

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

Физический факультет

Кафедра физико-технической информатики

Бергман Арсений Семенович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование характеристик конденсатора на основе сегнетоэлектрика**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19305

**Научный руководитель:**

Ведущий инженер лаборатории

ЭМиСВЧ КОФ НГУ

Краснопевцев Спартак Евгеньевич

Оценка научного руководителя

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума**

Оценка преподавателя практикума

к.ф.-м.н. А.А. Симонов.

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

Итоговая оценка

к.т.н. Астрелин В.Т.

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Новосибирск, 2020

## **Аннотация**

Целью работы является выяснение особенностей поведения конденсаторов на основе сегнетоэлектрика. Было проведено определение коэрцитивного поля  $E_c$ , остаточной  $P_r$  и спонтанной поляризации  $P_s$  для образца из сегнетоэлектрической конденсаторной керамики. Определены потери энергии на переполяризацию образца. Найдены значения диэлектрической проницаемости, а также ее зависимость от температуры. Кроме того, был проверен закон Кюри-Вайсса. Основная работа была проделана с помощью схемы для записи петли гистерезиса (Сойер и Тауэр, 1930).

Ключевые слова: Сегнетоэлектрик, Гистерезис, Емкость, Диэлектрическая проницаемость.

## Оглавление

Введение .....	4
Теоретическая часть.....	5
Описание экспериментальной установки.....	6
Методика измерения .....	6
Результаты эксперимента.....	8
Вывод .....	13
Список используемой литературы	13

## Введение

Развитие ряда областей современной техники в значительной степени определяется успехами электроники, основанными на научных достижениях физики твердого тела. Одно из актуальных направлений электроники — миниатюризация аппаратуры. Наряду с уменьшением габаритов аппаратуры ставится задача достижения высокой надежности ее действия при различных условиях эксплуатации.

В последние годы наряду с полупроводниковыми и металлическими активными элементами применяются диэлектрические активные элементы — вариконды. Варикондами называют сегнетокерамические конденсаторы с резко выраженными нелинейными зависимостями поляризации и диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля. Вариконды относятся к сегнетоэлектрикам и обладают свойством спонтанной, т. е. самопроизвольной электрической поляризации, существующей независимо от внешнего поля в некотором интервале температур. Сегнетоэлектрики получили название от сегнетовой соли, у которой в интервале температур от  $-18$  до  $+24^{\circ}\text{C}$  были впервые обнаружены аномальные диэлектрические свойства, получившие название сегнетоэлектрических.

Интенсивное использование сегнетоэлектриков в технике началось после открытия Б.М.Вулом сегнетоэлектрических свойств у керамического титаната бария  $\text{BaTiO}_3$ . Вскоре после этого под руководством Г.А. Смоленского было открыто большое число новых керамических сегнетоэлектриков как простого, так и сложного состава.

В настоящее время известно несколько сотен сегнетоэлектриков, многие из которых могут изготавливаться в виде поликристаллических материалов по керамической технологии. Наиболее изученным является титанат бария, поэтому для описания свойств новых сегнетокерамических материалов проводят их сравнение со свойствами  $\text{BaTiO}_3$ .

В научной литературе многих зарубежных стран сегнетоэлектрики называются также и ферроэлектриками. Это обусловлено формальным сходством явлений сегнетоэлектричества (ферроэлектричества) и ферромагнетизма.

## Теоретическая часть

Сегнетоэлектричество — явление возникновения в определенном интервале температур спонтанной поляризации в кристалле, даже в отсутствии внешнего электрического поля, которая может быть переориентирована его приложением. Кристаллы, которым присуще явление сегнетоэлектричества, называются сегнетоэлектриками. Сегнетоэлектрики отличаются от пьезоэлектриков тем, что при определенной температуре (так называемой диэлектрической точке Кюри) их кристаллическая модификация меняется и спонтанная поляризация пропадает [1].

