

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Токарев Андрей Вадимович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Изучение явления сегнетоэлектричества в образце из конденсаторной
сегнетоэлектрической керамики.**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19312

Научный руководитель:

к.ф. – м.н. Иванов Иван Анатольевич

Оценка научного руководителя

« _____ » _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

аспирант Матвеев Антон Сергеевич

Оценка преподавателя практикума

« _____ » _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

« _____ » _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация.

Целью данной работы является изучение свойств образца из конденсаторной сегнетоэлектрической керамики. Работа была проведена на установке, представляющей собой классическую схему для записи петли гистерезиса по методу Сойера – Тауэра. В работе была снята гистерезисная зависимость вектора поляризации \mathbf{P} и поля \mathbf{E} в сегнетоэлектрике. Были определены величины спонтанной и остаточной поляризации, коэрцитивного поля. Измерена зависимость диэлектрической проницаемости от температуры. Результаты измерений согласуются с теорией и известными данными.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики, Закон Кюри - Вейсса, остаточная поляризация, спонтанная поляризация, коэрцитивное поле.

Содержание	
Введение.	4
Экспериментальная установка и регистрация петли гистерезиса.	5
Эксперимент.	6
Заключение.	12
Список литературы.	12

Введение.

Сегнетоэлектричество – это явление возникновения в кристаллическом диэлектрике спонтанной поляризации \mathbf{P}_s при определённых температурах (меньших температуры Кюри – T_c) и в том числе при отсутствии внешних полей. Состояние, в котором сегнетоэлектрики имеют доменную структуру, называется полярным (см. рис. 1). В каждом домене элементарные дипольные моменты кристалла сонаправлены, однако от домена к домену направление дипольных моментов, образующих вектор поляризации \mathbf{P}_s , может не совпадать [1].

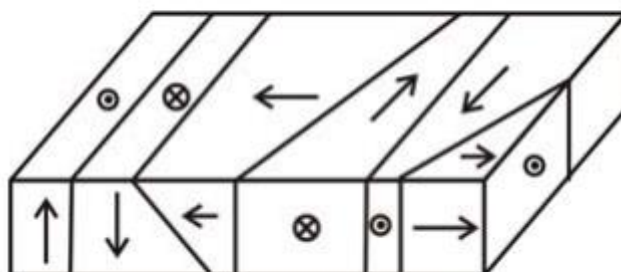


Рисунок 1. Доменная структура кристалла BaTiO_3 . Стрелками указаны направления дипольных моментов, образующих \mathbf{P}_s

При воздействии внешнего поля элементарные дипольные моменты внутри доменов выстраиваются вдоль внешнего поля и с увеличением поля все больше доменов становятся сонаправленными и сегнетоэлектрик переходит приобретает все большую спонтанную поляризацию. При отключении внешнего поля часть доменов останется в поляризованном состоянии, откуда возникает эффект остаточной поляризации. Данная структура сегнетоэлектрика порождает гистерезисную зависимость между полем $\mathbf{D}(\mathbf{E})$ и его поляризацией $\mathbf{P}(\mathbf{E})$.

Температура, при которой происходит перестройка кристаллов и пропадает спонтанная поляризация называется точкой Кюри. По достижении точки Кюри происходит фазовый переход от полярной фазы к неполярной. При температурах, больших температуры Кюри, зависимость

диэлектрической проницаемости ε от температуры можно приблизительно описать законом Кюри – Вейсса:

$$\varepsilon \approx \frac{C}{T - T_c}$$

Данная работа посвящена изучению сегнетоэлектричества в образце из конденсаторной сегнетоэлектрической керамики.

Основными задачами при выполнении работы были:

- Наблюдение петли гистерезиса, динамики вектора поляризации \mathbf{P}_s в зависимости от температуры, определение точки Кюри
- Определение энергетических потерь на переполяризацию;
- Определение температурной зависимости емкости и диэлектрической проницаемости образца, а также эмпирическое определение констант в законе Кюри – Вейсса.

Экспериментальная установка и регистрация петли гистерезиса.

