Энгельсский технологический институт (филиал) федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Кафедра «Естественных и математических наук»

ФИЗИКА

Методические указания к
выполнению лабораторной работы

“ИЗУЧЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТИТАНАТА БАРИЯ”

для студентов направлений

09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»
09.03.04 «Программная инженерия»
15.03.02 «Технологические машины и оборудование»
15.03.05 «Конструкторско-технологическоеобеспечение машиностроительных производств»
18.03.01 «Химическая технология»
23.03.01 «Нефтегазовое дело»
29.03.05 «Конструирование изделий легкой промышленности»

очной и заочной формы обучения

Энгельс 2025

Цель работы: изучение зависимости диэлектрической проницаемости титаната бария от напряженности поля и от температуры.

Основные понятия

Титанат бария ($BaTiO_3$) относится к группе сегнетоэлектриков. *Титанат бария* – сегнетоэлектрик, обладающий высокой механической прочностью, большой механической устойчивостью, нашедший благодаря этому широкое научно-техническое применение.

Сегнетоэлектрики относятся к классу ионных кристаллов, а электрические свойства кристаллов тесно связаны с их симметрией. Симметрия характеризует особенности расположения электрических зарядов в кристаллах. Можно выделить три этапа этого расположения для диэлектриков.

В первом из них расположение положительных и отрицательных зарядов является центросимметричным, центры тяжести зарядов каждого знака совпадают друг с другом. В пределах одной элементарной ячейки такое совпадение означает, что эти центры тяжести совпадают с центром ячейки. Такие кристаллы называют неполярными.

В диэлектриках второго типа центры тяжести зарядов противоположных знаков в пределах элементарной ячейки не совпадают, и получающиеся при таком распределении электрические дипольные моменты во всех соседних ячейках параллельны. Совокупность всех так построенных элементарных ячеек, образующих кристалл, делает его макроскопически поляризованным в отсутствие внешнего магнитного поля (спонтанная поляризация), такие кристаллы называют полярными.

В диэлектриках третьего типа центры положительных и отрицательных зарядов совпадают, но распределение зарядов каждого знака не является центросимметричным. Отсутствие центросимметричности в распределении зарядов каждого знака разрешает наличие полярных направлений, однако

геометрическая сумма всех дипольных моментов оказывается равной нулю. Такие кристаллы называют полярно-нейтральными.

Примером полярных диэлектриков служат сегнетоэлектрики – вещества, которые ниже некоторой температуры (или в некотором интервале температур) в отсутствие внешнего поля, имеют области спонтанной самопроизвольной поляризации – домены.

Такие температурные интервалы называются полярными интервалами, на границе их сегнетоэлектрики испытывают фазовые превращения, переходя в новые кристаллические модификации, в которых спонтанная поляризация не наблюдается.

Кристаллическая модификация, в которой сегнетоэлектрик спонтанно поляризован, называется полярной фазой, а модификация, в которой поляризации нет – неполярной фазой. Температура, при которой сегнетоэлектрики переходят из полярной фазы в неполярную, называется точкой Кюри.

В сегнетоэлектриках в пределах каждого домена дипольные моменты всех элементарных ячеек ориентированы одинаково; в соседних доменах направления спонтанной поляризации составляют случайные углы друг с другом, так что геометрическая сумма электрических моментов всего кристалла равна нулю.

Деление на домены оказывается для кристалла энергетически выгодным, так как при этом полная энергия достигает минимума, и спонтанно поляризованный сегнетоэлектрик в полярной области температур обладает большей устойчивостью.

Следствием существования областей спонтанной поляризации в сегнетоэлектриках является наличие у них свойств, аналогичных свойствам ферромагнетиков: большие значения диэлектрической проницаемости, характерная кривая зависимости диэлектрической проницаемости от температуры с резким пиком в точке Кюри (рис. 1) и гистерезис зависимости

заряда конденсатора с сегнетоэлектриком от напряженности поля в области сильных полей при температурах ниже точки Кюри (рис. 2).

