

РАБОТА 2.05

Поляризация сегнетоэлектрика

Цель работы

1. Получить на экране осциллографа петлю гистерезиса сегнетоэлектрика в переменном электрическом поле. Измерить остаточную поляризованность P_0 и коэрцитивную силу E_c сегнетоэлектрика при комнатной температуре. Наблюдать изменение петли гистерезиса с повышением температуры.
2. Измерить температурную зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика.
3. По результатам п.2 найти константы в законе Кюри-Вейсса.

Введение

Сегнетоэлектриками называются вещества, состоящие из спонтанно (самопроизвольно) поляризованных областей - доменов. Основными специфическими свойствами сегнетоэлектриков являются аномально большие значения диэлектрической проницаемости (достигающей $10^4 - 10^5$) и нелинейная неоднозначная зависимость поляризованности P от напряженности электрического поля E .

Несмотря на наличие доменов, сегнетоэлектрик в целом может быть неполяризован, так как соседние домены обычно ориентируются во взаимно противоположных направлениях, определяемых структурой кристаллической решетки. Во внешнем электрическом поле значение P увеличивается с ростом напряженности поля (кривая 1 на рис. 5.1): на участке OA - за счет роста доменов, на участке AB - за счет поворота вектора \vec{P} ; участок BC характеризует диэлектрическое насыщение.

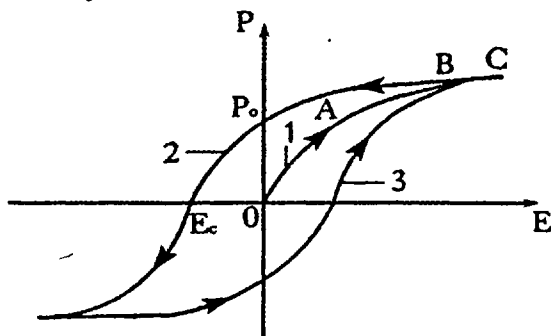


Рис. 5.1. Петля гистерезиса сегнетоэлектрика

При уменьшении напряженности электрического поля поляризованность P начинает уменьшаться (кривая 2 на рис. 5.1). При $E = 0$ наблюдается остаточная поляризованность P_0 . Для ее компенсации к сегнетоэлектрику нужно приложить электрическое поле в направлении, противоположном первоначальному, напряженностью E_c (электрическая коэрцитивная сила). Если продолжать увеличивать эту напряженность, опять наступит насыщение. Последующее изменение напряженности поля в обратном направлении сопровождается дальнейшим изменением P (кривая 3 на рис. 5.1). Таким образом, график зависимости поляризованности от напряженности поля имеет вид петли, которую называют петлей гистерезиса.

Зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков от температуры характеризуется наличием максимума при достижении температуры T_c , называемой температурой Кюри (рис. 5.2). Выше T_c спонтанная поляризация и обусловленные ею сегнетоэлектрические свойства (гистерезис зависимости P от E) исчезают, и вещество начинает вести себя как диэлектрик, правда, с очень большим значением диэлектрической проницаемости. В этой температурной области ($T > T_c$) зависимость ϵ от температуры T описывается формулой:

$$\epsilon = \frac{A}{T - T_0} \quad (5.1)$$

где A и T_0 - константы. Формулу (5.1) называют законом Кюри-Вейсса.

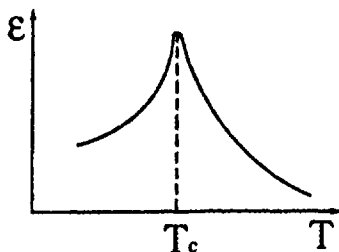


Рис. 5.2. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика

Среди сегнетоэлектрических кристаллов различают две группы: сегнетоэлектрики с водородными связями (сегнетова соль и др.), ориентация дипольных моментов в которых связана с поворотом молекул в пространстве;

сегнетоэлектрики кислородно-октаэдрического типа (BaTiO_3 и др.), возникновение спонтанной поляризации которых сопровождается деформацией (растяжением) молекул. Эти группы различаются значениями констант в законе Кюри-Вейсса. Для первой группы характерны значения A в диапазоне $(1-5)10^3$ К и $T_0 = T_c$. Для второй группы константа A лежит в диапазоне $(1-3)10^5$ К, а T_0 примерно на 10 К ниже, чем T_c .

