

подборе нужного значения сопротивления R_2 и цепь гальванометра остается при этом присоединенной ко всей схеме, что нежелательно при наблюдениях режима движения рамки. Значение сопротивления R_2 , при котором движение рамки гальванометра становится аperiодическим, будет равно внешнему критическому сопротивлению гальванометра.

Упражнение 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЕКРЕМЕНТА ЗАТУХАНИЯ КОЛЕБАНИЯ РАМКИ ГАЛЬВАНОМЕТРА ОТ ВЕЛИЧИНЫ ВНЕШНЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Схема остается без изменения, порядок работы тот же, что и в упражнении 3. В этом упражнении наблюдают за колебаниями светового указателя по шкале и записывают величину последовательных его отклонений вправо и влево (или в одну сторону). Произведя подобные измерения для различных сопротивлений R_2 , рассчитать декремент затухания и его зависимость от сопротивления внешней цепи гальванометра и построить график зависимости декремента затухания от внешнего сопротивления гальванометра R_2 .

Величину декремента определяют при значениях R_2 , не слишком близких к $R_{кр}$. Рекомендуемые для этого значения R_2 указаны непосредственно на установке.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как устроен гальванометр магнитоэлектрической системы?
2. Доказать, что установившееся отклонение рамки гальванометра пропорционально силе протекающего по ней тока.
3. Какие факторы определяют работу гальванометра в периодическом, критическом и аperiодическом режимах? Каким образом можно переводить гальванометр из одного режима работы в другой? Какой режим работы гальванометра считается оптимальным?
4. Что называют внешним критическим сопротивлением гальванометра?
5. Нарисовать электрическую схему установки для определения параметров гальванометра. Объяснить порядок действий при измерениях.
6. Какой прием рекомендуется для быстрого успокоения рамки гальванометра?
7. Какие минимальные ток и напряжение можно измерять гальванометром?
8. Как режим гальванометра влияет на его чувствительность?
9. Объяснить природу электромагнитного торможения рамки гальванометра.
10. Почему гальванометр, предназначенный для измерения малых токов, не годится для измерения малых напряжений?

11. Какими параметрами описывается затухание колебаний?
12. Для чего гальванометры снабжаются магнитным шунтом?
13. Какова точность измерения параметров гальванометра?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985.

Лабораторная работа 6

СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ

В настоящей работе изучается зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария от напряженности поля и от температуры.

Параметры сегнетоэлектриков. Титанат бария ($BaTiO_3$) относится к группе сегнетоэлектриков. Изучение диэлектрических свойств сегнетоэлектриков представляет большой интерес. Титанат бария — важнейший сегнетоэлектрик, обладающий высокой механической прочностью, большой механической устойчивостью, нашедший благодаря этому широкие научно-технические применения.

Сегнетоэлектрики относятся к классу ионных кристаллов, а электрические свойства кристаллов тесно связаны с их симметрией. Симметрия характеризует особенности расположения электрических зарядов в кристаллах. Можно выделить три типа этого расположения для диэлектриков.

В первом из них расположение положительных и отрицательных зарядов является centrosимметричным, центры тяжести зарядов каждого знака совпадают друг с другом. В пределах одной элементарной ячейки такое совпадение означает, что эти центры тяжести совпадают с центром ячейки. Такие кристаллы называют неполярными.

В диэлектриках второго типа центры тяжести зарядов противоположных знаков в пределах элементарной ячейки не совпадают, и получающиеся при таком распределении электрические дипольные моменты во всех соседних ячейках параллельны. Совокупность всех так построенных элементарных ячеек, образующих кристалл, делает его макроскопически поляризованным в отсутствие внешнего поля (спонтанная поляризация). Такие кристаллы называют полярными.

В диэлектриках третьего типа центры положительных и отрицательных зарядов совпадают, но распределение зарядов каждого знака не является centrosимметричным. Отсутствие centrosимметричности в распределении зарядов каждого знака разрешает наличие полярных направлений, однако геометрическая сумма всех дипольных моментов оказывается равной нулю. Такие кристаллы называют полярно-нейтральными.

Примером полярных диэлектриков служат сегнетоэлектрики —

вещества, которые ниже некоторой температуры (или в некотором интервале температур) в отсутствие внешнего поля имеют области спонтанной самопроизвольной поляризации — домены.