Температура, при которой исчезает спонтанная поляризация (то есть собственный дипольный момент) и происходит перестройка кристаллической структуры, носит название температуры (точки) Кюри. Переход через точку Кюри означает фазовый переход, а соответствующие фазы обозначаются как полярная (сегнетоэлектрик) и неполярная (параэлектрик — нелинейный диэлектрик, не обладающий спонтанной поляризацией, относительная диэлектрическая проницаемость которого уменьшается с ростом температуры). Спонтанная поляризация в сегнетоэлектриках в точке Кюри меняется либо непрерывно, либо скачком. Другие характеристики сегнетоэлектриков, такие как относительная диэлектрическая проницаемость, могут достигать в точке Кюри очень больших значений [2].

Вблизи точки Кюри в неполярной фазе выполняется закон Кюри — Вейсса, связывающий диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon$  и температуру  $T$  сегнетоэлектрика [2]:

$$\varepsilon = \frac{C}{T - T_0}$$

где  $C$  — константа Кюри и  $T_0$  — величина, которая носит название температуры Кюри — Вейсса и очень близка к значению температуры Кюри.

Механизм приобретения дипольного момента в полярной фазе (фазе сегнетоэлектрика) может также различаться: возможен вариант как со смещением ионов, так и с упорядочиванием ориентации уже существующих в веществе диполей.

## Экспериментальная установка

Исследуемый образец представляет собой плоскопараллельную пластинку сегнетоэлектрической конденсаторной керамики толщиной  $d = 0,6\text{мм}$  и площадью  $S = 16\text{мм}^2$  с посеребренными плоскостями, к которым припаяны электрические выводы. Для определения свойств сегнетоэлектрика строится петля гистерезиса. Схема, используемая для построения приведена на рис.1.