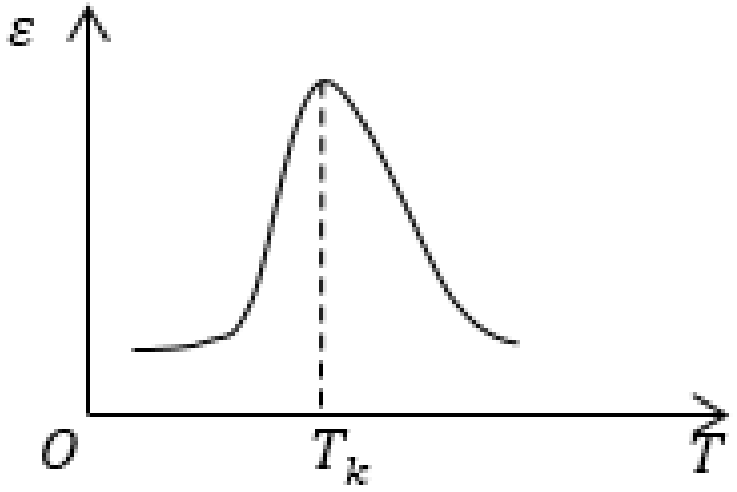

Рис. 1. Кривая зависимости диэлектрической проницаемости от температуры с резким пиком в точке Кюри

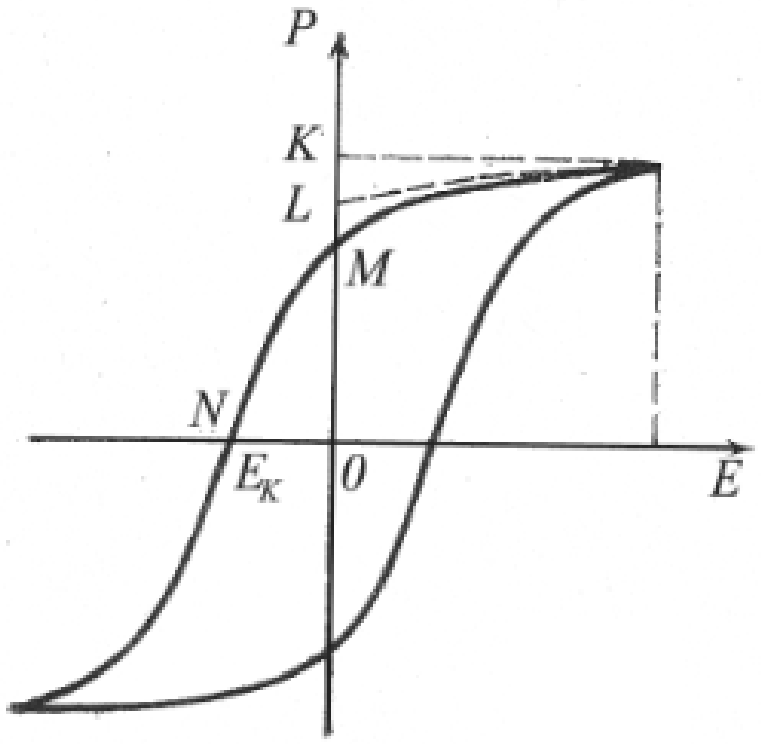

Рис. 2. Петля гистерезиса сегнетоэлектрика

Изменение свойств при переходе через эту точку является следствием изменения кристаллической структуры сегнетоэлектрика. В титанате бария

выше точки Кюри существует кубическая решетка, ниже – тетрагональная. Изучаемое фазовое превращение титаната бария является фазовым превращением второго рода или близким к нему переходом первого рода.

При внесении в электрическое поле сегнетоэлектрик поляризуется. Электрическая индукция сегнетоэлектрика складывается из трех составляющих:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} + \overrightarrow{P_0} \qquad (1)$$

где $\vec{E}$ – среднее макроскопическое поле в сегнетоэлектрике; $\vec{P}$ – средний индуцированный электрический момент единицы объема, обусловленный поляризацией ионного смещения и смещения электронных оболочек и пропорциональный в слабых полях напряженности электрического поля; $\overrightarrow{P_0}$— электрический момент спонтанной поляризации; ε_0 – электрическая постоянная.

