ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № **4-2**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Цель работы: Исследование электрического поля в диэлектрике.

Краткая теория

Диэлектрик состоит из атомов и молекул. Хотя суммарный заряд атома или молекулы равен нулю, такая система создает электрическое поле, так как положительный заряд ядра (ядер) и отрицательные заряды электронов находятся в различных точках пространства. Два одинаковых по величине и противоположных по знаку электрических заряда, находящихся на некотором расстоянии друг от друга, называют *электрическим диполем* (рис.1). Диполь характеризуется электрическим дипольным моментом

$$\mathbf{P}=q\mathbf{r}, \qquad (1)$$

где q - заряд диполя, а вектор **r** направлен от отрицательного заряда к положительному.

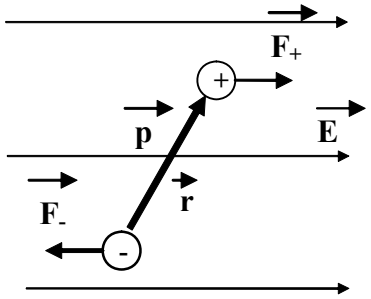


Рис. 1

Молекулы, обладающие собственным электрическим дипольным моментом при отсутствии внешнего поля, называются *полярными.* К ним относятся H_2O, CO, NH_3 и др. Однако существуют вещества, для атомов и молекул которых характерно симметричное распределение электронов относительно ядер. Такие молекулы и атомы не обладают собственным дипольным моментом и называются *неполярными.* Примером могут служить молекулы H_2, N_2, CO_2, CH_4 и т.п.

В отсутствие внешнего электрического поля дипольные моменты отдельных молекул диэлектриков либо равны нулю (для неполярных молекул), либо ориентированы хаотически (для полярных молекул), поэтому во всех случаях суммарный дипольный момент любого объема диэлектрика равен нулю.

Поляризацией диэлектриков называется процесс приобретения ими дипольного момента. Во внешнем электрическом поле **E** положительные заряды стремятся сместиться по направлению напряженности поля, а отрицательные - в противоположном направлении (см. рис.1). В результате диполи полярных молекул ориентируются по полю, а неполярные молекулы приобретают *индуцированный* (наведенный) дипольный момент, направленный вдоль внешнего поля, что приводит к *электронной* поляризации неполярных диэлектриков. Индуцированный дипольный момент молекул пропорционален напряженности внешнего поля:

$$\mathbf{P} = \beta\varepsilon_0\mathbf{E}, \qquad (2)$$

где β - поляризуемость атома или молекулы.

Если поместить диэлектрик с полярными молекулами во внешнее электрическое поле, то под действием этого поля каждая молекула-диполь начнет поворачиваться, стремясь расположиться вдоль внешнего поля ($\mathbf{p}\,||\,\mathbf{E}$), и диэлектрик поляри-

зуется (см. рис. 1). Такая поляризация носит название *ориентационной.*

В ионных кристаллах (NaCL и др.) под влиянием внешнего электрического поля положительные и отрицательные ионы смещаются в противоположные стороны. Каждая ячейка кристалла становится диполем, и кристалл поляризуется. Такая поляризация называется *ионной.*

Степень поляризации диэлектриков характеризуется вектором поляризации или поляризованностью **P**:

$$\mathbf{P} = \lim_{\Delta v \to 0} \frac{\sum_{\Delta v} \mathbf{p}_i}{\Delta \mathbf{V}} \quad , \tag{3}$$

где $\sum_{\Delta v} \mathbf{p}_i$ - суммарный дипольный момент всех молекул диэлектрика в элементе объема ΔV.

Вектор поляризации изотропных диэлектриков любого типа связан с напряженностью поля соотношением:

$$\mathbf{P}=\chi\varepsilon_0\mathbf{E}, \tag{4}$$

где χ - независящая от **E** величина, называемая *диэлектрической восприимчивостью.*

Заряды, входящие в состав молекул диэлектрика, называются *связанными.* Под действием внешнего поля они не могут покинуть пределов молекулы, а лишь смещаются относительно положений равновесия. Поляризация диэлектрика сопровождается появлением поверхностных зарядов на его границах (рис.2). В тех местах, где линии напряженности выходят из диэлектрика, на поверхности его возникают положительные связанные заряды, а там, где линии входят в диэлектрик - отрицательные. Эти заряды распределяются по поверхности диэлектрика с поверхностной плотностью σ', которая взаимосвязана с вектором поляризации **P**:

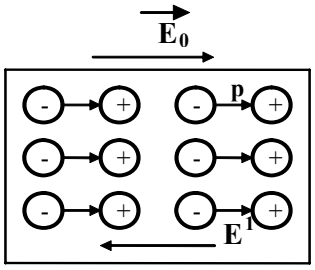


Рис. 2

$$\sigma' = \mathbf{P}\cos\alpha = P_n, \tag{5}$$

где P_n — проекция вектора поляризации на внешнюю нормаль к соответствующей поверхности; α - угол между вектором поляризации и направлением внешней нормали к поверхности. Формула (5) справедлива и для неоднородных диэлектриков.