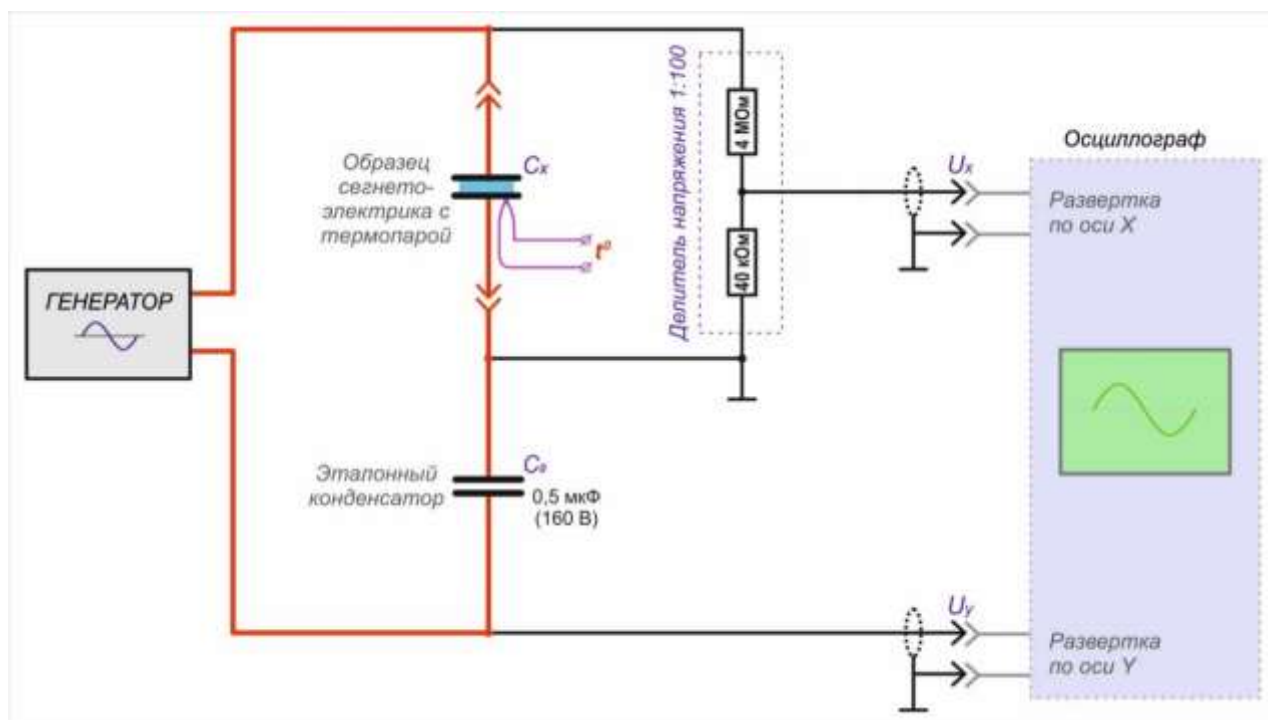


Рис 1. Схема для записи петли гистерезиса

## Методика измерений

К выходу генератора синусоидальных колебаний присоединены последовательно два конденсатора, один из которых - это исследуемый образец сегнетоэлектрика ( $C_x$ ), а второй - эталонный линейный конденсатор  $C_0$ . В схеме выполняется условие  $C_0 \gg C_x$ , благодаря которому можно считать, что практически все напряжение с генератора падает на конденсаторе  $C_x$ , и, следовательно, напряжение  $U_x$ , снимаемое с этого конденсатора, является синусоидальным. С делителя 1:100 напряжение  $U_x$ , подаётся на вход канала 1 осциллографа. Это напряжение пропорционально напряженности электрического поля в сегнетоэлектрике

$$E = \frac{U_x}{d}.$$

Второй канал осциллографа (Y) подключен к линейному конденсатору  $C_0$ . Если измерительная цепь (пробники, подсоединенные к осциллографу) не оказывает сильного влияния на тестируемую схему, то можно приближенно полагать равенство зарядов на двух последовательно соединенных конденсаторах:

$$Q = U_x C_x = U_y C_0,$$

где  $U$  — напряжение на линейном конденсаторе. Кроме того, из граничных условий на поверхности раздела «металлическая обкладка — сегнетоэлектрик» следует, что в сегнетоэлектрике

$$D = 4\pi \frac{Q}{S}.$$

Комбинируя две последние формулы, получим

$$D = 4\pi \frac{U_y C_0}{S}.$$

Напряжение на линейном конденсаторе оказывается пропорциональным электрической индукции в сегнетоэлектрике. Если, кроме того, выполняется условие  $4\pi P \gg E$ , то можно записать для поляризации  $P = \frac{U_y C_0}{S}$ .

Петля гистерезиса наблюдается в экранном режиме XY: напряжение канала 1 определяет координату точки на оси X (горизонтальная ось), а напряжение на канале 2 — координату Y (вертикальная ось). Таким образом, по известным параметрам  $C_0$ ,  $S$ , и  $d$  можно построить гистерезисную кривую в виде зависимости  $P(E)$ .

## Эксперимент

Перед началом работы была проверена работоспособность схемы. Для этого вместо исследуемой емкости  $C_x$  подключили обычный линейный конденсатор. Переключите экран в формат XY. Так как вы соединили два линейных конденсатора, то наблюдаемый на экране эллипс подтверждает работоспособность схемы. Для измерения уровня помех выходное напряжение генератора было убавлено до нуля, получилось около 11мВ. Установленная частота генератора – 500 Гц не изменялась в течении всего эксперимента.

После проверки был подключен исследуемый конденсатор – вариконд. На экране осциллографа в развертке XY можно было наблюдать петлю гистерезиса. Эти данные были записаны в файл формата .csv и переброшены на компьютер для дальнейшей обработки.

Полученные данные посредством Excel были переведены в форму Графика. Ввиду того, что это график зависимости  $U_y(U_x)$ , а нам нужна зависимость  $P(E)$ , значения оси абсцисс была уменьшены в  $d$  раз, а оси ординат увеличены в  $\frac{C_0}{S}$ . Получившийся результат можно наблюдать на рис. 2.