Исследуемый образец представляет собой плоскопараллельную пластинку сегнетоэлектрической конденсаторной керамики толщиной $d = 0,6$ мм и площадью $S = 16$ мм² с посеребренными плоскостями, к которым припаяны электрические выводы. На рис. 2 приведены схема установки, с помощью которой регистрируется петля гистерезиса.

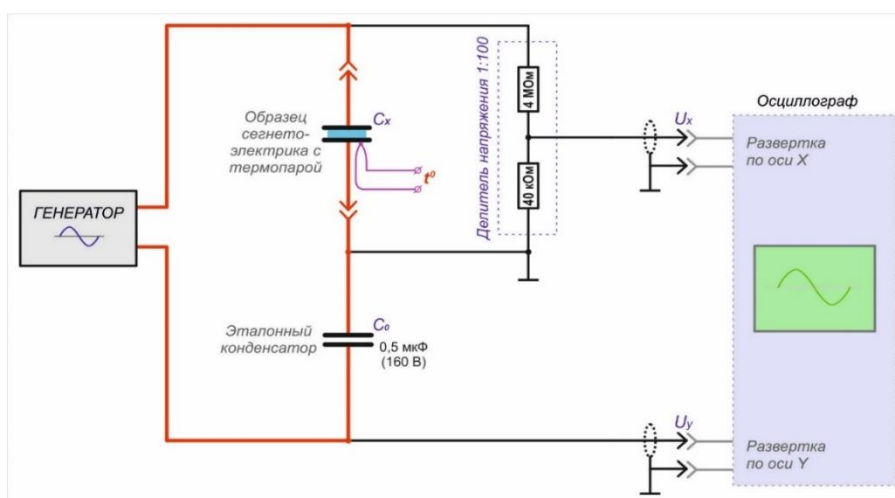


Рисунок 2. Схема для записи петли гистерезиса

Сигнал с генератора идет на два последовательных конденсатора, один из которых (C_x) – это образец сегнетоэлектрика, а другой – эталонный линейный конденсатор (C_0), причем выполнено условие $C_0 \gg C_x$ и можно считать, что все падение напряжения с генератора происходит на конденсаторе из сегнетоэлектрика. Таким образом напряжение U_x , снимаемое каналом х осциллографа является синусоидальным, с амплитудой в 100 раз меньше, чем на конденсаторе C_x (т.к. снимается с делителя напряжения 1:100). Как известно, напряжение пропорционально напряженности в конденсаторе, отсюда:

$$E = \frac{100U_x}{d}.$$

Второй канал осциллографа подключен к линейному конденсатору, и пренебрегая влиянием измерительной цепи (при работе на частоте 500 Гц влиянием искажений можно пренебречь, и импеданс C_x значительно мал по сравнению с сопротивлением делителя), можно считать, что заряды на последовательных конденсаторах примерно одинаковы, отсюда

$$D = \frac{Q}{S} = \frac{U_y C_0}{S} = \frac{100U_x C_x}{S} = P, \text{ при } P \gg \varepsilon_0 E$$

Таким образом можно наблюдать петлю гистерезиса на осциллографе в экранном режиме XY, и в дальнейшем построить зависимость $P(E)$ или $D(E)$.

Для снятия температурных зависимостей образец сегнетоэлектрика был помещен в нагреватель. Температура образца измерялась с помощью датчика температуры, находящегося в тепловом контакте с одной пластиной образца.

Эксперимент.

Первым делом была проверена работоспособность установки и уровень шумов. Для этого в цепь вместо конденсатора с сегнетоэлектриком был подключен линейный конденсатор, при этом в формате XY наблюдался эллипс, а значит установка работоспособна. Далее выходное напряжение генератора было убавлено до нуля и уровень помех при этом составлял ~10 мВ. Частота генератора на всем протяжении эксперимента остается ~500 Гц.

