

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Макарова Наталья Александровна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение характеристических параметров сегнетоэлектрической  
керамики**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19307

**Научный руководитель:**

д.ф.-м.н. в.н.с. ИФП СО РАН

Терещенко О.Е.

Оценка научного руководителя

«\_\_\_\_\_» декабря 2020 г.

**Преподаватель практикума:**

Солдаткина Е.И.

Оценка преподавателя практикума

«\_\_\_\_\_» декабря 2020 г.

**Куратор практикума:**

к.т.н., Астрелин В.Т.

Итоговая оценка

«\_\_\_\_\_» декабря 2020 г.

Новосибирск 2020

# **Измерение характеристических параметров сегнетоэлектрической керамики**

**Макарова Наталья Александровна**

Физический факультет. Электромагнитный практикум. Курсовая работа.

Группа № 19307, 3 семестр, 2020 год.

Научный руководитель:

**д.ф.-м.н. Терещенко Олег Евгеньевич**

## **Аннотация**

Целью работы являлось выявление основных свойств сегнетоэлектриков, а также изучение зависимости спонтанной поляризации и диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от температуры. Для этой цели была собрана электрическая схема, состоящая из двух последовательных конденсаторов, один из которых заполнен сегнетоэлектриком, а емкость другого известна, и генератора синусоидальных колебаний, также построена основная кривая поляризации для определения дифференциальной диэлектрической проницаемости. С помощью осциллографа была получена петля гистерезиса, по участку насыщения которой нашли спонтанную и остаточную поляризации, а также величину коэрцитивной напряженности. Была найдена диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика при различной температуре образца, а также точка Кюри. Относительная погрешность диэлектрической проницаемости составила около  $7,5 \div 10\%$ . Экспериментальные данные хорошо согласуются с отличительными свойствами сегнетоэлектриков – большая проницаемость, зависимость спонтанной поляризации от температуры, достижение максимума диэлектрической проницаемости при температуре Кюри. Для определения материала образца полученные результаты с учетом погрешности сравнили с табличными значениями. Исходя из температуры Кюри и диэлектрической проницаемости, полученных в опыте, выявили, что образец сделан из материала ВК-1 или ВК-2 конденсаторной сегнетоэлектрической керамики.

Ключевые слова: спонтанная поляризация, диэлектрическая проницаемость, температура Кюри, петля гистерезиса.

## Оглавление

Аннотация.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Введение .....	4
1. Теоретическая часть.....	4
1.1. Внутреннее строение сегнетоэлектриков .....	4
1.2. Фазовый переход. Температура Кюри.....	5
1.3. Петля гистерезиса .....	5
2. Экспериментальная часть.....	7
2.1. Описание установки .....	7
2.2. Методика эксперимента .....	8
2.2.1. Получение значений поляризации и коэрцитивного поля .....	8
2.2.2. Измерение диэлектрической проницаемости.....	8
2.2.3. Определение температуры перехода .....	9
3. Результаты измерений .....	10
4. Погрешности измерений .....	14
5. Обсуждение полученных результатов .....	14
6. Выводы .....	15
7. Литература.....	15

## **Введение**

Сегнетоэлектриками называют особый вид диэлектриков, отличающийся нелинейной зависимостью поляризации от напряженности поля, что является следствием наличия в них электрических доменов. Они отличаются большой диэлектрической проницаемостью, наличием петли диэлектрического гистерезиса, интересными электрооптическими свойствами, и поэтому широко применяется во многих областях современной техники: радиотехнике, электроакустике, квантовой электронике и измерительной технике.

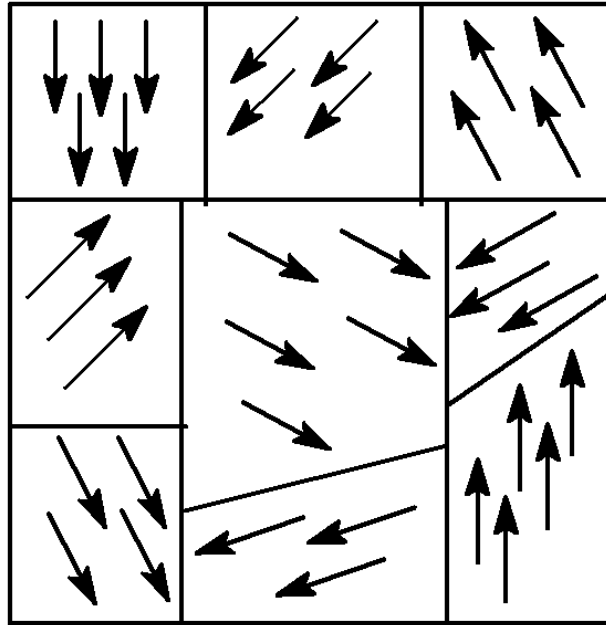
Большинство сегнетоэлектриков перестает быть сегнетоэлектриками выше некоторой температуры, называемой температурой Кюри. Аномальное поведение вблизи этой температуры, вероятно не менее важно, чем обратимая поляризация, но оно не является достаточным определением сегнетоэлектрика. При температуре Кюри диэлектрическая проницаемость резко возрастает до весьма больших значений; именно эти большие значения в окрестности температуры Кюри называют аномальными значениями.

Целью работы является изучение зависимости спонтанной поляризации и диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков от температуры, а также измерение характеристических параметров образца из сегнетоэлектрической керамики.

## **1. Теоретическая часть**

### **1.1. Внутреннее строение сегнетоэлектриков**

В сегнетоэлектрических кристаллах существует спонтанная поляризация  $P_s$  в отсутствие внешнего поля. Такое состояние кристалла называется полярным (сегнетоэлектрическим). В устойчивом термодинамическом состоянии сегнетоэлектрик разбит на домены - области, в которых направление элементарных диполей, образующих  $P_s$ , одинаково и не совпадает с направлением  $P_s$  в соседних доменах. То есть электрическую структуру кристалла можно схематически представить в виде совокупности диполей, одинаково ориентированных в пределах доменов (см. рис.1).