Такие температурные интервалы называются полярными интервалами, на границе их сегнетоэлектрики испытывают фазовые превращения, переходя в новые кристаллические модификации, в которых спонтанная поляризация не наблюдается.

Кристаллическая модификация, в которой сегнетоэлектрик спонтанно поляризован, называется полярной фазой, а модификация, в которой поляризации нет, — неполярной фазой. Температура, при которой сегнетоэлектрики переходят из полярной фазы в неполярную, называется точкой Кюри.

В сегнетоэлектриках в пределах каждого домена дипольные моменты всех элементарных ячеек ориентированы одинаково; в соседних доменах направления спонтанной поляризации составляют случайные углы друг с другом, так что геометрическая сумма электрических моментов всего кристалла равна нулю.

Деление на домены оказывается для кристалла энергетически выгодным, так как при этом полная энергия достигает минимума, и спонтанно поляризованный сегнетоэлектрик в полярной области температур обладает большой устойчивостью.

Следствием существования областей спонтанной поляризации в сегнетоэлектриках является наличие у них свойств, аналогичных свойствам ферромагнетиков: большие значения диэлектрической проницаемости, характерная кривая зависимости диэлектрической проницаемости от температуры с резким пиком в точке Кюри и гистерезис зависимости заряда конденсатора с сегнетоэлектриком от напряженности поля в области сильных полей при температурах ниже точки Кюри (рис. 1).

Изменение свойств при переходе через эту точку является следствием изменения кристаллической структуры сегнетоэлектрика. В титанате бария выше точки Кюри существует кубическая решетка, ниже — тетрагональная. Изучаемое фазовое превращение титаната бария является фазовым превращением второго рода или близким к нему переходом первого рода.

При внесении в электрическое поле сегнетоэлектрик поляризуется. Электрическая индукция сегнетоэлектрика складывается из трех составляющих:

$$D = \epsilon_0 E + P + P_0,$$

где E — среднее макроскопическое поле в сегнетоэлектрике, P — средний индуцированный электрический момент единицы объема, обусловленный поляризацией ионного смещения и смещения электронных оболочек и пропорциональный в слабых полях напряженности электрического поля, P_0 — электрический момент спонтанной поляризации, ϵ_0 — электрическая постоянная.

Векторы E и P имеют одинаковое направление, а вектор P_0 в общем случае имеет другое направление. В случае, если векторы P и P_0 пропорциональны вектору напряженности электрического

поля E , полная диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика, обусловленная и поляризацией, вызываемой внешним полем, и спонтанной поляризацией, равна отношению

$$\epsilon = \frac{D}{\epsilon_0 E}. \quad (1)$$

Из уравнения (1) получаем

$$\epsilon = 1 + \frac{P}{\epsilon_0 E} + \frac{P_{0E}}{\epsilon_0 E}, \quad (2)$$

здесь P_{0E} есть проекция P_0 на направление поля E .

В случае, когда P_{0E} и P не пропорциональны напряженности

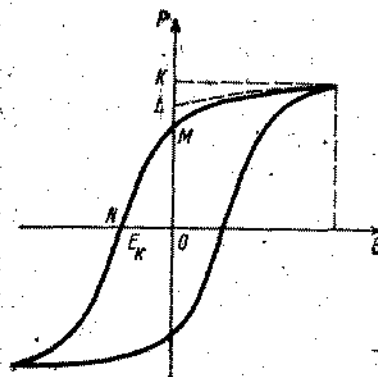


Рис. 1. Петля гистерезиса сегнетоэлектрика

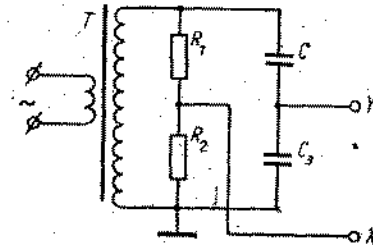


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

поля, можно определить лишь так называемую дифференциальную проницаемость:

$$\epsilon = 1 + \frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial P}{\partial E} + \frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial P_{0E}}{\partial E}. \quad (3)$$

С увеличением внешнего поля полный электрический момент единицы объема $P_{\text{полн}}$ может увеличиваться по двум причинам: во-первых, в результате роста электрического момента индуцированной поляризации P ; во-вторых, вследствие возрастания числа доменов, направление электрического момента спонтанной поляризации которых совпадает с направлением внешнего поля или образует с ним острые углы.

