

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

---

Кафедра физики

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3э.2

### ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИ- ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СЕГНЕТО- ЭЛЕКТРИКОВ ВБЛИЗИ ТЕМПЕРАТУРЫ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

МЕТОДИЧЕСКОЕ УКАЗАНИЕ

Минск 2021

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3э.2

### ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ ВБЛИЗИ ТЕМПЕРАТУРЫ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

#### Цель работы

1. Изучить поведение диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков вблизи температуры фазового перехода.
2. Определить постоянную Кюри-Вейсса и тип фазового перехода.

#### МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАБОТЫ

Фазовые переходы (ФП) наблюдаются для многих веществ при определенной температуре. Типичным примером фазового перехода первого рода является таяние льда при  $T = 0^{\circ}\text{C}$ , плавление металлов при высоких температурах, кипение воды и др. Переходы в твердом теле между различными фазами вещества, обладающими разными физическими свойствами, очевидно должны происходить с перестройкой кристаллической структуры. Если такая перестройка в твердом теле (при определенной температуре) происходит скачком, то говорят, что происходит фазовый переход первого рода. Однако наряду с таким скачкообразным изменением состояния кристаллической решетки возможен и другой тип перестройки структуры – непрерывный. Непрерывный переход из одной кристаллической модификации (с определенным расположением атомов) в другую (с другим расположением) называется фазовым переходом второго рода. В качестве примера ФП второго рода можно привести переход металла в сверхпроводящее состояние при низкой температуре и переход жидкого гелия в сверхтекучее состояние. В обоих случаях состояние тела меняется непрерывным образом в некотором температурном интервале, но в точке фазового перехода тело приобретает качественно новые свойства.

Фазовые переходы второго рода чаще всего встречаются в полярных диэлектриках, например, сегнетоэлектриках. Сегнетоэлектрики – кристаллические вещества, у которых спонтанная поляризация может менять свое направление под действием внешнего электрического поля. Характерной особенностью сегнетоэлектрических кристаллов является возникновение спонтанной поляризации  $P$  при уменьшении температуры вещества ниже некоторой температуры  $T_k$ . Эта температура называется точкой Кюри. В точке Кюри поляризация  $P$  еще равна нулю, однако, сколь угодно малое понижение температуры приводит к переходу кристалла в новую – сегнетоэлектрическую – фазу с другим порядком в расположении атомов в узлах кристаллической решетки и возникновением доменной структуры. Точка Кюри – это температура фазового перехода.

Если при понижении температуры реализуется фазовый переход первого рода, то поляризация возникает скачком, если второго – то поляризация возникает и плавно растет при дальнейшем понижении температуры (рис. 1).

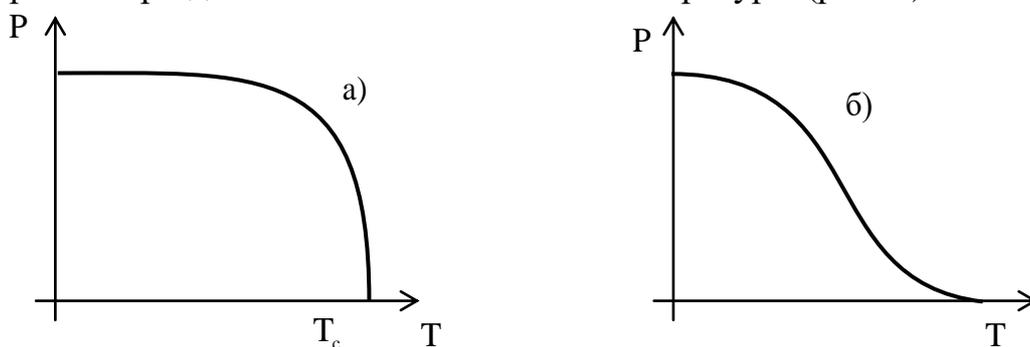


Рис. 1 а) – фазовый переход первого рода; б) – фазовый переход второго рода.

Различие в поведении  $P_c = P_c(T)$  для обоих типов ФП определяет и различие в температурных зависимостях других физических параметров сегнетоэлектриков, особенно вблизи точки Кюри.