Среди многочисленных применений сегнетоэлектриков в науке и технике отметим получение на их основе конденсаторов с зависящей от температуры емкостью, так называемых варикондов.

Экспериментальная установка

Схема установки приведена на рис. 5.3. Исследуемые в работе идентичные вариконды $C1$ и $C2$ из сегнетоэлектрического кристалла помещены в электрическую печь 1, питаемую от сети. Регулятор мощности нагрева расположен на корпусе печи. Температуру внутри печи измеряют медь-константановой термопарой; ее термоздс измеряют милливольтметром PV . Градуировочный график термопары имеется на установке. Холодный спай термопары находится в термосе 2 со льдом или водой комнатной температуры (не забудьте это проверить).

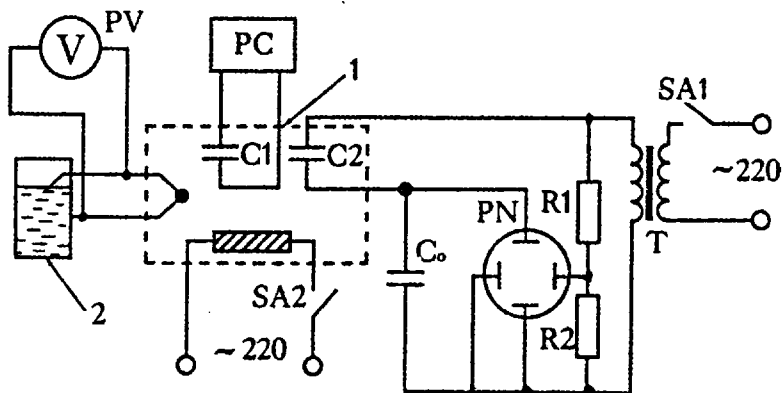


Рис. 5.3. Схема электрической цепи установки

Один из варикондов, $C1$, подключен к измерителю емкости PC . Измерив емкость C вариконда, можно вычислить по формуле плоского конденсатора диэлектрическую проницаемость сегнетоэлектрика:

$$\varepsilon = \frac{C_1 d}{\varepsilon_0 S}, \quad (5.2)$$

где S и d - соответственно площадь обкладок вариконда и расстояние между обкладками.

Второй вариконд, C_2 , служит для получения на экране осциллографа PN петли гистерезиса. Этот вариконд последовательно с конденсатором C_0 включен в цепь вторичной обмотки трансформатора T . Поскольку емкость вариконда $C_2 \ll C_0$, можно считать, что переменное напряжение $u(t)$ вторичной обмотки приложено, в основном, к конденсатору C_2 и создает в нем электрическое поле с напряженностью $E(t) = u(t)/d$. Мгновенное значение заряда на обкладках конденсатора C_2 равно $q_2(t) = C_2 u(t)$, такой же заряд в каждый момент времени имеется и на обкладках конденсатора C_0 : $q_2(t) = q_0(t)$. Следовательно, напряжение на конденсаторе C_0 равно $u_y(t) = q_0(t)/C_0 = q_2(t)/C_0$. В свою очередь, заряд на обкладках вариконда C_2 связан с поляризованностью сегнетоэлектрика соотношением (28):

$$P(t) = \sigma_2(t) = \frac{q_2(t)}{S} = \frac{C_0}{S} u_y(t), \quad (5.3)$$

где $\sigma_2(t)$ - мгновенное значение поверхностной плотности заряда.