**Рис.1.** Доменная структура сегнетоэлектрика (стрелки иллюстрируют направление диполей в пределах домена).

Наличие спонтанной поляризации и доменов в сегнетоэлектрических кристаллах приводит к целому ряду интересных свойств: резкая нелинейность зависимостей поляризации от напряженности электрического поля и от температуры, наличие температуры Кюри и петли гистерезиса.

### 1.2. Фазовый переход. Температура Кюри

Температура, при которой исчезает спонтанная поляризация  $P_s$  и происходит перестройка кристаллической структуры, называется температурой (точкой) Кюри  $T_K$ . По типу фазового перехода выделяют две группы.

Рассмотрим переход типа «смещения». Здесь  $P_s$  возникает за счет смещения ионов одной подрешетки относительно другой. Так у титаната бария  $BaTiO_3$  деформация структуры при фазовом переходе ниже  $T_K$  заключается в том, что ион  $Ti^{4+}$  слегка смещается из центра кислородного октаэдра в ячейке, что приводит к растяжению этой ячейки. При смещении возникает электрический диполь и, следовательно, спонтанная поляризация.

Также выделяют сегнетоэлектрики с переходом типа «порядок - беспорядок». Здесь  $P_s$  возникает в результате упорядочивания водородных связей в группах ионов либо самих ионных групп в элементарной ячейке кристалла.

### 1.3. Петля гистерезиса

Как было раньше сказано, следствием доменной структуры сегнетоэлектрика является гистерезисная зависимость  $P(E)$ . Познакомимся с этой зависимостью.

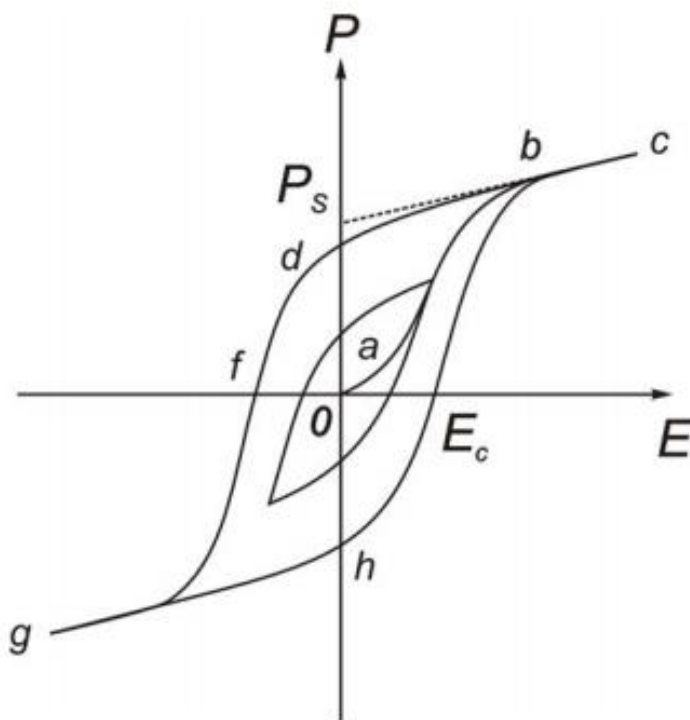
Полный дипольный момент кристалла определяется суммой моментов доменов. В отсутствие внешнего поля поляризация доменов скомпенсирована и в целом равна нулю. При включении поля  $E$ , достаточно слабого для того,

чтобы переориентировать диполи, направленные против поля, кристалл ведет себя как линейный диэлектрик (рис.2, участок  $oa$ ). При увеличении  $E$  полный момент образца меняется за счет смещения доменных границ, а также зарождения и роста новых доменов. В результате скорость роста  $P(E)$  увеличится (рис.2., участок  $ab$ ), а когда направление поляризации совпадет с направлением  $E$ , наступит участок насыщения ( $bc$ ), на котором рост  $P(E)$  происходит за счет индуцированной поляризации  $P_i$ . Экстраполяция прямолинейного участка  $bc$  по линейному закону (1):

$$P(E) = P_s + \chi E \quad (1),$$

где  $P_i = \chi E$ ,  $\chi$  - диэлектрическая восприимчивость, до пересечения с осью ординат дает величину  $P_s$ .

При уменьшении поля и дальнейшем увеличении обратного поля изменение  $P(E)$  идет по кривой  $bdfg$ , лежащей выше начального участка кривой, так как смещение доменных границ и рост новых доменов задерживается. При полном цикле изменения поля в прямом и обратном направлении кривая описывает замкнутую петлю гистерезиса. При этом на полученной кривой выделяют коэрцитивное поле  $E_c$ , при котором  $P=0$ . Его величина зависит от температуры, частоты поля, толщины и качества кристалла. Также выделяют остаточную поляризацию  $P_r$ , при которой  $E=0$  (рис.2).