Для построения аппроксимирующей прямой предельной петли было выбрано 50 точек интересующего нас сегмента. По пересечению этой прямой с осью ординат была найдена спонтанная поляризация  $P_s$ . Для нахождения коэрцитивного поля  $E_c$  и остаточной поляризации  $P_r$  нужно найти точки пересечения петли гистерезиса с осью абсцисс и ординат соответственно. Значение энергетических потерь в среднем за период было получено на основании формулы

$$\Delta W \approx \oint E dP$$

а значение интеграла равно площади петли, соответственно его можно выяснить численным интегрированием. Средняя мощность равна произведению частоты на потерю энергии за период:

$$\Delta N \approx f \oint E dP.$$

Все вышеперечисленные данные помещены в таблицу 1.



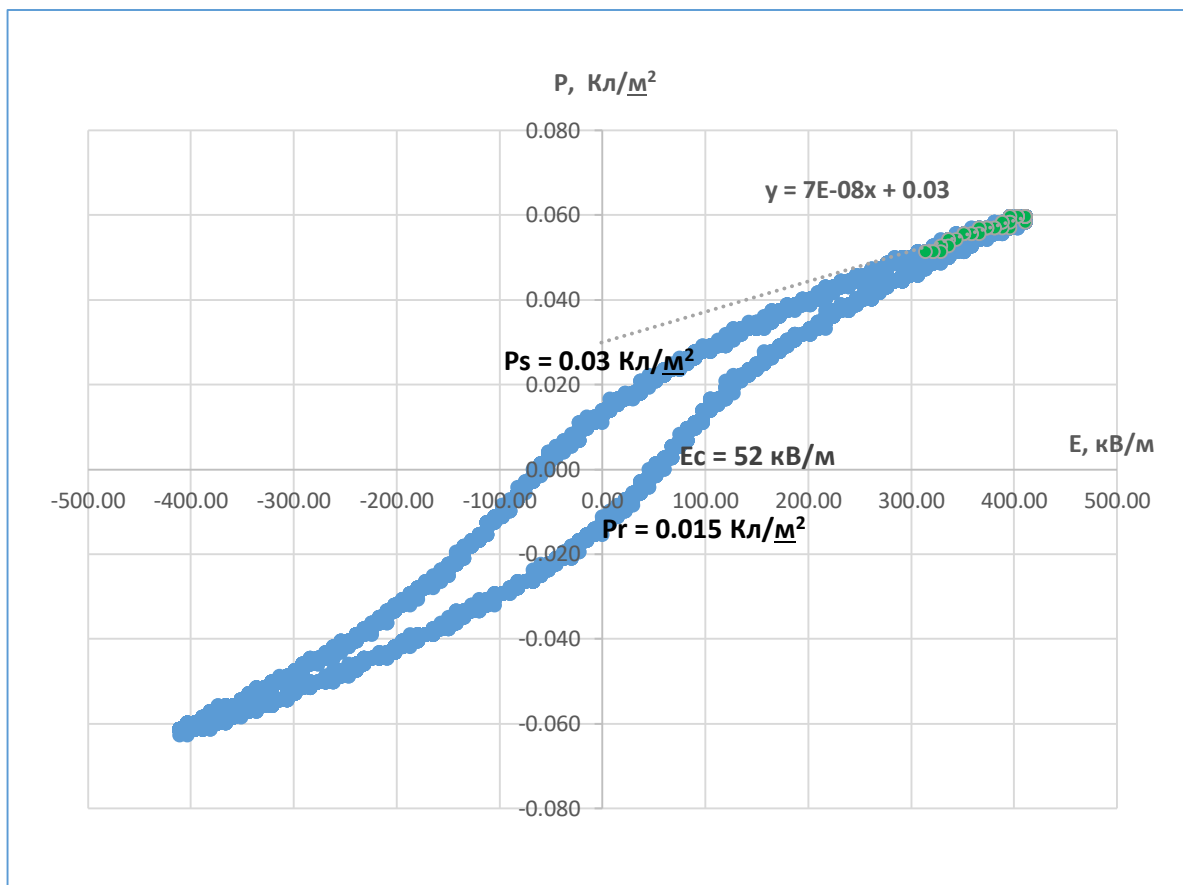


Рис 2. Петля гистерезиса

$P_s$ , Кл/м <sup>2</sup>	$E_c$ , кВ/м	$P_r$ , Кл/м <sup>2</sup>	$W$ , кДж/м <sup>3</sup>	$N$ , МВт/м <sup>3</sup>
0.03	52	0.015	8	4

Таб. 1. Характеристические параметры исследуемого вариконда.

