

4. Скайрс Дж. Практическая физика. — М.: Мир, 1971.
5. Зайдель А.Н. Погрешности измерений физических величин. — Л.: Наука, 1985.
6. Азехян Т.А. Основы теории ошибок для астрономов и физиков. — М.: Наука, 1972. — 172 с.
7. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. — М.: Мир, 1985.
8. Худсон Д. Статистика для физиков. — М.: Мир, 1967.
9. Портис А. Физическая лаборатория. — М.: Наука, 1972.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИНДУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ D ОТ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ E В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКЕ

Цель работы

Ознакомление с основными свойствами сегнетоэлектрика. Изучение зависимости индукции электрического поля D и диэлектрической проницаемости ϵ сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля E .

Описание установки

На рис. 1 показана схема установки, позволяющая исследовать зависимость $D(E)$ в веществе. В схеме имеется конденсатор C_Y с известным значением емкости и плоский конденсатор C_X , между пластинами которого находится изучаемое вещество. Конденсаторы C_X и C_Y соединены последовательно и подключены к источнику переменного напряжения. Как видно из схемы, напряжение с конденсатора C_X подается на вход X осциллографа, а напряжение с конденсатора C_Y подается на вход Y этого же осциллографа.

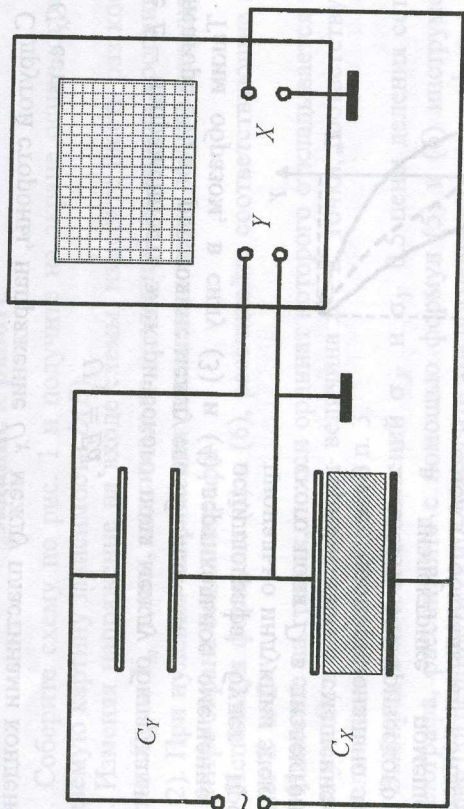


Рис. 1. Блок-схема измерительной установки

Метод измерения

Напряжение U_Y между пластинами конденсатора C_Y есть:

$$U_Y = \frac{q}{C_Y}, \quad (1)$$

где q — заряд на каждой из пластин конденсатора C_Y .

Поскольку оба конденсатора соединены последовательно, то такой же заряд будет на каждой из пластин конденсатора C_X .

Этот заряд можно выразить через индукцию электрического поля D :

$$D = \frac{q}{S}, \quad (2)$$

где S — площадь обкладок конденсатора C_X . Следовательно,

$$U_Y = \frac{DS}{C_Y}. \quad (3)$$

С другой стороны, напряжение U_X между пластинами конденсатора C_X есть

$$U_X = Ed, \quad (4)$$

где E — напряженность электрического поля между обкладками конденсатора C_X , d — расстояние между его обкладками.

Таким образом, в силу (3) и (4) вертикальное смещение луча осциллографа будет пропорционально индукции электрического поля D в диэлектрике, а горизонтальное смещение луча будет пропорционально напряженности электрического поля в диэлектрике, помещенном между обкладками конденсатора C_X . Следовательно, линия, которую вычертит луч осциллографа, будет показывать зависимость $D(E)$. Для линейного диэлектрика это должна быть прямая линия, а для сегнетоэлектрика получится петля гистерезиса (рис. 2).

