся сегнетоэлектрики?

4.2 Какие вещества называются сегнетоэлектриками?

4.3 Какие процессы происходят в кристалле сегнетоэлектрика при переходе через точку Кюри?

4.4 Объясните зависимость поляризованности линейных диэлектриков от напряжённости электрического поля. Как зависит заряд слюдяного конденсатора от приложенного напряжения?

4.5 Объясните зависимость поляризованности сегнетоэлектриков от напряжённости электрического поля. Нарисуйте график зависимости заряда сегнетоэлектрического конденсатора от величины приложенного напряжения.

4.6 Объясните зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков от напряжённости, приложенного переменного электрического поля.

4.7 Объясните зависимость диэлектрической проницаемости от температуры, если измерения произведены в слабых электрических полях. Как изменится эта зависимость, если измерения провести в сильных электрических полях?

4.8 Расскажите принцип работ установки для осциллографического исследования сегнетоэлектриков. Как подбираются параметры схем?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1 Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники.- С-П.; Изд-во «Лань», 2003. – 367 с.

2 Электрорадиоматериалы / Б.М. Тареев, Н.В. Короткова и др. / Под ред. Б.М. Тареева: Учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 1978. – 336 с.

3 Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.

4 Кузубных Н.И., Солдатова Л.Ю. Радиоматериалы и радиокомпоненты: Учебное пособие для студентов радиотехнических специальностей. – Томск: ТУСУР, 2012. – 177 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: edu.tusur.ru/training/publications/2733.

5 Кузубных Н.И. Общие требования и правила оформления отчетов по лабораторным работам: Метод. указания по оформлению отчетов по лабораторным работам для студентов всех специальностей. – Томск: ТУСУР, 2012. – 12 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: edu.tusur.ru/training/publications/3890