Перейдем к кривой поляризации. Основная кривая поляризации является геометрическим местом точек вершин частных циклов, которые получены при различных амплитудах переменного поля в образце. Дифференцируя это кривую, получим дифференциальное значение диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon_{dif} = \frac{dD(E)}{\varepsilon_0 dE},$$

где  $D(E)$  – кривая поляризации. А значение  $\varepsilon$  это  $\varepsilon_{dif}(E = 0)$ . Часть кривой поляризации изображена на Рис 3. Аппроксимируя полиномом получим уравнение  $D(E)$ , откуда по формуле  $\varepsilon = 4400 \pm 1000$ .

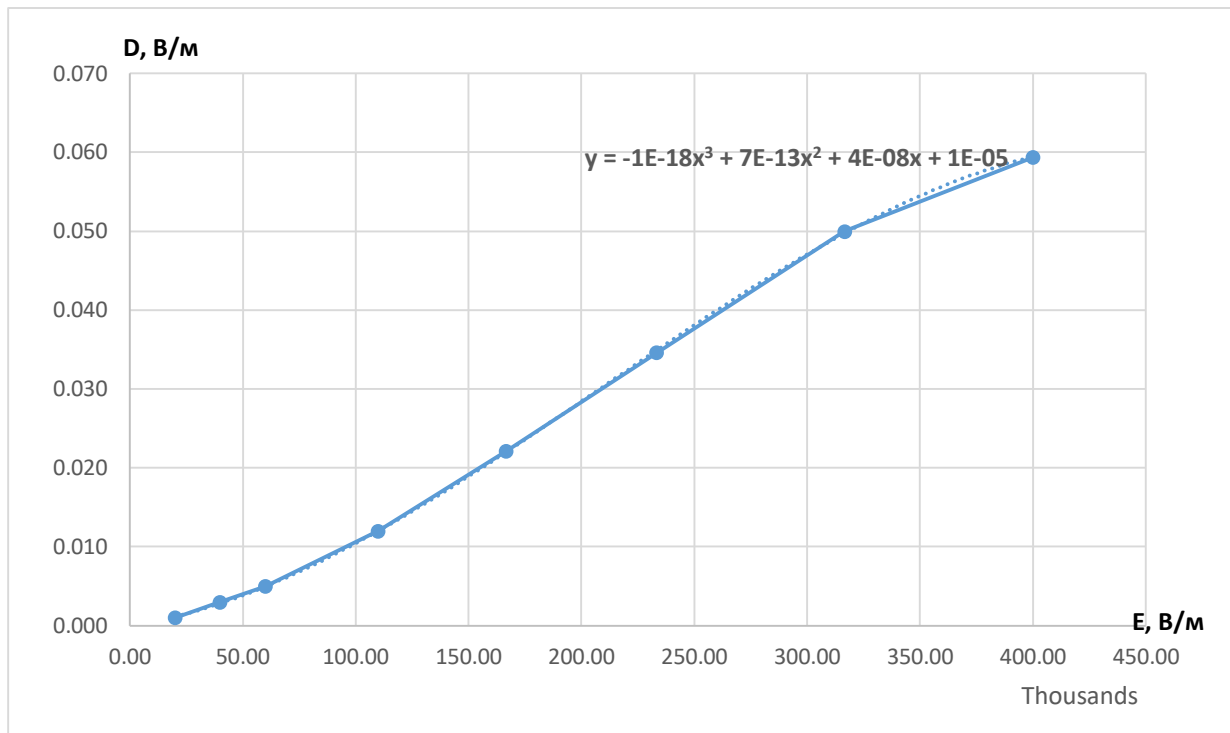


Рис 3. Кривая поляризации

Следующим шагом была определена температурная зависимость спонтанной поляризации  $P_s(T)$ . Конденсатор поместили в нагреватель и для разных температур было измерена  $P_s$  также как было сделано выше. С увеличением температуры  $P_s$  уменьшается и при температуре перехода  $T_c$  (Точка Кюри) становится близкой к нулю. Как видно из Рис 4.  $T_c = 79 \pm 2^\circ\text{C}$ .