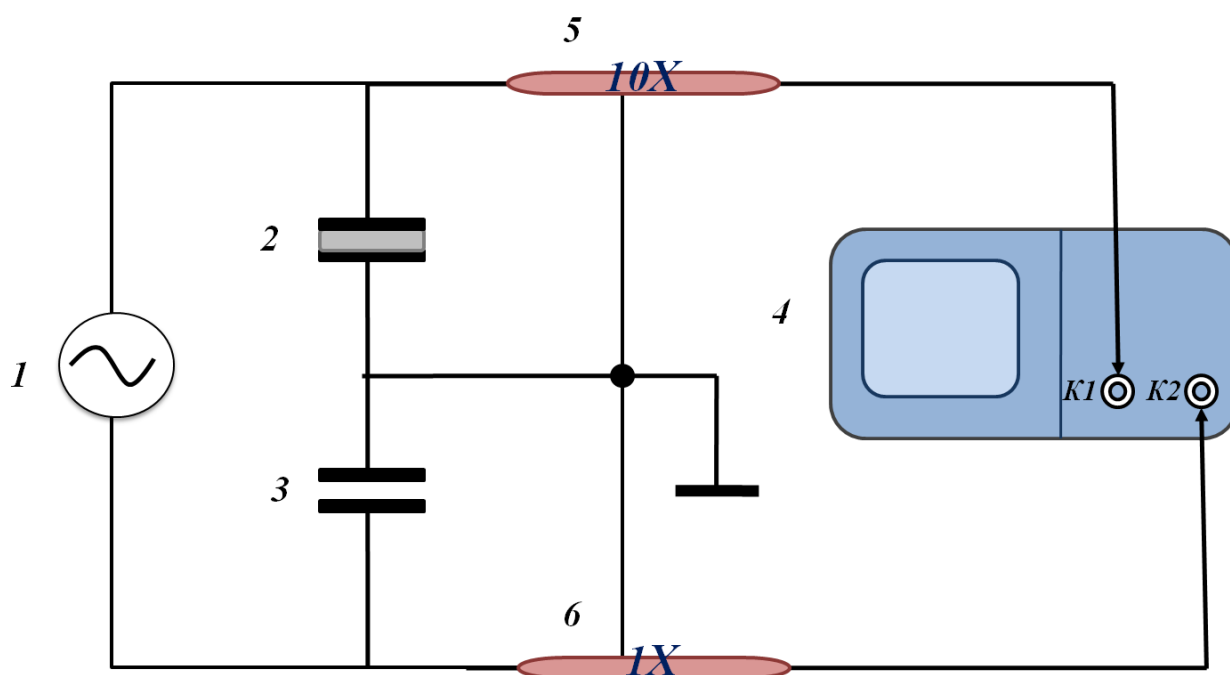
**Рис.2.** Петли гистерезиса предельного ( $cdfghc$ ) и частного (внутренняя кривая) циклов сегнетоэлектрика. Линейная экстраполяция участка насыщения ( $bc$ ) до пересечения с осью  $OP$  дает  $P_s$ , точка  $d$  соответствует  $P_r$ , точка  $f$  - полю  $E_c$ .

## 2. Экспериментальная часть

### 2.1. Описание установки

Установка, используемая в эксперименте, представлена на рисунке 3. В данной работе исследуемый образец представляет собой плоскопараллельную пластинку сегнетоэлектрической конденсаторной керамики толщиной  $d=0,6$  мм и площадью  $S=0,16$  мм<sup>2</sup> с посеребренными плоскостями, к которым припаяны электрические выводы. Для записи петли гистерезиса к выходу генератора (1) синусоидальных колебаний присоединены последовательно два конденсатора – наш образец  $C_x$  (2) и эталонный линейный  $C_0 = 0,5$  мкФ (3), напряжение на которых подается на вход осциллографа (4). На вход к первому каналу осциллографа (К1) подается через пробник  $10X$  (5) напряжение  $U_x$ , которое практически является напряжением, подаваемым с генератора, так как выполняется условие  $C_x \ll C_0$ . А второй канал (К2) через пробник  $1X$  (6) подключен к эталонному конденсатору.

При исследовании зависимости свойств сегнетоэлектрика от температуры используется печь (нагреватель), представляющая собой проволочное сопротивление, на которое подается регулируемое напряжение от источника, - для подогрева образца, датчик температуры CENTER 309 [1] – для контроля температуры. Для получения зависимости емкости конденсатора, заполненного сегнетоэлектриком, от температуры  $C_x(T)$  используется измеритель МТ4080D [2].



**Рис. 3.** Схема установки для записи петли гистерезиса и исследования температурных зависимостей поляризации и емкости образца.

1 – генератор синусоидальных колебаний; 2 – сегнетоэлектрический конденсатор; 3 – эталонный конденсатор; 4 – осциллограф с каналами К1 и К2 соответственно; 5 – пробник с коэффициентом ослабления 10; 6 – пробник с коэффициентом ослабления 1.

## 2.2. Методика эксперимента

### 2.2.1. Получение значений поляризации и коэрцитивного поля

Для получения петли гистерезиса нужно знать зависимость поляризации от электрического поля  $P(E)$ . Напряженность электрического поля в сегнетоэлектрике пропорционально напряжению  $U_x$  (2):

$$E = \frac{U_x}{d} \quad (2)$$

Можно приближенно предположить равенство зарядов на конденсаторах, то есть  $Q = U_x C_x = U_y C_0$ , где  $U_y$  - напряжение на эталонном конденсаторе. Кроме того, из граничных условий на поверхности раздела металлическая обкладка - сегнетоэлектрик следует, что в сегнетоэлектрике  $D = 4\pi \frac{Q}{S}$  ( $D = \frac{Q}{S}$  в СИ).

Комбинируя эти формулы, получим (3):

$$D = 4\pi \frac{U_y C_0}{S}, \quad D = \frac{U_y C_0}{S} \quad (3)$$

Далее в правой части будем писать формулы в СИ, а слева в СГС. Напряжение на линейном (эталонном) конденсаторе оказывается пропорциональным электрической индукцией в сегнетоэлектрике. При выполнении условия  $4\pi P \gg E$  ( $P \gg \varepsilon_0 E$  в СИ) можно записать (4):

$$P = \frac{U_y C_0}{S} \quad (4)$$

Петля гистерезиса наблюдается в экранном режиме ХУ на осциллографе, где точки на оси X определяют напряжение на К1, а по Y – на К2. В итоге можно построить гистерезисную кривую в виде зависимости  $P(E)$  или  $D(E)$ , зная при этом параметры  $C_0$ ,  $S$  и  $d$ .