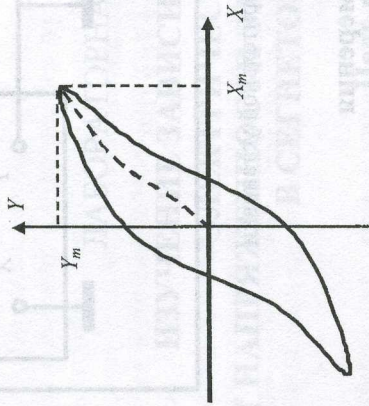


Рис. 2. Петля гистерезиса

Если масштабы разверток осциллографа по осям X и Y известны (m_X, m_Y), то $U_X = m_X x$, $U_Y = m_Y y$. Из (3) и (4) получим:

$$E = x \frac{m_X}{d}, \quad (5)$$

$$D = y \frac{m_Y C_Y}{S}. \quad (6)$$

Измеряя координаты x и y линий на осциллографе, можно затем, используя формулы (5) и (6), построить зависимость $D(E)$, а после этого определить относительную диэлектрическую проницаемость по формуле:

$$\epsilon = \frac{D}{\epsilon_0 E}. \quad (7)$$

Задание к работе

1. Соберите схему по рис. 1 и получите на экране осциллографа ожидаемую картину зависимости $D(E)$.
2. Изменяя напряжение на входе схемы, измерьте шесть раз координаты X_m и Y_m точки, максимально удаленной от начала координат (рис. 2). При нулевом напряжении светящаяся точка должна находиться в центре экрана осциллографа.
3. Используйте формулы (5) и (6), рассчитайте соответствующие величины E и D .
4. Нанесите на график, по оси ординат которого откладывается величина $y = D$, а по оси абсцисс — величина $x = E$, точки, соответствующие величинам, вычисленным в п. 3.
5. Выбирая в качестве значений σ_X и σ_Y 0,5 цены деления сетки осциллографа, рассчитайте с помощью формул (5) и (6) инструментальные погрешности D и E , нанесите эти погрешности на график.
5. По массиву измеренных экспериментальных точек проведите на графике «наилучшую» кривую, описывающую зависимость $D(E)$.
6. По формуле (7) рассчитайте значения диэлектрической проницаемости ϵ , а также ее погрешность — величину σ_ϵ для всех измеренных значений E и D .
7. Постройте график зависимости диэлектрической проницаемости ϵ от напряженности электрического поля E . На графике укажите область (если таковая есть), где ошибки σ_ϵ сопоставимы с измеряемыми величинами ϵ .

Контрольные вопросы

1. Какова цель работы?
2. Какие зависимости вы собираетесь получить в данной работе?
3. Объясните, почему в схеме, показанной на рис. 1, на экране осциллографа будет вычерчиваться зависимость $D(E)$.
4. Нарисуйте качественный график зависимости $D(E)$ для сегнетоэлектрика при двух разных значениях амплитуды напряжения источника питания. Почему такая зависимость означает, что электрическое поле в сегнетоэлектрике зависит от предыстории диэлектрика, т. е. от предшествующих значений E ?
5. Какие величины характеризуют электрические свойства вещества? Как они связаны между собой?

6. Что называется поляризованностью диэлектрика и каков механизм ее возникновения?
7. Какие вещества называются сегнетоэлектриками и чем они отличаются от обычных диэлектриков?
8. Каков физический смысл вектора D ? Какими зарядами определяется поле вектора D и его поток через замкнутую поверхность в диэлектрике? Объясните соотношение (2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 3 т. Том 2. — М.: Наука, 1977. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 2. Электричество и магнетизм. Глава 2. — М.: Наука, 1998.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Т. III. Электричество, § 10, 12, 15, 26, 39. — М.: Физматлит; Изд-во МФТИ, 2002.
3. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. Глава 3. — М.: Лаборатория базовых знаний, 2000 (и любой другой год издания).
4. Калашников С.Г. Электричество, § 50. — М.: Физматлит, 2003.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ КОНДЕНСАТОРНОГО МАСЛА

Цель работы

Исследование поведения жидкого диэлектрика в неоднородном электрическом поле плоского конденсатора и определение диэлектрической проницаемости этого диэлектрика.

Описание установки

Опытное определение диэлектрической проницаемости в данной работе основано на явлении втягивания диэлектрика в область более сильного поля в неоднородном электрическом поле. Схема установки

приведена на рис. 1. В нее входят: лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), вольтметр, высоковольтный трансформатор, к которому подключен плоский конденсатор, погруженный в масло. С помощью ЛАТРа можно изменять напряжение на пластинах конденсатора. Уровень масла в конденсаторе измеряется с помощью микроскопа, который на рис. 1 не показан.