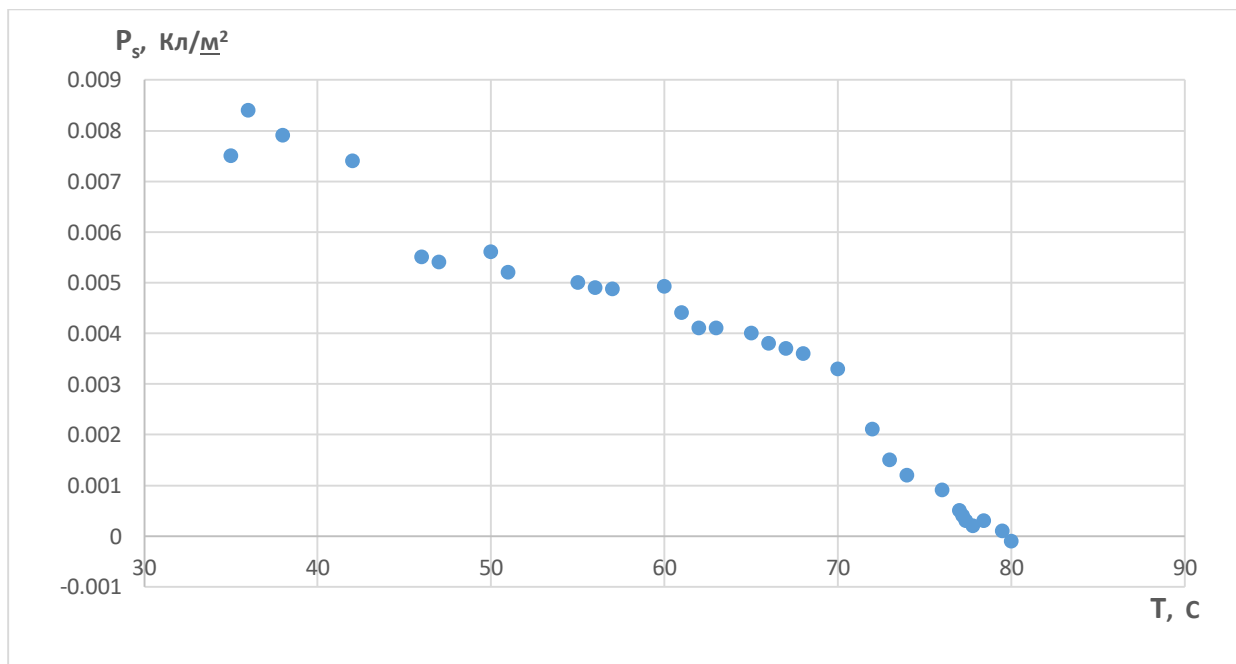


Рис 4. Спонтанная поляризация при разных температурах

В завершение была определена температурная зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика  $\epsilon(T)$ , а также проверен закон Кюри–Вейсса в области фазового перехода. Вариконд был подсоединен к прибору для измерения емкости и температуры. Так же, как и в прошлой задаче, включив нагреватель, были сняты данные для разных температур, в данном случае - емкость. Используя зависимость  $C_x(T)$  построим  $\epsilon(T)$  - Рис 5 по формуле