Затем был подключен исследуемый образец сегнетоэлектрика и наблюдалась петля гистерезиса. Данные с осциллографа были записаны в CSV файл, а последующая их обработка происходила в программе LibreOffice Calc. Зарегистрированная петля изображена на рис. 3, а полученные данные приведены в таблице 1. Полученные данные были отсортированы по значению U_y и для нахождения P_s были взяты 30 точек с наибольшим значением U_y , по которым была построена аппроксимирующая прямая, из которой было определено нужное значение. Значение коэрцитивного поля E_c и остаточной поляризации P_r получены как пересечения кривой с осями X и Y. Значение энергетических потерь на переполяризацию в единице объема за один период было получено численным интегрированием (площадь петли), а средняя мощность за период получена путем умножения потерь на частоту:

$$\Delta w = \int E dD \approx \int E dP, \text{ при } P \gg \epsilon_0 E$$

W, кДж/м ³	N, кВт/м ³	P _r , мКл/м ²	E _c , кВ/м	P _s , мКл/м ²
2,5±0,3	1250±1,2	6,3±0,6	50±3	12.7±0,9

Таблица 1. Таблица значений поля, потерь энергии и поляризации

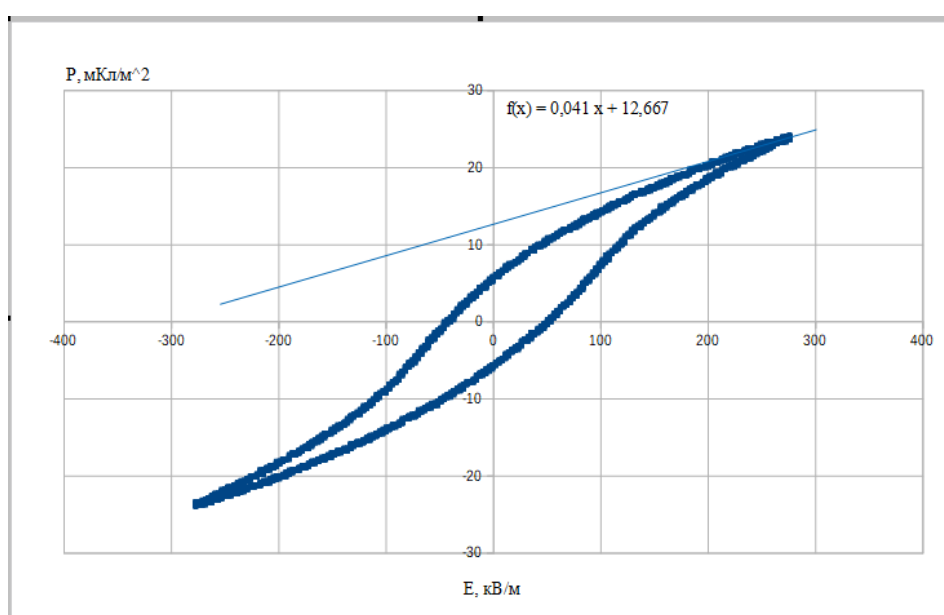


Рисунок 3. Петля гистерезиса

Далее была построена основная кривая поляризации (рис. 4), и приближена методом наименьших квадратов полиномом третьей степени. Была построена зависимость дифференциальной диэлектрической проницаемости ϵ_{diff} от E :

$$\epsilon_{diff} = \frac{dD(E)}{\epsilon_0 dE},$$

где $D(E)$ – основная кривая поляризации. Определена диэлектрическая проницаемость $\epsilon \equiv \epsilon_{diff}(0) \approx 6000$. Также зависимость $\epsilon_{diff}(E)$ получается из кривой поляризации путем численного дифференцирования. Ниже на одном графике отображены зависимости ϵ_{diff} от E , полученные двумя способами, и прямая насыщения (см. рис. 5):