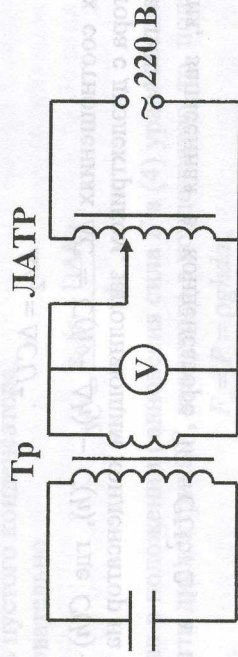


Рис. 1. Блок-схема измерительной установки

Описание метода измерения

Молекулы диэлектрика представляют собой диполи, и поэтому на эти молекулы во внешнем неоднородном электрическом поле будет действовать сила, направленная в сторону возрастания электрического поля. Поскольку на краю конденсатора напряженность электрического поля меньше, чем в средней части конденсатора, возникает сила, втягивающая диэлектрик в конденсатор (рис. 2).

Для вычисления этой силы воспользуемся следующими рассуждениями. Если жидкость поднимается на высоту Δh , то втягивающая сила F совершает работу $\Delta A_1 = F\Delta h$. При этом изменится количество энергии, запасенной в конденсаторе, на величину ΔW . Для того чтобы напряжение между обкладками осталось постоянным, нужно, чтобы источник тока совершил работу $\Delta A_2 = U\Delta q$, где U — напряжение между об-

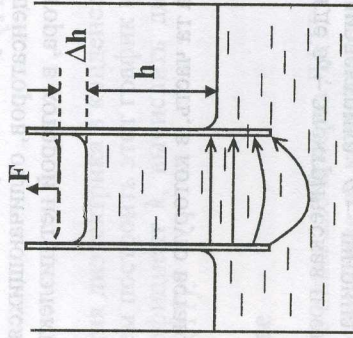


Рис. 2. Схема эксперимента

кладками, Δq – изменение заряда на пластинах конденсатора. Из закона сохранения энергии следует

$$\Delta A_1 + \Delta W = \Delta A_2, \quad (1)$$

Так как заряд конденсатора $q = CU$, где C – емкость конденсатора, то $\Delta q = \Delta CU$, а работа источника тока

$$\Delta A_2 = \Delta CU^2. \quad (2)$$

В этих соотношениях $\Delta C = C(h + \Delta h) - C(h)$, где $C(h)$ – емкость конденсатора с диэлектриком, заполняющим конденсатор на глубину h длины пластины.

Энергия, запасенная в конденсаторе $W = CU^2/2$, а изменение энергии

$$\Delta W = \frac{\Delta CU^2}{2}. \quad (3)$$

Подставляя формулы (2), (3) в (1), получим

$$F\Delta h = \frac{\Delta CU^2}{2}. \quad (4)$$

Вычислим теперь емкость конденсатора $C(h)$ с диэлектриком, вставленным на глубину h длины пластины. Очевидно, такой конденсатор можно рассматривать как параллельное соединение двух конденсаторов, отличающихся только длиной пластин. Та часть конденсатора, в которой нет диэлектрика, имеет емкость

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 a(b-h)}{d}, \quad (5a)$$

а та часть, в которую вставлен диэлектрик, имеет емкость:

$$C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon h a}{d}, \quad (5b)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная; ϵ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика, a – ширина пластин конденсатора, b – длина пластин конденсатора, d – расстояние между пластинами,

Таким образом, емкость конденсатора с диэлектриком

$$C(h) = C_1 + C_2 = C_0 + \frac{\epsilon_0(\epsilon - 1)ha}{d}, \quad (6)$$

где $C_0 = \frac{\epsilon_0 ba}{d}$ (7)

– емкость пустого конденсатора.

Следовательно,

$$\Delta C = \frac{\epsilon_0(\epsilon - 1)\Delta ha}{d}. \quad (8)$$

Так как в положении равновесия сила F в (4) уравновешивается силой тяжести диэлектрика P , втянутого в конденсатор, то, полагая в (4)

$$F = P = \rho ghda, \quad (9)$$

где ρ – плотность диэлектрика, получим с учетом (8)

$$\rho gh = \epsilon_0(\epsilon - 1) \frac{U^2}{2d^2}. \quad (10)$$

Из (10) видно, что если построить график, по горизонтальной оси которого отложить $U^2/(2d^2)$, а по вертикальной ρgh , то получится прямая линия, угловой коэффициент которой равен $k = \epsilon_0(\epsilon - 1)$. Поэтому диэлектрическую проницаемость диэлектрика можно определить из соотношения

$$\epsilon = 1 + \frac{k}{\epsilon_0}, \quad (11)$$

где $k = \rho gh/(U^2/(2d^2))$.