$$\epsilon(T) = \frac{C_x(T)}{\epsilon_0 S} d.$$

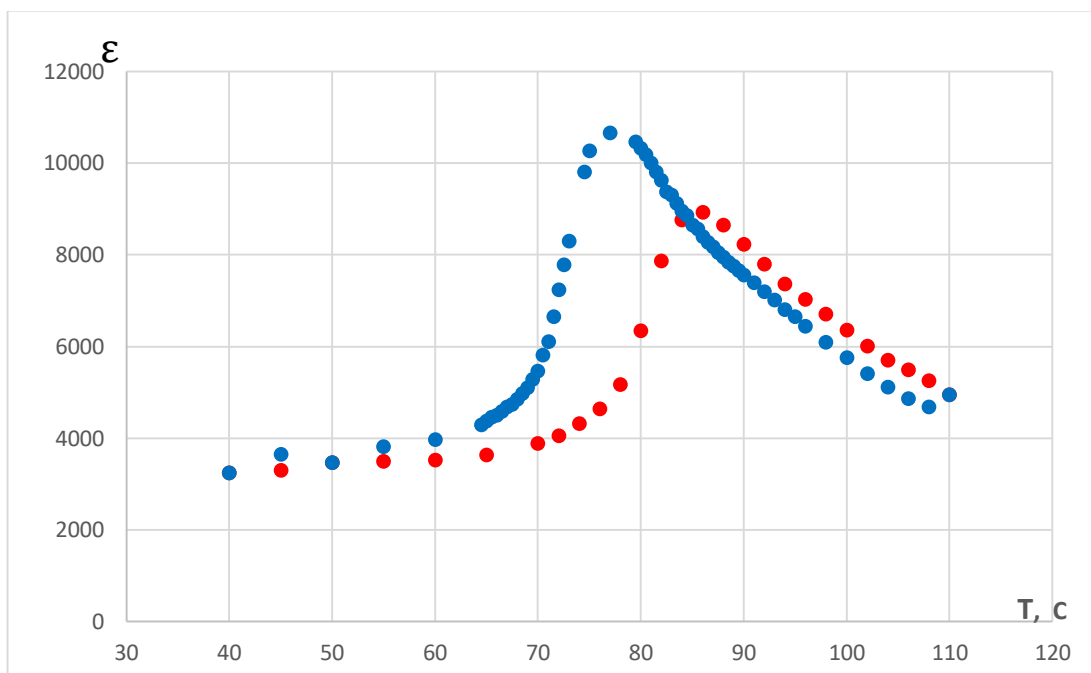


Рис 5. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры

Пик зависимости соответствует точке Кюри  $T_c = 77 \pm 2^\circ\text{C}$ . Смещение зависимостей при остывании и нагревании относительно друг друга объясняется задержкой реакции при переходе из одной фазы в другую, а различие в максимальных значениях может быть объяснено различным числом повернутых доменов при нагреве и охлаждении [3].

Найдем вид зависимости выше. При температурах близких к точке Кюри можно воспользоваться обобщенным законом Кюри – Вейсса:

$$\frac{1}{\epsilon} - \frac{1}{\epsilon_c} = \frac{(T - T_c)^n}{C}$$

где  $n$  - показатель степени при температуре.

Для упрощения работы преобразуем данное выражение в линейное уравнение в логарифмических координатах и построим его график – Рис 6, по которому определим показатель степени  $n$  и константу  $C$ .