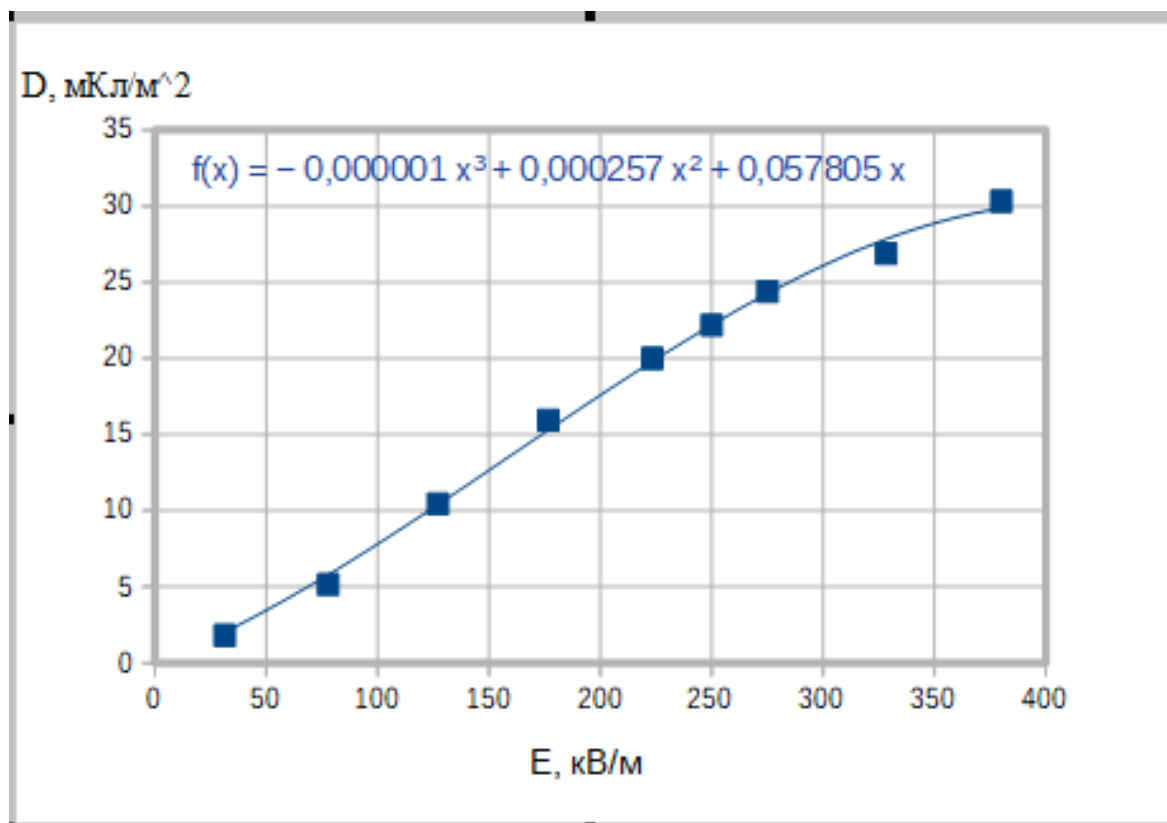


Рисунок 4. Основная кривая поляризации

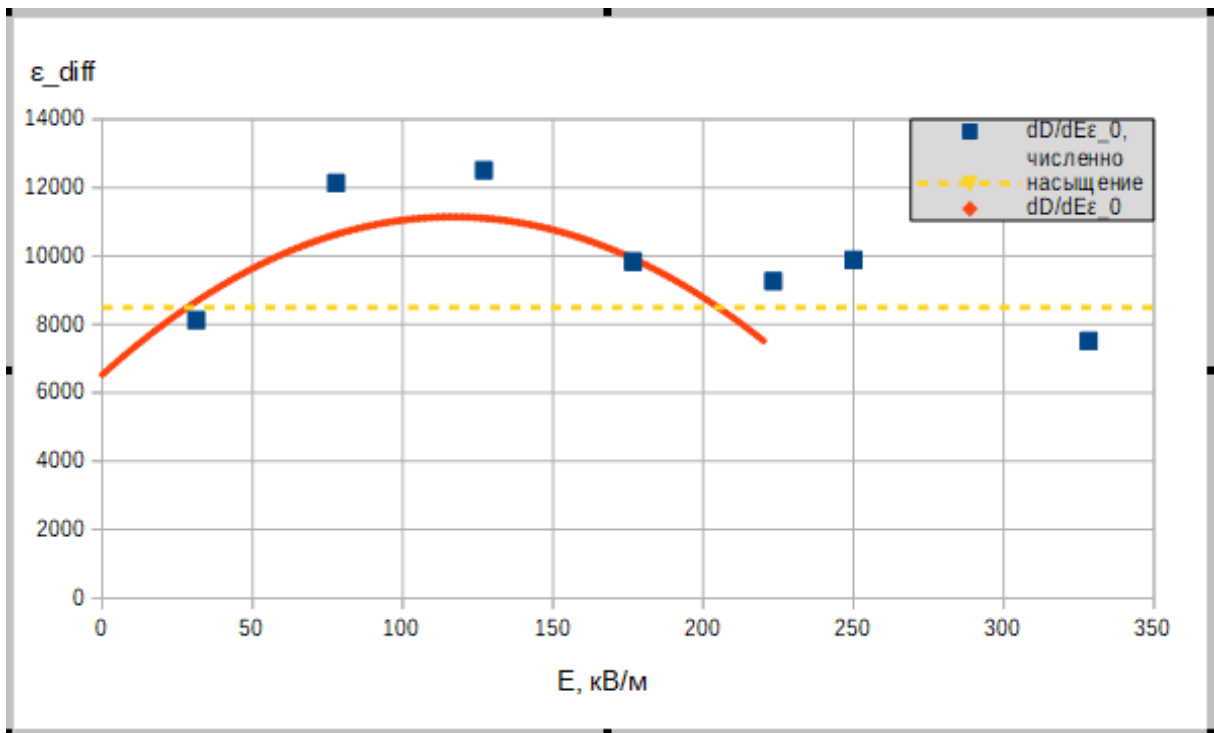


Рисунок 5. Зависимость дифференциальной диэлектрической проницаемости от поля

Затем была определена температурная зависимость спонтанной поляризации $P_s(T)$. Для этого образец был помещен в нагреватель и для каждой измеренной температуры было получено значение спонтанной поляризации по методу, описанному выше. Результаты данных измерений представлены на рис. 6. По графику определяется точка Кюри (температура, при которой значение спонтанной поляризации приближается к нулю). Ее значение составило $T_c = 77 \pm 3^\circ\text{C}$.

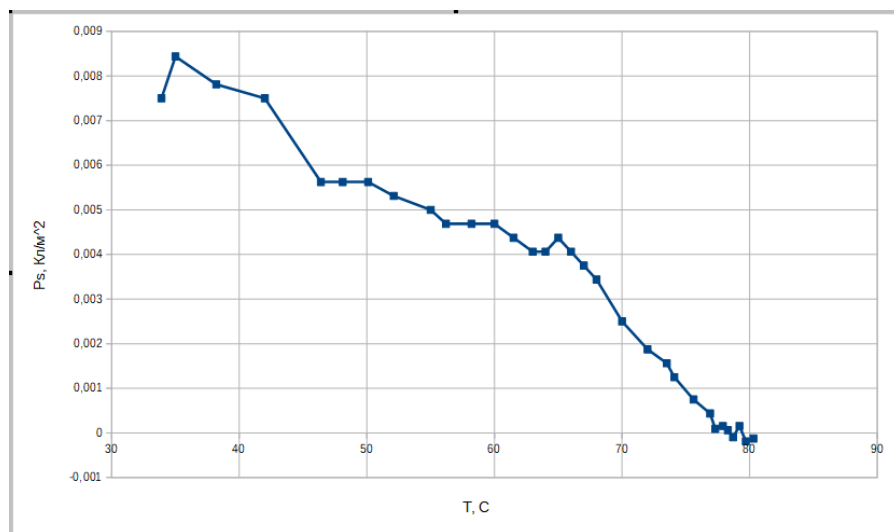


Рисунок 6. Зависимость спонтанной поляризации от температуры

Далее была определена температурная зависимость диэлектрической проницаемости $\varepsilon(T)$ и проверен закон Кюри – Вейсса. Для этого образец был отсоединен от основной схемы и подсоединен к прибору для измерения емкости и температуры. После был включен нагреватель и снята зависимость емкости от температуры $C_x(T)$. Была построена зависимость $\varepsilon(T)$ (рис. 7), с использованием соотношения $\varepsilon(T) = \frac{C_x}{C} = \frac{C_x(T)}{\varepsilon_0 S} d$. Из этой зависимости определена точка Кюри $T_c = 76 \pm 3^\circ\text{C}$, которая соответствует пику зависимости. На графике видно, что зависимость при остывании сдвинута относительно зависимости при нагреве, это связано с задержкой перехода из одной фазы в другую, а различие в максимальных значениях может быть объяснено различным числом повернутых доменов при нагреве и охлаждении [2].