Современная техника требует много различных электрических кристаллов. Одни кристаллы преобразуют тепло в электричество и наоборот. Это пьезоэлектрики. Таковы, например, турмалин, сахар и др. Другие кристаллы – пьезоэлектрики – деформируются под действием электрического поля, а механические нагрузки вызывают в них электрическую поляризацию. Наиболее известный пьезоэлектрический кристалл – кварц. Кристаллы пьезоэлектриков излучают и принимают звук и ультразвук, стабилизируют по частоте излучение радиостанций, разграничивают частотные диапазоны в высокочастотной телефонии, служат активными элементами в измерительных приборах. Квантовая радиоэлектроника также не обходится без электрических кристаллов. Такие кристаллы управляют лазерным пучком: отклоняют его, модулируют по интенсивности, обеспечивают получение мощных ("гигантских") импульсов.

Среди электрических кристаллов центральное место принадлежит сегнетоэлектрикам. Такими кристаллами являются сегнетовая соль, титанат бария, дигидрофосфат калия, триглицинсульфат (ТГС) и др. Сегнетоэлектрики имеют высокую диэлектрическую проницаемость, что позволяет делать малогабаритные конденсаторы большой емкости.

В окрестности точки Кюри сегнетоэлектрики испытывают аномалии практически всех физических свойств: тепловых, механических, электрических, оптических. Природа этих аномалий ещё не до конца понята, но резкое изменение свойств сегнетоэлектриков может быть выгодно использовано и уже используется в измерительной аппаратуре и радиоаппаратуре.

Под пьезоэлектрическим эффектом понимают процесс изменения спонтанной поляризации при изменении температуры, т.е. способность некоторых кристаллов поляризоваться при нагревании. Суть этой поляризации сводится к появлению с одной стороны однородного кристаллического образца отрицательного, а с противоположной – положительного заряда при изменении температуры.

В сегнетоэлектрических кристаллах спонтанная поляризация, а значит, и величина поверхностной плотности заряда  $P_n = \sigma'$  сильно зависят от температуры, особенно вблизи точки Кюри. Это привело к использованию таких материалов в качестве чувствительных элементов пироприёмников инфракрасного излучения, а также для измерения различных характеристик лазеров и регистрации мощности СВЧ-сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Кроме того, в настоящее время интенсивно ведутся разработки устройств, преобразующих тепловую энергию, например, энергию Солнца, в электрическую.

В лабораторной работ используются образцы кристалла триглицинсульфата.

**Триглицинсульфат** – хорошо изученный представитель семьи сегнетоэлектрических кристаллов. Он привлекает к себе внимание многих исследователей, так как его сегнетоэлектрические свойства проявляются при комнатной температуре. Кроме того, легко вырастить кристаллы триглицинсульфата больших размеров и он легко растворим в воде.

С химической и кристаллографической точек зрения триглицинсульфат, несомненно, не является простейшим из известных сегнетоэлектриков, однако его феноменологическое поведение оказывается очень простым. Фактически он представляет один из наиболее типичных примеров сегнетоэлектрика. Сегнетоэлектрическая активность кристаллов триглицинсульфата  $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \text{H}_2\text{SO}_4$  (сокращенно ТГС) была открыта Маттиасом и др. в 1956 г.

Фазовому переходу при  $T_K = 49^\circ\text{C}$  в ТГС соответствует частичное упорядочение протонов на водородных связях и подвижных групп глицина I. При этом, естественно, исчезают плоскости зеркального отражения и симметрия кристалла понижается до полярной группы 2. Фазовый переход сопровождается аномалией компоненты  $\epsilon_{22}$  тензора диэлектрической проницаемости (ось  $y$  направлена вдоль полярной оси).

Спонтанная поляризация непрерывным образом зависит от температуры, и фазовый переход обладает всеми чертами фазового перехода II рода (рис. 2). Диэлектрическая проницаемость подчиняется закону Кюри – Вейсса с постоянной  $S$  порядка 3000 К и более.

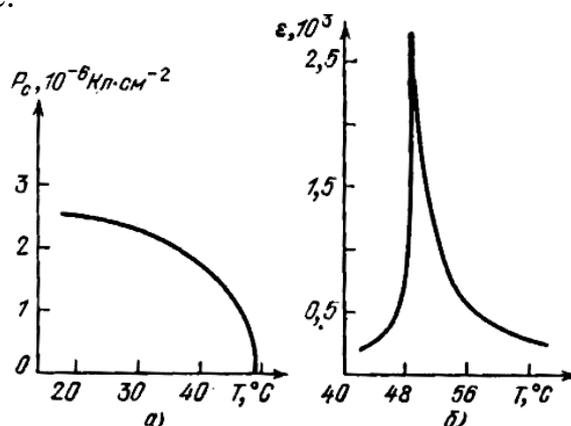


Рис. 2. Температурная зависимость спонтанной поляризации (а) и диэлектрической проницаемости (б) вдоль полярной оси 2 кристалла ТГС.