С помощью экстраполяции участка насыщения петли гистерезиса (рис.2) до пересечения с  $E=0$  определим коэрцитивное поле  $E_c$ , остаточная  $P_r$  и спонтанная  $P_s$  поляризации.

Известно, что объемная плотность энергии в диэлектрике рассчитывается как  $w = \frac{1}{4\pi} \int EdD$ . Если рассмотреть графическую интерполяцию работы на диаграмме  $D(E)$  для сегнетоэлектриков (рис.2), а также учесть, что  $4\pi P \gg E$  и поэтому  $D \approx 4\pi P$  ( $D = P$  в СИ), то можно определить, что диссипация энергии за период в единице объема равна площади петли гистерезиса  $\Delta W$  (5). Умножив (5) на частоту  $f$ , определим среднюю мощность потерь за период (6):

$$\Delta W \approx \oint EdP \quad (5),$$

$$\Delta N \approx f \oint EdP \quad (6)$$

### 2.2.2. Измерение диэлектрической проницаемости

Вектор электрической индукции  $D$  определяется соотношением (7):

$$D = E + 4\pi P, \quad D = \varepsilon_0 E + P \quad (7),$$



поэтому зависимость  $D(E)$  также имеет вид петли гистерезиса. Кривая  $oabc$  на рис.2, которую описывает точка вершины частного цикла при плавном увеличении поля, называется основной кривой поляризации  $D_{oabc}(E)$ . Из-за нелинейной зависимости  $D_{oabc}(E)$  следует различать дифференциальную диэлектрическую проницаемость (8) и диэлектрическую проницаемость, определяемую как угловой коэффициент  $D(E)$  в начале координат (9):

$$\varepsilon_{diff} = \frac{dD_{oabc}}{dE}, \quad \varepsilon_{diff} = \frac{dD_{oabc}}{\varepsilon_0 dE} \quad (8),$$

$$\varepsilon = \left( \frac{dD_{oabc}}{dE} \right)_{E=0}, \quad \varepsilon = \left( \frac{dD_{oabc}}{\varepsilon_0 dE} \right)_{E=0} \quad (9)$$

При различных значениях амплитуды переменного поля в сегнетоэлектрике, получим частные циклы (рис.2). Геометрическое место вершин этих участков является основной кривой поляризации (участок  $oabc$  на рис.2). Рассчитать соответствующие координаты вершин частных циклов можно при измерении максимальных амплитуд периодических сигналов  $U_x$  и  $U_y$  при различных значениях напряжения с генератора. Зависимость  $\varepsilon_{diff}(E)$  строится численным дифференцированием основной кривой поляризации (8), а  $\varepsilon$  определяется из выражения (9).

### 2.2.3. Определение температуры перехода

Для получения  $P_s(T)$  поместим образец в нагреватель, далее будем плавно изменять температуру, измеряя при этом  $P_s$  с помощью петли гистерезиса. С увеличением температуры  $P_s$  уменьшается и при температуре Кюри  $T_c$  становится близкой к нулю. Петля гистерезиса с ростом  $T$  плавно трансформируется в прямую линию, наклоненную под углом к оси X, а при некотором остаточном сдвиге фаз м/у  $U_x$  и  $U_y$  - в эллипс. Построив график  $P_s(T)$ , можно определить температуру Кюри  $T_c$ .

Одна из характерных особенностей сегнетоэлектриков состоит в том, что значения диэлектрической проницаемости в полярной фазе аномально велики. Так, для титаната бария  $\varepsilon_{max} \approx 6000 - 7000$ .

В неполярной фазе сегнетоэлектрик ведет себя как обычный линейный диэлектрик, в котором поляризация пропорциональна электрическому полю. Однако поляризуемость  $\alpha$  и  $\varepsilon$  меняются с температурой. Вблизи точки Кюри имеет место закон Кюри-Вейсса [3], т.е. соотношение (10):

$$\alpha = \frac{C}{T - T_0} \quad (10),$$

где  $C$  - постоянная,  $T_0$  - температура Кюри-Вейсса. Данная температура очень мало отличается от температуры Кюри  $T_c$ ; этим различием обычно пренебрегают. Если точек Кюри две, то в окрестности каждой из них в неполярной фазе выполняется закон Кюри-Вейсса: вблизи верхней точки - по формуле (10), в нижней - по (11):

$$\alpha = \frac{C'}{T_0 - T} \quad (11)$$

Для проверки закона Кюри-Вейсса нужно получить зависимость  $\varepsilon(T)$ . С помощью нагрева образца до температуры, превышающей температуры Кюри примерно на 20%, найдем  $C_x(T)$ . С помощью этого определим искомую зависимость  $\varepsilon(T)$ :

$$\varepsilon(T) = \frac{C_x(T)}{C} \quad (12),$$

где  $C = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$  – емкость конденсатора без сегнетоэлектрика в СИ. После дадим образцу остыть, при этом снимая зависимость  $C_x(T)$ . По полученной кривой  $\varepsilon(T)$  можно будет определить точку Кюри. В точке перехода  $T_c$  наблюдается высокое, но конечное значение  $\varepsilon$ . Пусть  $\varepsilon(T_c) = \varepsilon_c$ , тогда (10) обобщается в виде (13):

$$\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon_c} = \frac{(T - T_c)^n}{C} \quad (13),$$

где  $n$  – показатель степени при температуре. В координатах  $\ln\left(\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon_c}\right)$  от  $\ln(T - T_c)$  имеем прямую линию (14):