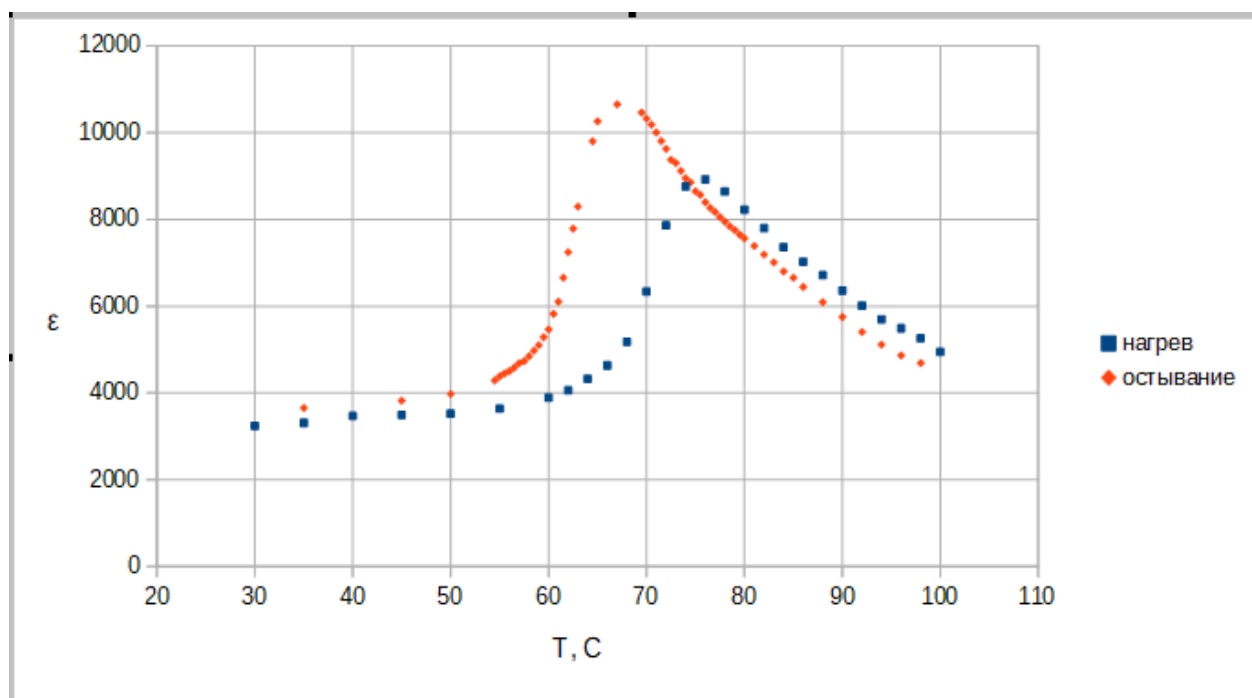


Рисунок 7. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости

Определим вид зависимости диэлектрической проницаемости от температуры. В случае температур, близких к точке Кюри (но превосходящих ее) можно обобщить закон Кюри – Вейсса:

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

возьмем логарифм от обеих частей:

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

Получаем линейное уравнение в логарифмических координатах, откуда по коэффициенту можно определить показатель степени n , а по смещению константу C . Данная зависимость отражена в графике на рис. 8. Проводим линейную аппроксимацию методом наименьших квадратов и получаем соответствующие параметры: $n = 1,1 \pm 0,1$ и $C = (4,3 \pm 0,2)10^5$ К. Показатель степени n очень близок к предсказанному законом Кюри-Вейсса ($n = 1$) и лежит в пределах погрешности, а значение константы C сходится по порядку величины со значением этой константы для титаната бария.