Значения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрических кристаллов велики, особенно при приближении кристалла к температуре фазового перехода. Большие значения  $\epsilon$  традиционно связывают с подвижностью доменной структуры сегнетоэлектриков во внешнем электрическом поле.

Температурная зависимость диэлектрической проницаемости выше точки Кюри  $T_K$  описывается законом Кюри-Вейсса:

$$\varepsilon = \frac{C}{T - T_K}, \quad (1)$$

где  $C$  – постоянная Кюри;  $T_K$  – температура, при которой происходит фазовый переход, связанный с возникновением или исчезновением спонтанной поляризации.

Название  $T_K$  температурой Кюри дано по аналогии с ферромагнетиками. Фаза вещества при  $T < T_K$  называется сегнетоэлектрической, а при  $T > T_K$  – параэлектрической. В параэлектрической фазе кристалл ведет себя как обычный линейный диэлектрик, а значения диэлектрической проницаемости уже через несколько градусов выше точки Кюри становятся малыми ( $\varepsilon = 5 - 30$ ). Из выражения (1) видно, что при  $T \rightarrow T_K$  диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon \rightarrow \infty$ . Экспериментальные значения  $\varepsilon$  при  $T = T_c$ , полученные в слабых измерительных электрических полях, являются конечными (для ТГС такие значения  $\varepsilon \sim 6 \cdot 10^4$ ). Одним из важнейших параметров сегнетоэлектрика является постоянная Кюри-Вейсса  $C$ , характеризующая как тип, так и особенности фазового перехода. Если эта величина  $C \sim 10^3$ , то фазовый переход в таком кристалле происходит с упорядочением некоторых структурных элементов: ионов, протонов и даже групп атомов. Такой фазовый переход называют переходом типа порядок-беспорядок. Если же постоянная  $C \sim 10^5$ , то ФП является переходом типа смещения, который происходит в результате смещения одного или нескольких атомов относительно первоначального положения равновесия (положения равновесия в параэлектрической фазе).

Исходя из формулы (1) постоянная Кюри-Вейсса

$$C = \frac{T - T_c}{1/\varepsilon}. \quad (2)$$

Постоянную Кюри-Вейсса удобно определить с помощью графика зависимости  $\frac{1}{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon}(T)$  (рис. 3, б), так как в пределах  $\Delta T = T - T_c \sim 15$  градусов ( $T$  – температура параэлектрической фазы) зависимость носит линейный характер.

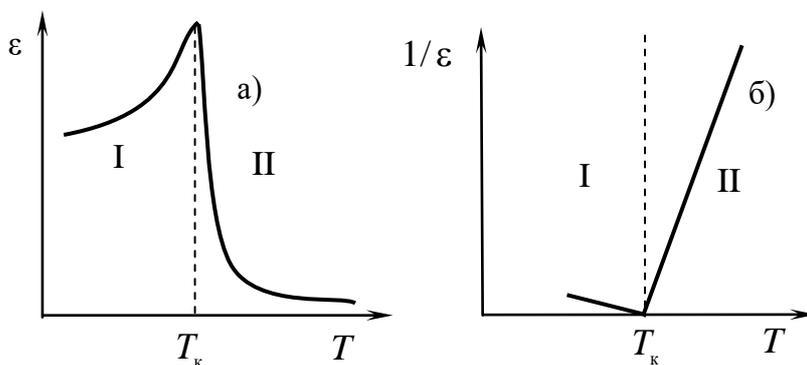


Рис. 3. I – сегнетоэлектрическая фаза ( $T < T_K$ );  
II – параэлектрическая фаза ( $T > T_K$ ).