Процесс поляризации сегнетоэлектрика носит необратимый характер. Сегнетоэлектрики обладают гистерезисом. Сущность гистерезиса заключается в том, что поляризация сегнетоэлектрика определяется не только значением напряженности поля, но и зависит от предшествовавших состояний поляризации.

При изменении поля от $+E$ до $-E$ и от $-E$ до $+E$ индукция и

поляризация в сегнетоэлектрике описывают замкнутую кривую, называемую петлей гистерезиса (см. рис. 1).

В общем случае и спонтанная поляризация и индуцированная поляризация являются нелинейными функциями напряженности поля. Однако в области не очень сильных полей индуцированная поляризация пропорциональна напряженности поля. В этой области можно разделить полную поляризацию на две составляющие следующим образом: экстраполируют ветвь насыщения петли гистерезиса (см. рис. 1) к значению поля, равному нулю. Отрезок KL соответствует индуцированной поляризации P , отрезок LO — спонтанной поляризации P_0 . Действительно, при насыщении можно считать, что ориентация вектора спонтанной поляризации P_0 в доменах закончена, и дальнейший линейный рост поляризации с увеличением напряженности поля осуществляется за счет возрастания индуцированной поляризации. Поскольку она линейно зависит от напряженности поля, то экстраполяция ветви насыщения до оси P дает отрезок KL , соответствующий индуцированной поляризации. Отрезок OM соответствует остаточной поляризации, а ON — коэрцитивной напряженности E_c .

Гистерезис можно наблюдать, подводя к образцу сегнетоэлектрика с посеребренными поверхностями (сегнетоконденсатору) переменное напряжение. Часть электрической энергии, которая при переменном напряжении в диэлектрике переходит в тепло, называют диэлектрическими потерями. Диэлектрические потери в сегнетоконденсаторе можно характеризовать тангенсом угла диэлектрических потерь, который выражается так:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{2\pi} \frac{W_T}{W} \quad (4)$$

Здесь W_T — энергия, перешедшая в тепло в единице объема диэлектрика за время одного периода, W — максимальная плотность энергии, запасенной в конденсаторе.

Угол диэлектрических потерь δ дополняет угол сдвига фаз между током и напряжением до 90° .

В данной работе изучается явление гистерезиса в зависимости величины заряда на обкладках сегнетоконденсатора от приложенного к нему напряжения и исследуется зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария от температуры.

Описание экспериментальной установки

Образец представляет собой небольшой диск из титаната бария с посеребренными поверхностями — сегнетоконденсатор.

Исследование гистерезиса зависимости заряда на обкладках конденсатора от приложенного напряжения производится с помощью схемы, изображенной на рис. 2.

Напряжение от генератора подается на вход повышающего трансформатора, а с него на делитель напряжения, состоящий из сопротивлений $R_1=7$ МОм и $R_2=660$ кОм. Параллельно дели-

телю включены две последовательно соединенные емкости: сегнетоконденсатор C с исследуемым образцом и эталонный конденсатор $C_3=0,15$ мкФ, причем $C \ll C_3$. Из схемы видно, что горизонтальные отклонения электронного луча на экране осциллографа пропорциональны напряжению, приложенному к образцу. Вертикальные отклонения пропорциональны напряжению на эталонном конденсаторе, пропорциональному заряду Q , одинаковому для эталонного конденсатора и сегнетоконденсатора:

$$U_{C_3} = \frac{UC}{C_3} = \frac{Q}{C_3} \quad (5)$$

При прохождении переменным напряжением полного цикла изменения электронный пучок опишет замкнутую кривую $Q=f(U)$ зависимости заряда на конденсаторе C от приложенного к нему напряжения. Эта кривая представляет собой петлю гистерезиса. А поскольку напряжение на эталонном конденсаторе пропорционально также поляризации P и индукции D , то наблюдаемая на экране кривая изображает также зависимость поляризации и индукции от напряженности поля.

Электрическая схема для изучения гистерезиса смонтирована на специальной панели.

Напряжение от генератора подается на клеммы «вход», соединенные с первичной обмоткой повышающего трансформатора.