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

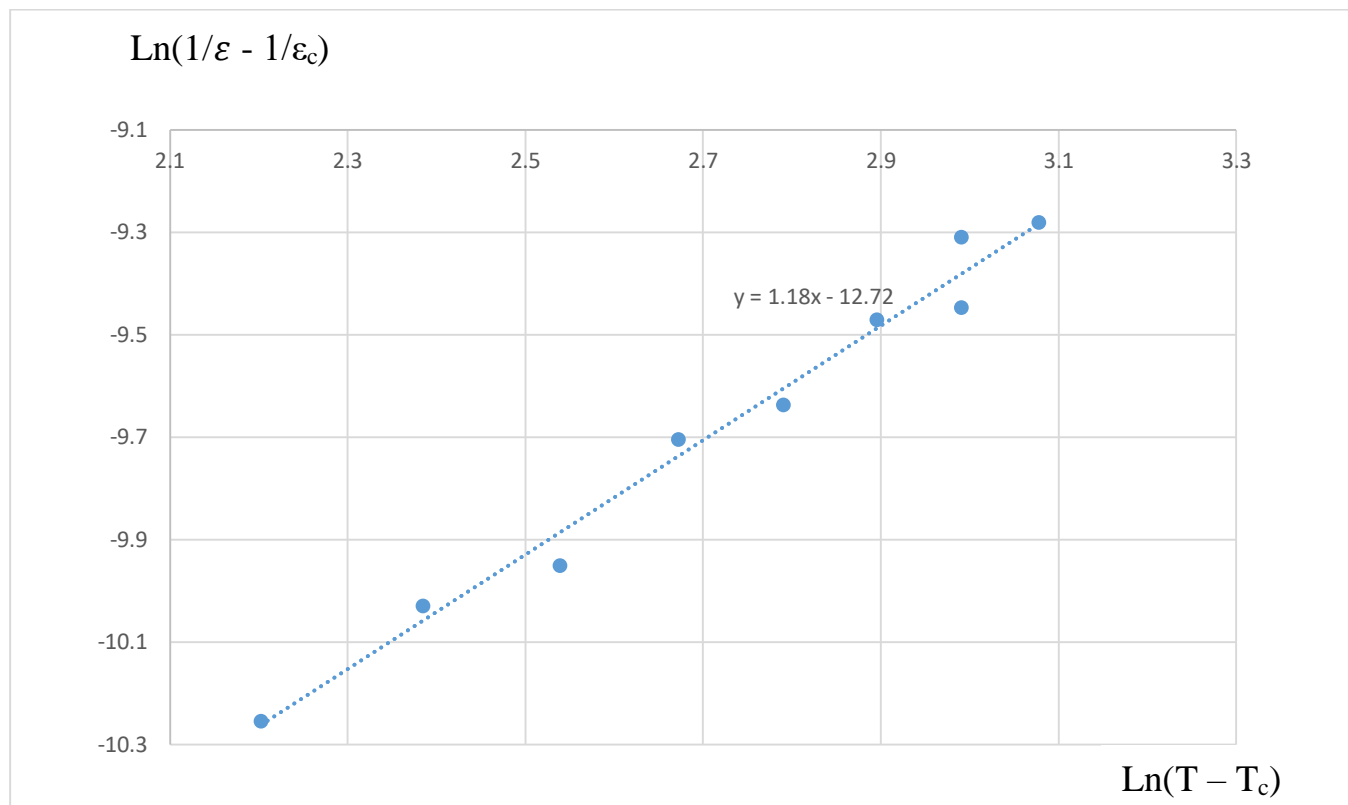


Рис 6.

Полученные значения  $n = 1,2 \pm 0,3$  и  $C = (3,3 \pm 0,1) \cdot 10^5 \text{ K}$ . По закону Кюри-Вейсса  $n = 1$ , а, следовательно, наше данные можно считать подтверждением этого закона.

## **Вывод**

Исходя из данных полученных в данном эксперименте, можно утверждать нелинейность емкости конденсаторов из сегнетоэлектриков. Также стало понятно, что значение этой емкости зависит от температуры. Было подтверждены такие явления как спонтанная поляризация в кристалле конденсатора, а также отсутствие поляризации при определенном значении внешнего поля – называемого коэрцитивным. Наблюдалось и обратное явление - наличие поляризации (остаточная поляризация) при отсутствии поля как такого. Всё перечисленное является отличительными признаками варикондов.

## **Список литературы.**

1. А. Г. Костюрина, С. А. Бордзиловский, В. В. Максимов, О. Е. Терещенко  
Электрические и магнитные свойства твердых тел. В. 4.
2. Википедия. Сегнетоэлектричество. [Электронный ресурс]. URL:  
<https://ru.wikipedia.org/wiki/Сегнетоэлектричество>.
3. А. М. Прохоров Физическая энциклопедия. Т.4. стр. 479.
4. Д. В. Сивухин Общий курс физики. Т.3. Электричество.