В настоящей работе диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  определяется для кристалла ТГС на основании измерения емкости конденсатора, между обкладками которого находится исследуемый образец. Образец для измерения изготовлен в форме прямоугольного параллелепипеда, толщина  $d$  которого намного меньше его длины. Измеряя емкость такого плоского конденсатора, можно определить значения диэлектрической проницаемости из выражения

$$\varepsilon = \frac{d(C_{\text{изм}} - C_{\text{м}})}{\varepsilon_0 S}, \quad (3)$$

где  $C_{\text{изм}}$  – измеряемая емкость;  $C_{\text{м}}$  – емкость монтажа;  $S$  – площадь образца;  $d$  – его толщина.

Изменяя температуру образца и измеряя значение емкости при этом, можно получить температурную зависимость  $\varepsilon$  в любом интервале температур, включая  $T_{\text{к}}$  (рис. 3, а).

Схема лабораторной установки включает измеритель емкости и термостат с исследуемым образцом (рис. 4).

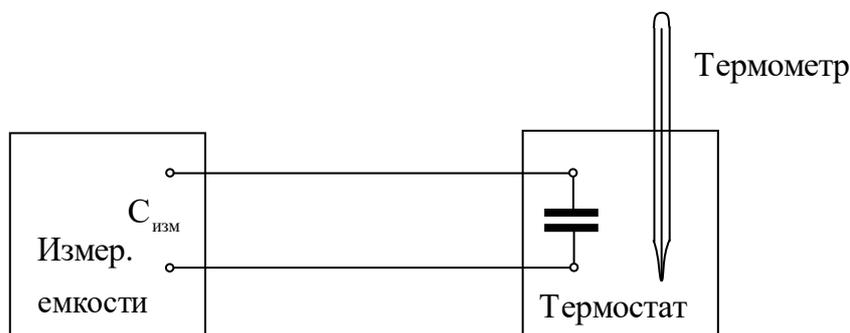


Рис. 4.

## ЗАДАНИЕ

1. Измерить емкость образца при различных температурах.
2. Вычислить значения диэлектрической проницаемости по формуле (2.4.3) для каждой температуры.
3. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

№	$t, ^\circ\text{C}$	$T, \text{K}$	$C_{\text{изм}}, \text{Ф}$	$\varepsilon$	$1/\varepsilon$
1					
2					
...					

4. По полученным данным построить графики зависимостей

$$\varepsilon = \varepsilon(T); \quad \frac{1}{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon}(T).$$

5. Используя данные зависимости  $\frac{1}{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon}(T)$  в параэлектрической фазе, определить значение постоянной Кюри-Вейсса из выражения (2).
6. По значению величины постоянной Кюри-Вейсса определить тип фазового перехода сегнетоэлектрика.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется фазовым переходом?
2. Какие фазовые переходы могут происходить в твердых телах?
3. Какие структурные изменения происходят при фазовых переходах в сегнетоэлектриках?
4. Каковы значения диэлектрической проницаемости для сегнетоэлектрических кристаллов? Как зависит диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков от температуры?
5. Записать выражение для закона Кюри-Вейсса. Пояснить как из графика зависимости  $1/\varepsilon = f(T)$  определить постоянную Кюри-Вейсса? Что она характеризует?
6. Где применяются полярные диэлектрики?
7. Что понимают под пироэлектрическим эффектом?
8. В чем суть пьезоэлектрического эффекта?

### ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 2 : Электричество и магнетизм / И. В. Савельев. – М. : Астрель : АСТ, 2004.
2. Струков Б.А., Леванюк А.П. Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах. М.: Наука, 1995. 2-е изд., 240 с.
3. Цедрик М.С. Физические свойства кристаллов триглицинсульфата / М.С. Цедрик. – Минск.: Наука и техника, 1986. – 216 с.
4. Най, Дж. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц / Дж. Най; пер. с англ. Л. А. Шувалова. – Москва : Издательство иностранной литературы, 1960. – 386 с.
5. Лайнс, М. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы / М. Лайнс, А. Гласс; пер. с англ. В. В. Леманова и Г. А. Смоленского. - Москва : Мир, 1981. – 736 с.
6. Блинц, Р. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики: Динамика решётки / Р. Блинц, Б. Жекш; пер. с англ. С. А. Пикина, Ю. З. Эстрина, Н. Р. Иванова, А. П. Жукова. – Москва : Мир, 1975. – 400 с.
7. Ferroelectricity of glycine sulfate / В. Mathias [et al.] //Phys. Rev. – 1956. – Vol. 104. – P. 849-850.
8. Желудев, И.С. Электрические кристаллы / И. С. Желудев. – Москва : Наука, 1979. – 200 с.