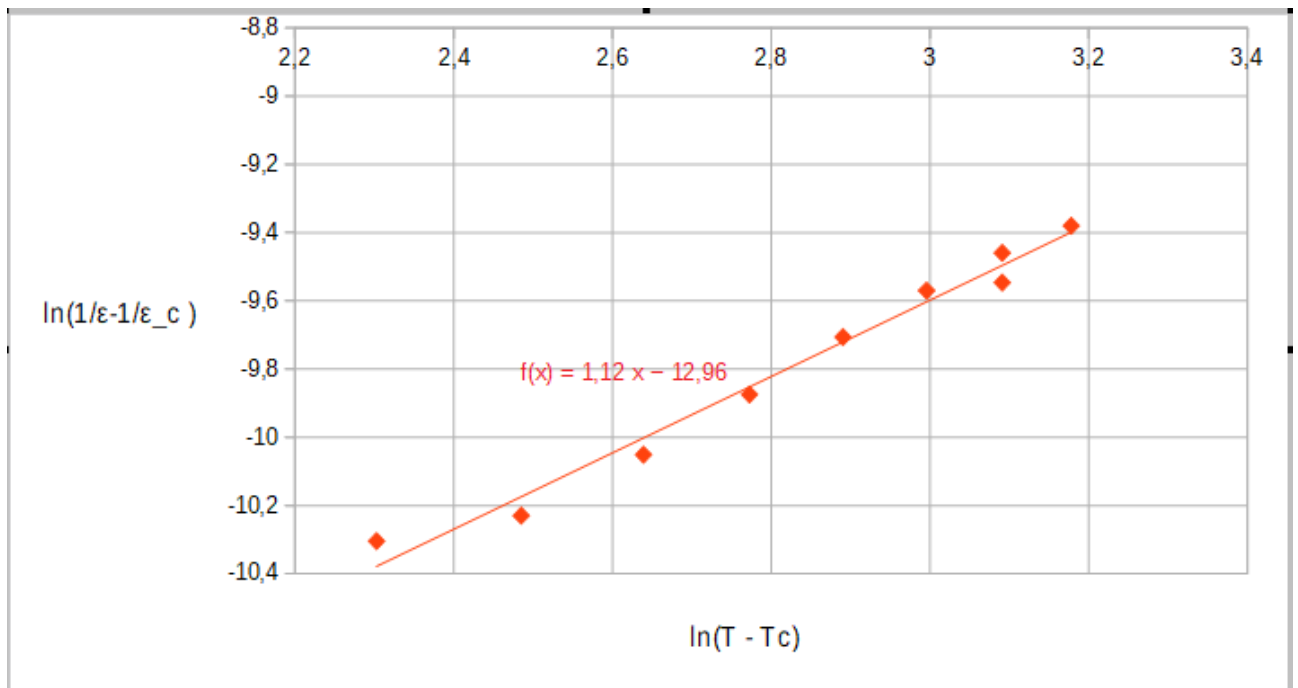


Рисунок 8. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры

Теперь сравним значения диэлектрической проницаемости. При дифференцировании основной кривой поляризации было получено значение $\varepsilon \approx 6000$, а при измерении емкости $\varepsilon = 3300 \pm 170$. Такое различие может быть связано с тем, что для аппроксимации и дальнейшей экстраполяции производной требуется большая плотность измеренных значений, особенно в нуле.

Заключение.

Таким образом, были изучены основополагающие свойства сегнетоэлектриков, получены значения для спонтанной и остаточной поляризации, коэрцитивного поля, были исследованы зависимости спонтанной поляризации и диэлектрической проницаемости от температуры, а также определены точка и константы Кюри. Точка Кюри $T_c = 76 \pm 3^\circ\text{C}$ и константы $n = 1,1 \pm 0,1$ и $C = (4,3 \pm 0,2)10^5 \text{ K}$ согласуются с известными данными (для титаната бария) и теорией. Также полученные значения для коэрцитивного поля, остаточной поляризации и энергетических потерь за период составили $E_c = 50 \pm 3 \text{ кВ/м}$, $P_r = 12,7 \pm 0,9 \text{ Кл/м}^2$ и $W = 2,5 \pm 0,3 \text{ кДж/м}^3$.

Список литературы.

1. А. Г. Костюрина, С. А. Бордзиловский, В. В. Максимов, О. Е. Терещенко
Электрические и магнитные свойства твердых тел. В. 4.
2. А. М. Прохоров Физическая энциклопедия. Т.4. стр. 479.
3. Д. В. Сивухин Общий курс физики. Т.3. Электричество.