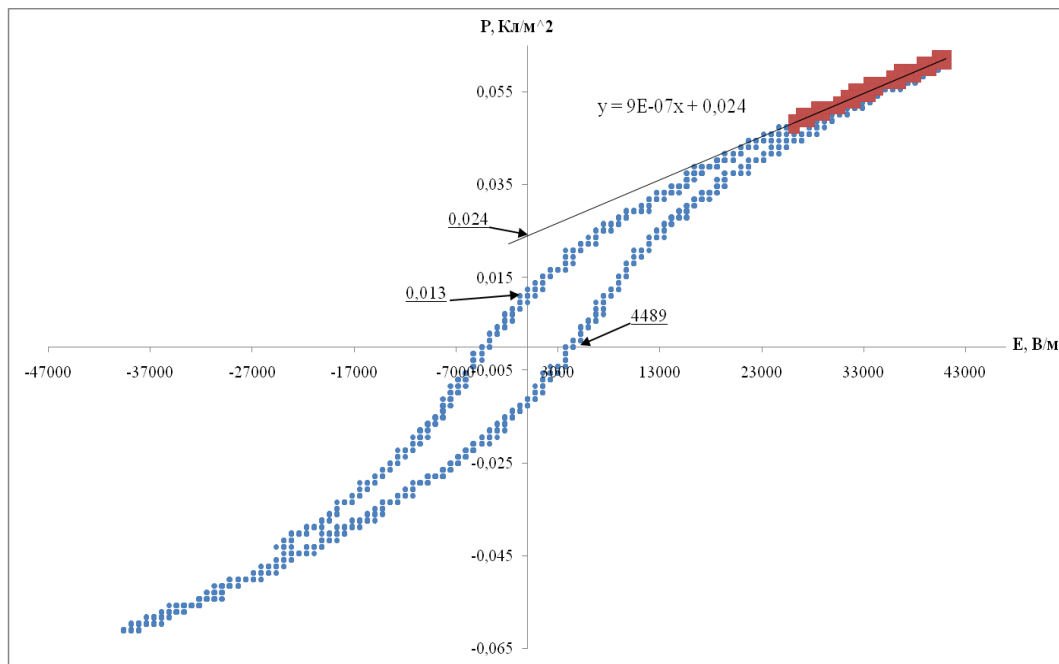
$$\ln\left(\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon_c}\right) = n \ln(T - T_c) - \ln C \quad (14),$$

с тангенсом угла наклона  $n$  к оси абсцисс, которая пересекает ось ординат в точке  $-\ln C$ . Полученные точки с помощью линейной регрессии обработаем в программе Excel.

### 3. Результаты измерений

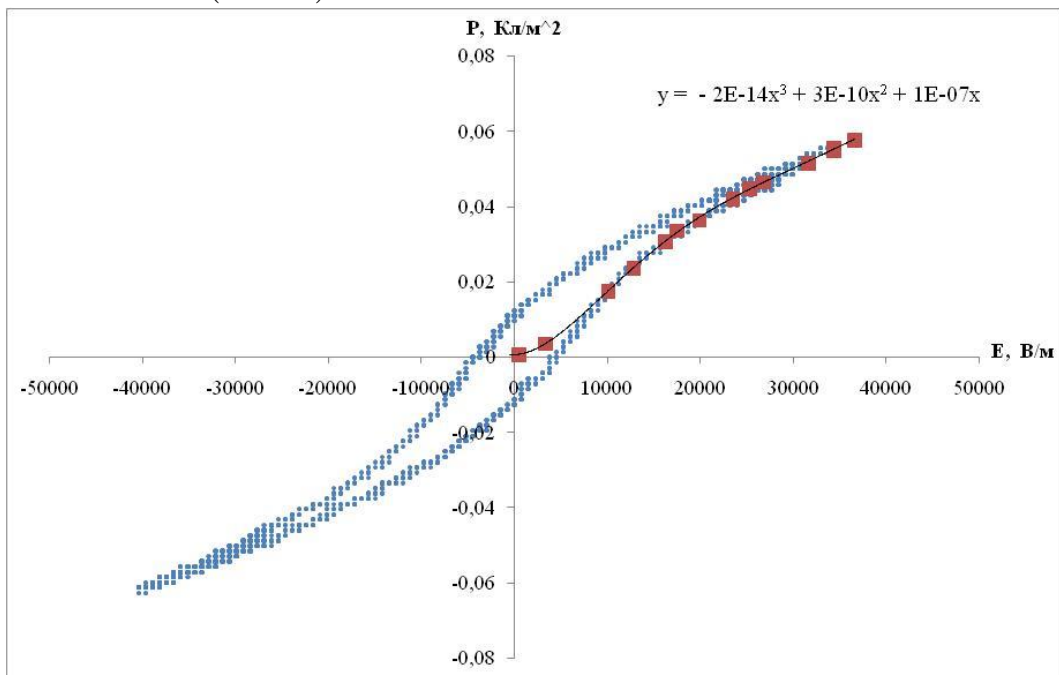
В ходе работы зарегистрировали петлю гистерезиса предельного цикла при напряжении на генераторе 15В и частоте 1,6 кГц. При экстраполяции участка насыщения до пересечения с  $E=0$  получили коэрцитивное поле  $E_c = 4489 \pm 22$  В/м, остаточную  $P_r = 0,013 \pm 0,003$  Кл/м<sup>2</sup> спонтанную  $P_s = 0,024 \pm 0,006$  Кл/м<sup>2</sup> поляризации (см. рис.3, стрелками обозначены значения соответствующих величин).

Также с помощью программы, написанной на языке Python, рассчитали площадь под графиком на рис.3, которая и есть средняя энергия потерь на переполяризацию образца в единице объёма  $\Delta W = (16 \pm 2) \cdot 10^3$  Дж/м<sup>3</sup>. Умножив это значение на частоту 1,6 кГц, получили среднюю мощность потерь в единице объёма  $\Delta N = (26 \pm 3) \cdot 10^6$  Вт/м<sup>3</sup>. Приняв за объём сегнетоэлектрика величину  $V = S \cdot d = 0,096$  мм<sup>3</sup>, получим среднюю мощность  $N = (2,49 \pm 0,28) \cdot 10^{-3}$  Вт и энергию  $W = (1,54 \pm 0,92) \cdot 10^{-6}$  Дж на переполяризацию.