К клеммам «X» и «Y» панели подключаются горизонтальный и вертикальный входы осциллографа (см. рис. 2).

Для температурных исследований образец помещается в печь, где он может быть нагрет до 180°C . Температура измеряется термомпарой медь — константан, подключенной к вольтметру со шкалой 10 мВ. Градуировочная кривая термомпары дана в приложении к описанию. Емкость сегнетоконденсатора измеряется мостом ($C=100-200$ пф).

Упражнение 1. ГИСТЕРЕЗИС ПОЛЯРИЗАЦИИ ТИТАНАТА БАРИЯ

Собрать схему в соответствии с рис. 2, включить приборы в сеть и прогреть их. Установить частоту генератора $f=300$ Гц, так как эта частота соответствует наилучшим параметрам данной схемы.

Подбирая режим работы генератора и осциллографа, добиться появления на экране осциллографа петли гистерезиса.

Изменяя напряжение на образце в пределах 200–600 В, наблюдать за изменением сигнала, характеризующего величину полной поляризации P , остаточной поляризации, коэрцитивного напряжения.

Для всех наблюдаемых петель гистерезиса определить величину полной поляризации P и соответствующую ей напряженность электрического поля в образце.

Величина поляризации находится по формуле

$$P = \sigma = \frac{Q}{S} = \frac{U_0 C_0}{S} = \frac{Bn C_p}{S},$$

где σ — поверхностная плотность поляризационных зарядов, S — площадь пластин сегнетоконденсатора, U_0 — напряжение на входе Y осциллографа, B — чувствительность входа Y осциллографа, n — число делений, на которое отклонился луч по вертикали.

Напряженность электрического поля в образце определяется по формуле

$$E = \frac{U_0}{d} = \frac{Am}{d},$$

где d — толщина образца, A — постоянная установки, данная в приложении к описанию, m — число делений, на которое отклонился луч по горизонтали.

Определить величину максимального напряжения, подаваемого на образец, при котором петля гистерезиса еще не наблюдается, т. е. когда $P \sim E$, и соответствующую ему напряженность поля E .

Петлю гистерезиса, полученную при наибольшем напряжении на образце, изобразить графически в координатах P, E .

Построить график зависимости $P_{\text{полн}} = P(E)$.

Упражнение 2. ЗАВИСИМОСТЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТИТАНАТА БАРИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Измерение зависимости диэлектрической проницаемости титаната бария от температуры сводится к измерению зависимости от температуры емкости сегнетоконденсатора.

Измерить емкость сегнетоконденсатора при комнатной температуре.

Включить печь, установить максимальную скорость нагрева. Снять зависимость емкости сегнетоконденсатора C от температуры в пределах от комнатной до 180°C . Обратить внимание на необходимость более частых измерений при быстром изменении емкости с температурой в области фазового перехода сегнетoeлектрика ($t_{\text{фн}} \approx 120^\circ\text{C}$).

Величину диэлектрической проницаемости титаната бария при каждой температуре вычислить по формуле

$$\epsilon = \frac{C}{C_0},$$

где $C_0 = \epsilon_0 S/d$ — емкость конденсатора без сегнетoeлектрика.

Результаты измерений и расчетов занести в таблицу. Зависимость $\epsilon(t^\circ\text{C})$ изобразить графически.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие вещества относят к сегнетoeлектрикам? Какими свойствами обладают сегнетoeлектрики? Что такое домены?
2. Какими параметрами характеризуется поведение диэлектриков в электрическом поле?
3. В чем заключается поляризация диэлектриков? Какие типы поляризации имеют место в диэлектриках?
4. Как изменяется диэлектрическая проницаемость сегнетoeлектриков при их нагревании?
5. В чем сущность гистерезиса в сегнетoeлектриках?
6. Как описываются потери энергии в диэлектриках?
7. Почему температурные зависимости диэлектрической проницаемости титаната бария, снятые при нагреве и охлаждении, могут различаться?
8. Нарисовать схему установки для исследования температурной зависимости диэлектрической проницаемости сегнетoeлектриков?
9. Каким образом изменяется и как измеряется температура образца?
10. Как используется осциллограф для наблюдения гистерезиса в титанате бария?
11. Каким образом по площади петли гистерезиса рассчитывается $\text{tg } \delta$?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников Г. С. Электричество. М.: Наука, 1985.