Если диэлектрик однороден, то внутри его не возникает избыточных связанных зарядов, поскольку при однородной поляризации заряды переходят на новое место, занимая места ушедших в таком же количестве зарядов. Поэтому для однородных диэлектриков объемная плотность ρ' связанных зарядов равна нулю в любой точке внутри диэлектрика. Если же диэлектрик неоднороден, то в объеме $\Delta\mathbf{V}$, взятом внутри диэлектрика, число положительных и отрицательных зарядов различно и, следовательно, ρ' отличается от нуля. Появляющиеся при поляризации диэлектрика поверхностные и объемные связанные заряды создают в толще диэлектрика свое поле **E'** (см. рис. 2), направленное навстречу внешнему $\mathbf{E_0}$ и его ослабляющее. Результирующая напряженность поля равна:

$$\mathbf{E}=\mathbf{E_0}+\mathbf{E}'. \tag{6}$$

Таким образом, поле внутри диэлектрика слабее, чем внешнее поле. Чтобы

рассчитать напряженность **E** поля внутри диэлектрика, необходимо знать не только напряженность $\mathbf{E_0}$ внешнего поля, но и напряженность **E'** поля, которая, в свою очередь, определяется напряженностью $\mathbf{E_0}$ поля. Поэтому соотношение (5) малопригодно для нахождения напряженности **E** результирующего поля в диэлектрике.

Вычисление полей в диэлектрике упрощается, если ввести величину **D**, называемую *вектором электрического смещения (электрической индукцией)*. Этот показатель характеризует электрическое поле, создаваемое только свободными зарядами, и определяется соотношением:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0\mathbf{E}+\mathbf{P}. \qquad (7)$$

Подставляя (4) в (7), получим

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0(1+\chi)\mathbf{E}. \qquad (8)$$

Безразмерная величина $\varepsilon = 1+\chi$ называется *относительной диэлектрической проницаемостью среды.* Для вакуума $\varepsilon = 1$, для диэлектриков $\varepsilon > 1$. Величина ε показывает, во сколько раз напряженность поля в вакууме больше напряженности поля в диэлектрике.

С учетом последнего выражение (8) принимает вид:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0\varepsilon\mathbf{E}. \qquad (9)$$

Итак, метод расчета электрического поля диэлектрика может быть следующим: по известному распределению свободных зарядов, создающих внешнее поляризующее поле $\mathbf{E_0}$, рассчитывается величина

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0\mathbf{E_0}, \qquad (10)$$

а затем по формуле (10) находится напряженность поля в диэлектрике:

$$\mathbf{E} = \mathbf{D}/(\varepsilon_0\varepsilon). \qquad (11)$$

Следует иметь в виду, что соотношения (8) и (9) справедливы только для однородных изотропных диэлектриков. В анизотропных средах векторы **D** и **E** неколлинеарны, поэтому для их определения необходимо учитывать зависимость ε диэлектрика от координат. Кроме того, предлагаемый выше расчет поля в диэлектрике применим лишь в том случае, если однородный и изотропный диэлектрик полностью заполняет объем, ограниченный эквипотенциальными поверхностями поля свободных зарядов.

Описание метода исследования

В лабораторной работе применяется метод определения ε, основанный на измерении емкости плоского конденсатора известного размера.

При включении конденсатора в цепь переменного тока он оказывает току сопротивление:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi\gamma C}, \qquad (12)$$

где $C = \varepsilon\varepsilon_0 S/d$ – его емкость; S, d – площадь пластин и расстояние между ними; ω, γ - соответственно круговая и линейная частота переменного тока.

При известных значениях эффективного напряжения U_0**,** частоты ω и активного сопротивления R емкость конденсатора можно найти с помощью обобщенного закона Ома для переменного тока:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + (1/\omega C)^2}}, \qquad (13)$$

где U - падение напряжения на активном сопротивлении R, измеряемое вольтметром.