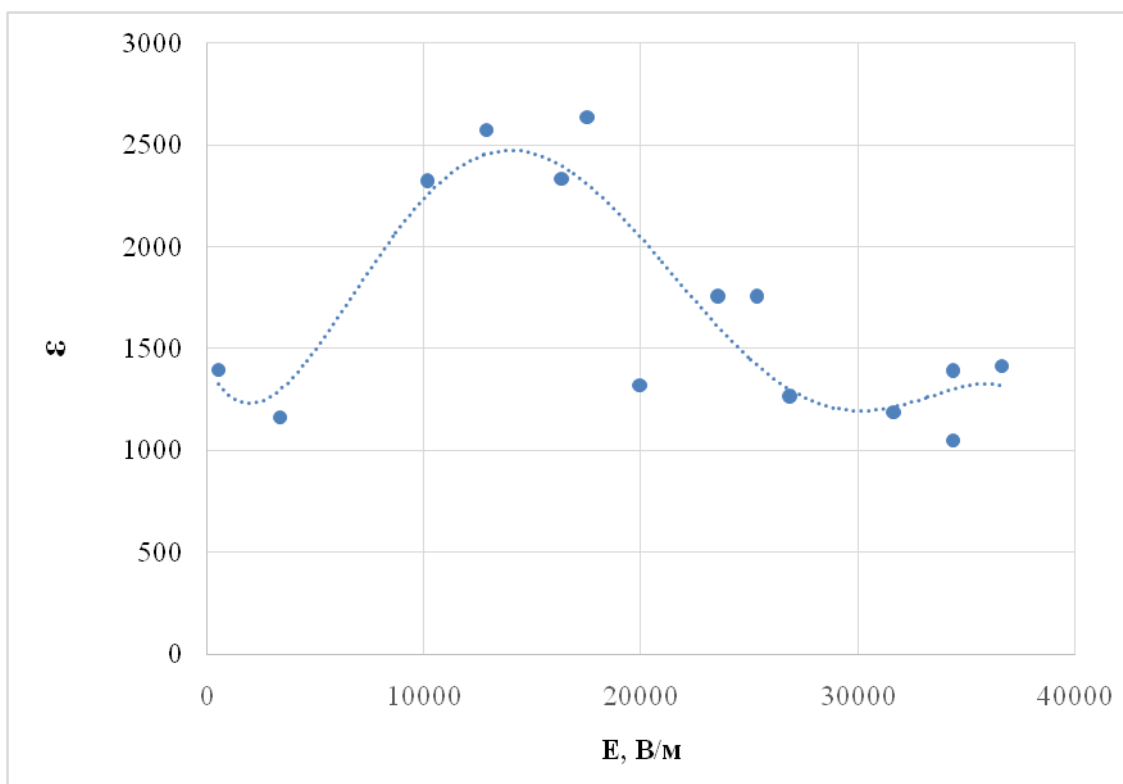


**Рис.3.** Петля гистерезиса. Зависимость  $P(E)$ .

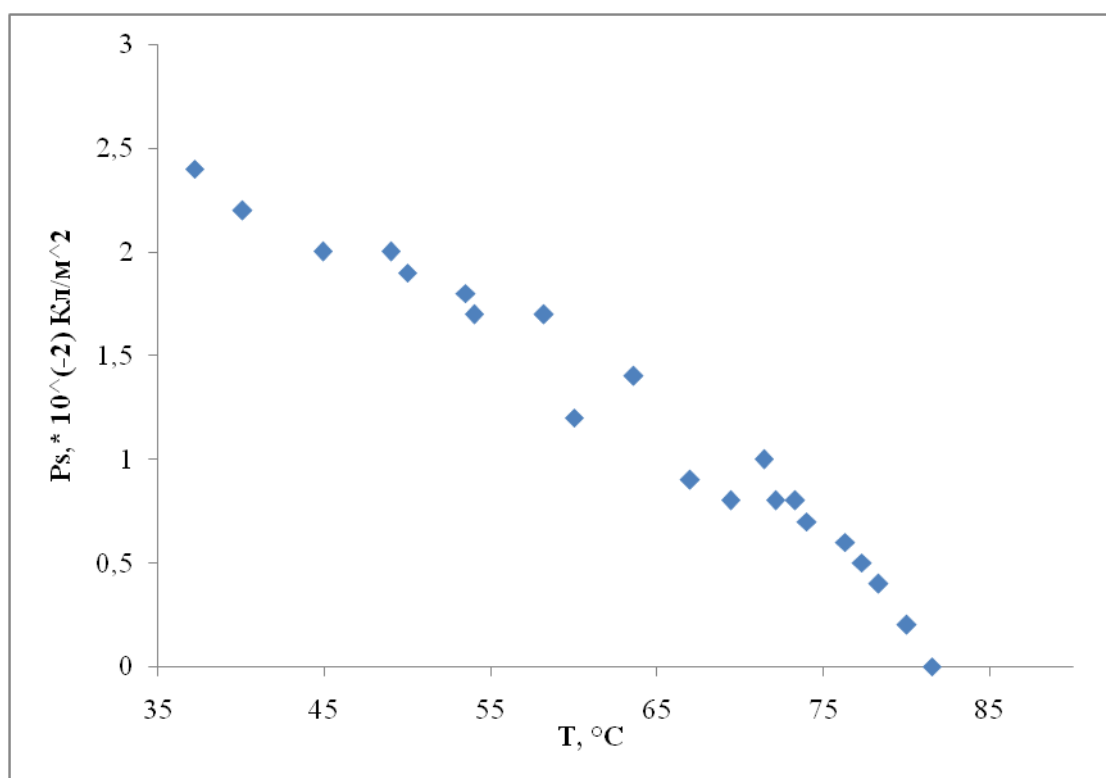
Получили основную кривую поляризации (рис.4) с помощью значений амплитуд напряжений на каналах К1 и К2 при разном напряжении на генераторе. Сравнив её с табличными значениями [6], можно предположить, что данный образец сделан из материала ВК-1 или ВК-2 конденсаторной сегнетоэлектрической керамики. Дифференцированием полученной кривой, нашли дифференциальную  $\varepsilon_{diff} = \frac{dD_{oabc}}{\varepsilon_0 dE}$  (рис.5) и диэлектрическую проницаемости  $\varepsilon = (1,4 \pm 0,1) \cdot 10^3$ .