Таким образом, измеряя высоту поднятия диэлектрика в конденсаторе при различных напряжениях, мы можем построить этот график и, определив из этого графика угловой коэффициент k , вычислить диэлектрическую проницаемость по формуле (11).

Задание к работе

1. Соберите цепь по схеме рис. 1. От источника 220 В через ЛАТР и высоковольтный трансформатор подайте напряжение на конденсатор.
2. Измерительным микроскопом измерьте расстояние между пластинами конденсатора d , а также высоту поднятия диэлектрика h при

шести значениях напряжения U , на первичной обмотке трансформатора.

3. Зная коэффициент трансформации K , вычислите напряжение на конденсаторе $U = KU$, а также величины $rg\hbar$ и $U^2/2d^2$ для всех измеренных значений h и U .

4. Нанесите на график, по оси ординат которого откладывается величина $y = rg\hbar$, а по оси абсцисс — величина $x = U^2/2d^2$, точки, соответствующие величинам, вычисленным в п. 3.

5. Для каждой из измеренных точек вычислите инструментальную погрешность величин $y = rg\hbar$ и $x = U^2/2d^2$ и нанесите эти погрешности на график.

6. Проведите «наилучшую» прямую и определите графическим способом угловой коэффициент наклона k этой прямой и его погрешность σ_k (см. п. 6 введения).

7. С помощью формулы (11) вычислите среднее значение диэлектрической проницаемости $\bar{\epsilon}$ и оцените ее погрешность $\sigma_{\bar{\epsilon}}$.

8. Рассчитайте коэффициент наклона k и его погрешность σ_k по формулам метода наименьших квадратов (формулы (12) и (13) введения). По полученным в этом пункте значениям k и σ_k вычислите величины $\bar{\epsilon}$, $\sigma_{\bar{\epsilon}}$ и сравните их с соответствующими величинами, найденными в п. 6.

Контрольные вопросы

1. Какова цель работы?
2. Опишите метод измерения диэлектрической восприимчивости в этой работе.
3. Назовите величины, прямые измерения которых необходимо провести в данной работе.
4. В чем причина втягивания диэлектрика в конденсатор?
5. Какие вещества называются диэлектриками? Каков механизм поляризации диэлектрика?
6. Как вычисляется сила, действующая на диполь в неоднородном электрическом поле?
7. Объясните, как выводится формула (10).
8. Как изменяется заряд на конденсаторе при втягивании диэлектрика при постоянном напряжении U между пластинами?

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И. В. Курс общей физики. В 3 т. — М.: Наука, 1977. — Т. 2, § 29. Курс общей физики. В 5 кн. Книга 2. Электричество и магнетизм. Глава 2, § 4.2. — М.: Наука, 1998.
2. Службин Д. В. Общий курс физики. В 5 т. Т. III. Электричество, § 15, 28, 32, 33. — М.: Физматлит; Изд-во МФТИ, 2002.
3. Иродов И. Е. Электромagnetизм. Основные законы. Глава 3. — М.: Лаборатория базовых знаний, 2000 (и любой другой год издания).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 15

ИЗМЕРЕНИЕ ГЛУБИНЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВНУТРИ ПРОВОДНИКА

Цель работы

Изучение зависимости величины ослабления магнитного поля от толщины проводника, зависимости глубины проникновения магнитного поля от его частоты и определение удельной электропроводности проводника.

Теоретическое введение

Рассмотрим полупространство $z > 0$, заполненное однородным проводящим веществом с удельной электропроводностью σ , к которому при $z \leq 0$ приложено внешнее переменное магнитное поле, параллельное оси Ox : $B_x(t) = B_0 \cos \omega t$. Магнитное поле $B = B_x(z, t)$, возникающее при этом в проводящей среде, будет зависеть только от расстояния z рассматриваемой точки внутри проводника до его поверхности (рис. 1).

При этих условиях система уравнений Максвелла для полей B , H , E и D в проводящем полупространстве, которое предполагается неферромагнитным, сводится к уравнениям:

$$\frac{\partial H_x(z, t)}{\partial z} = j_y + \frac{\partial D_y(z, t)}{\partial t}, \quad (1a)$$