Векторы $\vec{E}$ и $\vec{P}$ имеют одинаковое направление, а вектор $\overrightarrow{P_0}$ в общем случае может иметь другое направление. В случае, если вектора $\vec{P}$ и $\overrightarrow{P_0}$ пропорциональны вектору напряженности электрического поля $\vec{E}$, полная диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика, обусловленная и поляризацией, вызываемой внешним полем, и спонтанной поляризацией, равна отношению:

$$\mathcal{E} = \frac{D}{\varepsilon_0 E} \qquad (2)$$

Из (1) и (2) получаем

$$\mathcal{E} = 1 + \frac{P}{\varepsilon_0 E} + \frac{P_{0E}}{\varepsilon_0 E} \qquad (3)$$

Здесь P_{0E} – проекция $\overrightarrow{P_0}$ на направление поля $\vec{E}$.

В общем случае, когда P_{0E} и $\vec{P}$ не пропорциональны напряженности поля, можно определить лишь так называемую дифференциальную диэлектрическую проницаемость:

$$\mathcal{E} = 1 + \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{\partial P}{\partial E} + \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{\partial P_{0E}}{\partial E} \quad (4)$$

С увеличением внешнего поля полный электрический момент единицы объема $\vec{P}_{\text{полн}}$ увеличивается по двум причинам: во-первых, в результате роста электрического момента индуцированной поляризации P; во-вторых, вследствие возрастания числа доменов, направление электрического момента спонтанной поляризации которых совпадает с направлением внешнего поля или образует с ним острые углы.

Процесс поляризации сегнетоэлектрика носит необходимый характер. Сегнетоэлектрики обладают гистерезисом. Сущность гистерезиса заключается в том, что поляризация сегнетоэлектрика определяется не только значением напряженности поля, но и зависит от предшествовавших состояний поляризации.

При изменении поля от $+E$ до $-E$ и от $-E$ до $+E$, индукция и поляризация в сегнетоэлектрике описывает замкнутую кривую, называемую петлей гистерезиса (рис. 2).

В общем случае и спонтанная поляризация и индуцированная поляризация являются нелинейными функциями напряженности поля. Однако в области не очень сильных полей индуцированная поляризация пропорциональна напряженности поля. В этой области можно разделить полную поляризацию на две составляющие следующим образом: экстраполируют ветвь насыщения петли гистерезиса (рис. 2) к значению поля, равному нулю. Отрезок KL соответствует индуцированной поляризации P, отрезок LO – спонтанной поляризации P_0. Действительно, при насыщении можно считать, что ориентация вектора спонтанной поляризации P_0 в доменах закончена, и дальнейший линейный рост поляризации с увеличением напряженности поля осуществляется за счет индуцированной поляризации. Поскольку она зависит от напряженности поля, то экстраполяция ветви насыщения до оси P дает отрезок KL,

соответствующий индуцированной поляризации. Отрезок OM соответствует остаточной поляризации, а ON – коэрцитивной напряженности E_k.

Гистерезис можно наблюдать, подводя к образцу сегнетоэлектрика с посеребренными поверхностями (сегнетоконденсатору) переменное напряжение. Часть электрической энергии, которая при переменном напряжении в диэлектрике переходит в тепло, называется диэлектрическими потерями. Диэлектрические потери в сегнетоконденсаторе можно характеризовать тангенсом угла диэлектрических потерь, который выражается так:

$$tg\delta = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{W_T}{W}$$

Здесь W_T – энергия, перешедшая в тепло в единице объема диэлектрика за время одного периода; W – максимальная плотность энергии, запасенной в конденсаторе.

Угол диэлектрических потерь δ дополняет угол сдвига фаз между током и напряжением до 90^0.

Описание экспериментальной установки

Схема установки представлена на рис. 3. Исследуемый образец С и термометр Т помещают в печь ЭП. Образец представляет собой небольшой диск из титаната бария, помещенный между металлическими круглыми обкладками, представляющими собой плоский конденсатор. На конденсатор подается ЛАТР регулируемое переменное напряжение, измеряемое прибором V. Величина тока измеряется прибором А.