**Рис.4.** Основная кривая поляризации сегнетоэлектрика.

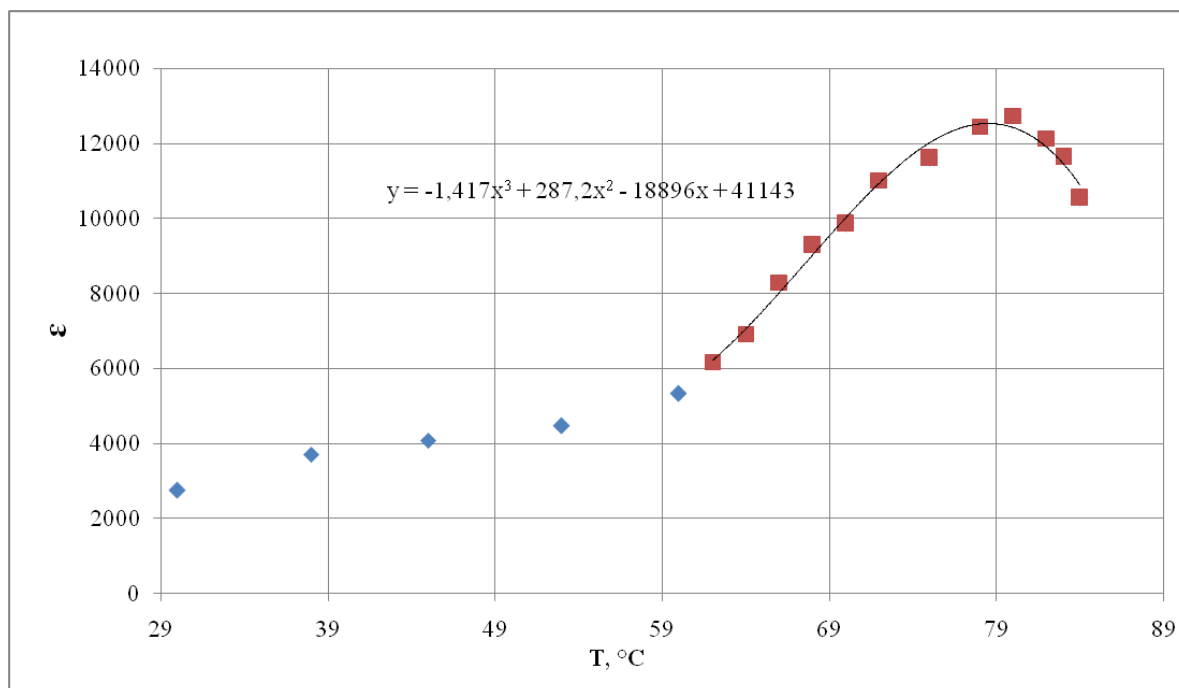


**Рис.5.** Дифференциальная проницаемость сегнетоэлектрика.



**Рис.6.** Зависимость спонтанной поляризации от температуры образца.

В ходе работы построили зависимости  $P_s(T)$  (рис.6). Используя соотношение (12), нашли зависимость  $\varepsilon(T)$  при нагреве образца до температуры выше точки Кюри  $T_c = 79 \pm 3$  °C (рис.7).

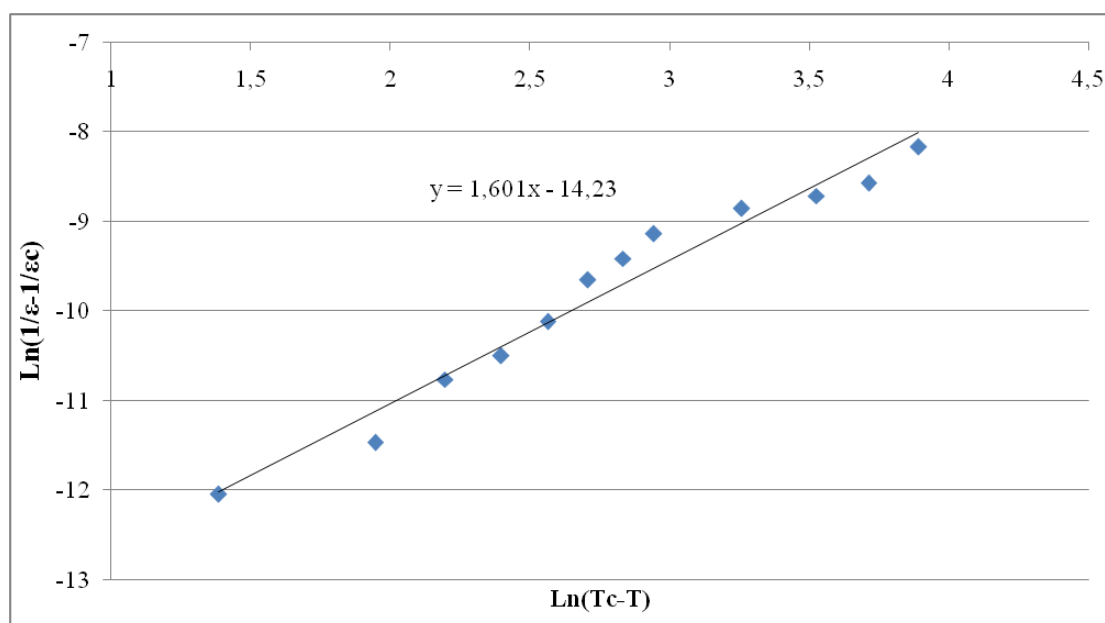


**Рис.7.** Зависимость проницаемости сегнетоэлектрика от температуры.

В точке перехода  $T_C$  наблюдается высокое, но конечное значение

$\varepsilon(T_C) = \varepsilon_C \approx 12455$ . В координатах  $\ln\left(\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon_C}\right)$  от  $\ln(T_C - T)$  получили прямую линию