Напряжение конденсатора C_0 подается на пластины вертикального отклонения осциллографа, что, согласно (5.3), обуславливает вертикальное смещение луча, пропорциональное мгновенному значению поляризованности сегнетоэлектрика.

На пластины горизонтального отклонения осциллографа подается напряжение с резистора R_2 , равное $u_x(t) = [R_2 / (R_1 + R_2)] u(t)$. Тогда горизонтальное смещение луча пропорционально мгновенному значению напряжения $u(t)$ вторичной обмотки, которое, как было показано выше, определяет напряженность электрического поля $E(t)$ между обкладками исследуемого вариконда C_2 :

$$E(t) = \frac{R_1 + R_2}{R_2 d} u_x(t). \quad (5.4)$$

Таким образом, на экране осциллографа получается петля гистерезиса, которая при увеличении температуры вариконда постепенно сжимается, становясь при достижении температуры Кюри отрезком прямой линии.

Проведение эксперимента

1. Ознакомьтесь с правилами техники безопасности. Выполните указанные в них рекомендации. Включите и прогрейте измерительные приборы. Измерьте температуру холодных спаев термопары (если в термосе - не тающий лед) и запишите ее в протокол.
2. Включите тумблер SA1 и получите на экране осциллографа устойчивое изображение петли гистерезиса. По осциллограмме этой петли измерьте отрезки l_x и l_y , отсекаемые петлей на координатной сетке экрана и соответствующие коэрцитивной силе E_c и остаточной поляризованности P_0 . Последующее наблюдение за формой петли гистерезиса имеет целью зафиксировать при нагреве вариконда момент перехода петли в отрезок прямой линии, соответствующей достижению температуры Кюри.
3. Включите электрическую цепь тумблером SA2, проводите одновременные измерения термоздс U_T и емкости вариконда C1 при нагреве. Нагревание печи производите до температуры не выше 140°C . Будьте внимательны: при приближении температуры Кюри T_c изменение емкости с температурой становится очень быстрым. С учетом особенностей обработки результатов сделайте не менее 20 измерений в диапазоне $T > T_c$. Результаты заносите в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости

№ опыта	Термоздс, мВ	T , К	C , нФ	ϵ	$\frac{1}{\epsilon}$

Обработка результатов

1. По измеренным значениям l_x и l_y вычислите соответствующие им значения напряжений $u_x = m_x l_x$ и $u_y = m_y l_y$, затем по формулам (5.3) и (5.4) - коэрцитивную силу E_c и остаточную поляризованность P_0 . Необходимые

для расчета значения калибровочных коэффициентов m_x и m_y и других параметров измерительной цепи приведены на установке.

2. По результатам измерения емкости вариконда и формуле (5.2) вычислите значения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика для всех измеренных температур. Постройте график зависимости ϵ от температуры. По максимальному значению ϵ найдите температуру Кюри T_c .
3. Постройте график зависимости $1/\epsilon$ от температуры T в области температур $T > T_c$. Согласно (5.1), этот график должен представлять собой прямую линию:

$$\frac{1}{\epsilon} = \frac{1}{A} T - \frac{T_0}{A}.$$

По угловому коэффициенту прямой найдите значение константы A в законе Кюри-Вейсса, а по точке пересечения прямой с осью T - температуру T_0 . Вычисления углового коэффициента производите по методу парных точек или по методу наименьших квадратов [2].

По порядку величины константы A и по соотношению между T_c и T_0 сделайте вывод о типе сегнетоэлектрика, из которого изготовлен вариконд.

Контрольные вопросы

1. Как зависит поляризованность P сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля E ? Чем обусловлена такая зависимость?
2. Что такое температура Кюри? Как описывается температурная зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика в области температур выше температуры Кюри $T > T_c$?
3. Как получить на экране осциллографа петлю гистерезиса?
4. Опишите процедуру нахождения констант в законе Кюри-Вейсса по экспериментальным результатам.