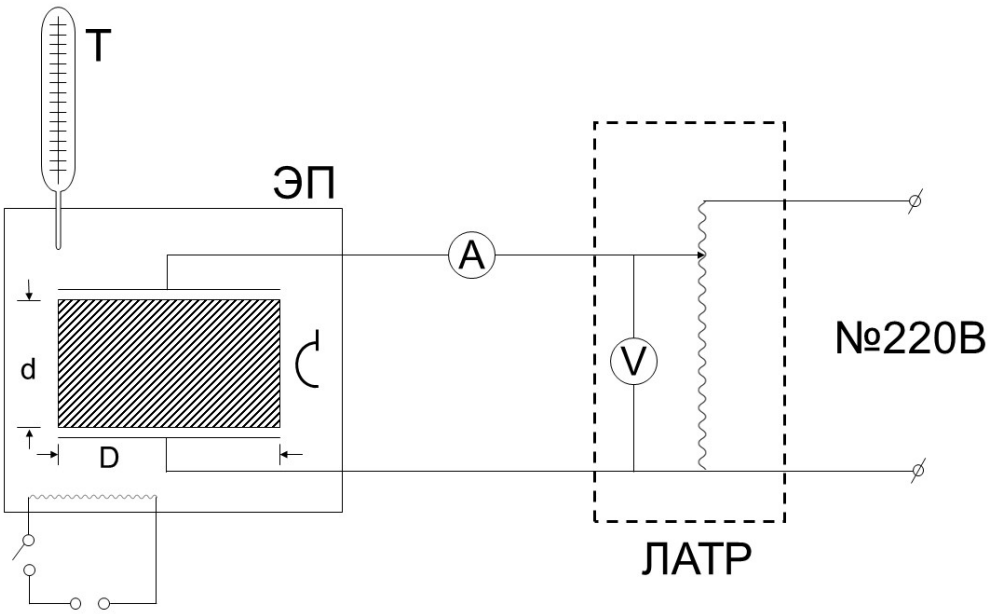

Рис. 3. Схема установки

Титанат бария обладает большой диэлектрической проницаемостью в области температур от самых низких до +125^{0}С. Зависимость $\mathcal{E} = f(T)$ имеет характерный максимум. Температура T_k (рис. 1) называется точкой Кюри.

Зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария от температуры

Измерение зависимости диэлектрической проницаемости титаната бария от температуры сводится к измерению зависимости от температуры емкости сегнетоконденсатора.

Величина диэлектрической проницаемости титаната бария при каждой температуре определяется как:

$$\mathcal{E} = \frac{C}{C_0} \tag{5}$$

где $C_0 = \mathcal{E}_0 S/d$ – емкость конденсатора без сегнетоэлектрика.

Так как для цепи переменного тока, содержащей емкость С, справедливо соотношение для тока:

$$I = \omega C U \tag{6}$$

где $\omega = 2\pi\nu$, $\nu = 50$Гц – частота тока в цепи; U – напряжение в цепи.

Учитывая, что $S = \pi D^2/4$ (где D – диаметр обкладок) получим из (5) и (6):

$$\mathcal{E} = \frac{2 \cdot d \cdot I}{\mathcal{E}_0 \pi^2 \nu D^2 U} \tag{7}$$

Здесь d – толщина образца, $\mathcal{E}_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$Ф/м.

Соотношение (7) для каждой температуры может быть приведено к виду $y = kx$, если принять $y = I$, $x = U$, $k = \mathcal{E}\mathcal{E}_0 \pi^2 \nu D^2/2d$.

$$I = \frac{\mathcal{E}\mathcal{E}_0 \pi^2 \nu D^2}{2d} \cdot U \tag{8}$$

Выполняя измерения по (8), варьируя напряжение и производя обработку измерений по методу наименьших квадратов, для величины диэлектрической проницаемости получим:

$$\mathcal{E} = \frac{2kd}{\mathcal{E}_0 \pi^2 \nu D^2} \tag{9}$$

где k – оценка, полученная по методу наименьших квадратов.

Так как дисперсия известна (из МНК), то поскольку из соотношения (9) следует, что

$$\sigma_\varepsilon^2 = \left(\frac{d\mathcal{E}}{dk}\right)^2 \sigma_k = \left(\frac{2d}{\mathcal{E}_0 \pi^2 \nu D^2}\right)^2 \sigma_k^2$$

то оценка стандартной погрешности величины диэлектрической проницаемости есть:

$$S_\mathcal{E} = \frac{2d}{\mathcal{E}_0 \pi^2 \nu D^2} S_k \tag{10}$$

где S_k – стандартное отклонение величины k, полученное по МНК.