(рис.8), с тангенсом угла наклона  $n=1,6$  к оси абсцисс, которая пересекает ось ординат в точке  $-\ln C \approx \ln 14.23 \approx 1513598$



**Рис.8.** Зависимость  $\ln\left(\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon_C}\right)$  от  $\ln(T_C - T)$

#### 4. Погрешности измерений

Вычислим погрешность измерений как среднюю ошибку аппроксимации  $\sum_i^n \frac{(y_i - y_x)}{n}$ , где  $y_i$  – фактическое значение измеряемой величины,  $y_x$  - величина, полученная при аппроксимации,  $n$  - общее количество точек. Чтобы иметь общее суждение о качестве модели найдем относительную среднюю ошибку аппроксимации по формуле (15):

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y_i - y_x}{y_i} \right| \cdot 100\% \quad (15).$$

Исходя из формулы (16) [4], по которой можно найти погрешность косвенных измерений, найдем погрешность определения площади под графиком петли гистерезиса:

$$\Delta S = \sqrt{\left(\frac{\partial S}{\partial x} \Delta x\right)^2} \quad (16),$$

где  $\frac{\partial S}{\partial x}$  - частная производная функции  $S = S(x)$ ;  $\Delta x$  - погрешность измерения величины  $x$ .

Исходя из вышесказанного, получили погрешность определения коэрцитивного поля  $\Delta E_c = 22$  В/м, остаточной  $\Delta P_r = 0,003$  Кл/м<sup>2</sup> и спонтанной  $\Delta P_s = 0,006$  Кл/м<sup>2</sup> поляризации, диссипации энергии  $\Delta W = 2 \cdot 10^3$  Дж/м<sup>3</sup> и мощности  $\Delta N = 3 \cdot 10^6$  Дж/(с\*м<sup>3</sup>) за период в единице объема, диэлектрической проницаемости  $\Delta \varepsilon = 0,1 \cdot 10^3$  и температуры Кюри  $\Delta T_c = 3$  °С.

#### 5. Обсуждение полученных результатов

В ходе эксперимента получили спонтанную и остаточную поляризации из графика петли гистерезиса. Относительная погрешность данных величин составила около 20%. Большая погрешность обусловлена тем, что участок насыщения выражен неявно.

Если принять за точку Кюри температуру 79°С и взять в качестве диэлектрической проницаемости  $\varepsilon = \left( \frac{dD_{oabc}}{\varepsilon_0 dE} \right)_{E=0} \approx (1,4 \pm 0,1) \cdot 10^3$ , то, сравнив с

табличными данными [5], можно предположить, что данный образец сделан из материала ВК-1 или ВК-2 конденсаторной сегнетоэлектрической керамики.

Отклонения полученных результатов от табличных значений могут быть обусловлены неконтролируемым теплообменом с окружающей средой, то есть быстрым остыванием образца, что влияет на графики зависимости спонтанной поляризации и диэлектрической проницаемости от температуры. Также следует учесть тепловое расширение материала, которое хотя и мало, но в области высоких температур, может вносить весомую погрешность.

По измеренной диэлектрической проницаемости, которая по порядку величины составила  $10^3$ , можно сказать, что отличительной характеристикой сегнетоэлектриков является большая проницаемость, что способствует созданию из них малогабаритных конденсаторов большой емкости. Причем она

зависит в большой мере от температуры, что было показано на рис.7. Также из аппроксимирующей кривой на графике видно, что область применения закона Кюри-Вейсса начинается с температуры около 57°С.

## 6. Выводы

Мной твёрдо установлено, что диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков в данных условиях эксперимента зависит от температуры, а в точке Кюри наблюдается максимум.

Относительная погрешность диэлектрической проницаемости составила около 7,5÷10% в диапазоне температур от 29 °С до 84 °С.

В ходе опыта были выявлены основные характеристики сегнетоэлектриков: большое значение проницаемости, существование спонтанной поляризации, фазовый переход в точке Кюри, а также резкое изменение спонтанной поляризации при этой температуре.

## 7. Литература

1. Термометр CENTER 309: [http://printsip.ru/izmeriteli-parametrov-okruzhayushchej-sredy/izmeriteli-temperatury-i-vlazhnosti/portativnye-izmeriteli/item/center\\_309](http://printsip.ru/izmeriteli-parametrov-okruzhayushchej-sredy/izmeriteli-temperatury-i-vlazhnosti/portativnye-izmeriteli/item/center_309)
2. Измеритель MT4080D:  
<https://www.rlocman.ru/op/tovar.html?/MT4080&di=61633>
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3: Электричество. М.: Наука 1977.
4. «Погрешности измерений»:  
<https://www.youtube.com/watch?v=tswenXH1AUU>
5. А. Г. Костюрина, С. А. Бордзиловский, В.В. Максимов, О.Е. Терещенко. Лабораторная работа 4.3. Новосиб. гос. ун-т. 2-е изд. перераб. и доп. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2016. – 43 с.
6. Табличные значения сегнетокерамики: <http://www.techsectors.ru/teseps-805-1.html>