Оценка погрешности измерений

Систематическая (не исключенная) погрешность определения диэлектрической проницаемости определяется по правилу косвенных измерений, то есть

$$\Delta\mathcal{E}^2 = \left(\frac{\partial\mathcal{E}}{\partial d}\right)^2 \Delta d^2 + \left(\frac{\partial\mathcal{E}}{\partial D}\right)^2 \Delta D^2 + \left(\frac{\partial\mathcal{E}}{\partial I}\right)^2 \Delta I^2 + \left(\frac{\partial\mathcal{E}}{\partial U}\right)^2 \Delta U^2 \tag{11}$$

где Δd и ΔD – систематические погрешности определения толщины и диаметра образца.

ΔI и ΔU – систематические погрешности прямых измерений тока и напряжения в цепи.

Из соотношения (7) получим

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial d} = \frac{\mathcal{E}}{d}; \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial D} = -\frac{2\mathcal{E}}{D}; \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial I} = \frac{\mathcal{E}}{I}; \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial U} = -\frac{\mathcal{E}}{U} \qquad (12)$$

Подставляя (12) в (11), получаем систематическую погрешность определения $\mathcal{E}$ при данной температуре.

$$\Delta\mathcal{E} = \bar{\mathcal{E}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta d^2}{\bar{d}^2} + \frac{\Delta I^2}{\bar{I}^2} + \frac{4}{\bar{D}^2}\Delta D^2 + \frac{\Delta U^2}{\bar{U}^2}} \qquad (13)$$

где $\bar{\mathcal{E}} = (2\bar{d} \cdot \bar{I})/(\mathcal{E}_0 \pi^2 \nu \bar{D}^2 \bar{U})$, $\bar{d}$, $\bar{I}$, D, U – средние значения, то есть

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^{n} x_i / N$$

Порядок выполнения работы

1. Включают установку, устанавливая разность потенциалов U=100 В. Записывают силу тока I. Не включая нагреватель печи, записывают температуру t^0C.
2. При данной температуре, изменяя напряжение с интервалом 5 В, выполняют 8-10 измерений тока.
3. Включают печь. Температура образца повышается, его диэлектрическая проницаемость меняется. Это приводит к изменению силы тока в цепи образца. Через интервалы $\Delta t^0C = 10^0C$ (после 100^0C через 5^0C – область фазового перехода и $t_{\text{фп}} \approx 120^0$C) снимают отсчеты напряжения U и силы тока I. Такие отсчеты берут до тех пор, пока сила тока не пройдет через максимум, что соответствует точке Кюри, и не спадет до первоначального значения.

4. Выяснить систематические погрешности прямых измерений напряжения и тока по используемым вольтметру и амперметру.
5. Принять $D = 0{,}1$ м, $\Delta D = 0{,}025$ м, $d = 0{,}005$ м, $\Delta d = 0{,}025$ м.
6. Подставляя значения I и U в формулу (7), рассчитать значения $\mathcal{E}$ и построить графическую зависимость $\mathcal{E} = \mathcal{E}(t)$.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие вещества относят к сегнетоэлектрикам? Какими свойствами обладают сегнетоэлектрики? Что такое домены?
2. Какими параметрами характеризуется поведение диэлектриков в электрическом поле?
3. В чем заключается поляризация диэлектриков? Какие типы поляризации имеют место в диэлектриках?
4. Как изменяется диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков при их нагревании?
5. В чем сущность гистерезиса в сегнетоэлектриках?
6. Как описываются потери энергии в диэлектриках?
7. Нарисовать схему установки для исследования температурной зависимости диэлектрической проницаемости титаната бария.
8. Вывести соотношения для оценки случайных и систематических погрешностей измерения диэлектрической проницаемости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики: в 3 т./И.В. Савельев. М.: Наука, 1998. Т.2.
2. Яворский Б.М. Курс физики: в 3 т./Б.М. Яворский, А.А. Детлаф, Л.И. Милковская. М.: Высшая школа, 1999. Т.2.
3. Трофимова Т.И. Курс физики/Т.И. Трофимова. М.: Высшая школа, 2002.
4. Учебные анимированные клипаты по физики ЭТИ СГТУ [Электронный ресурс] http://tfi.sstu.ru/
5. http://www.sstu.ru/studentu/
6. http://techn.sstu.ru/Biblioteka/
7. http://techn.sstu.ru/new/SubjectFGOS/SpisokPredmetow.aspx