Из последнего получим:

$$C = \frac{U}{\omega R\sqrt{U_0^2 - U^2}}. \qquad (14)$$

Параметры R и C подобраны так, что в данном диапазоне частот выполняется условие $R << 1/\omega C$, при котором значением U в подкоренном выражении (15) можно пренебречь ($U<<U_0$), и расчетная формула для относительной диэлектрической проницаемости приобретает вид:

$$\varepsilon = \frac{Ud}{2\pi\gamma\varepsilon_0 SRU_0}. \qquad (15)$$

Электрическая схема установки для измерения диэлектрической проницаемости (рис. 3) состоит из генератора гармонических колебаний (**ГГК)**, магазина сопротивлений (**R)**, плоского конденсатора (**C)** с набором исследуемых диэлектриков и электронного вольтметра (**ЭВ)**, измерительный провод которого может подключаться к ГГК (позиция 1) для измерения выходного напряжения, либо в позицию 2 для определения напряжения на конденсаторе. Питание генератора и вольтметра осуществляется от сети.

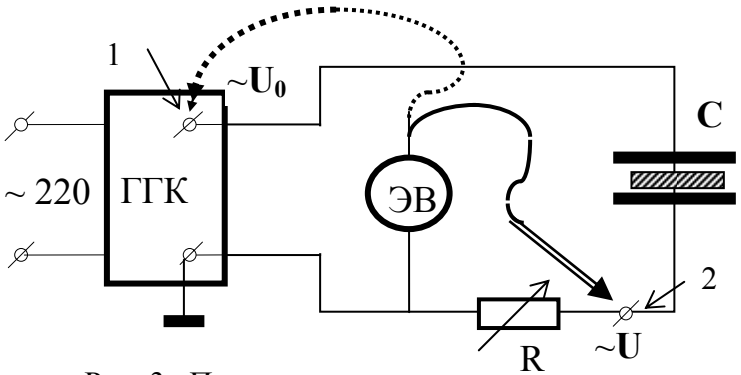


Рис. 3. Принципиальная электрическая

Техника безопасности

Соблюдать общие меры предосторожности при работе с электроприборами, предусмотренные в данной лаборатории.

Порядок выполнения работы

1. Подготовить приборы лабораторной установки к работе:
   - конденсатор - вставить 1-ый образец диэлектрика в зазор между пластинами;
   - магазин сопротивлений **R -** установить с помощью соответствующих переключателей произвольное значение активного сопротивления из диапазона **3...6 кОм**;
   - электронный вольтметр - включить тумблер «**Сеть**» на его панели:
     - нажать на кнопку «**~U**» для выбора режима измерений;
     - нажать кнопку «**АВП**» для автоматического выбора предела измерений;

2. Проведите измерения с образцом диэлектрика № 1:
   - ГГК – включите тумблер «**Сеть**» на его панели:
     – измерительный провод **ЭВ** вставьте в выходную клемму **ГГК** (рис. 3, позиция 1);
     – выставьте на **ГГК** произвольное значение частоты колебаний в интервале **10...16 кГц;**
     – установите с помощью регулятора усиления произвольное значение выходного напряжения $\mathbf{U_0}$ в диапазоне **3…11 В,** контролируя его величину по **ЭВ**;
   - ЭВ - перенесите измерительный провод от генератора на клемму магазина сопротивлений (позиция 2) и измерьте величину напряжения на конденсаторе (**U**). Показания вольтметра, а также установленные значения частоты, сопротивления и выходного напряжения ГГК занести в таблицу 1.

Таблица 1

Таблица экспериментальных данных

№	Выходное напряжение ГГК **(U_0),** В	Напряжение на конденсаторе **(U),** В	Частота генератора **(ν),** кГц	Величина сопротивления **(R),** Ом	Примечание
1 2 3					диэлектрик № 1 d_1 = ... мм
4 5 6					диэлектрик № 2 d_2 = ... мм

3. Проведите аналогичные измерения (см. п. 2) для **2-х других произвольных значений частоты** в указанном диапазоне.
4. Вставьте следующий образец диэлектрика в зазор между пластинами конденсатора.
5. Проведите измерения его диэлектрических свойств по пп. **2** и **3**.

Обработка результатов измерений

2. 1. Вычислите среднее значение диэлектрической проницаемости по формуле (15) для каждого диэлектрика.
3. Рассчитайте значение модуля вектора электрического смещения **D** по формуле (10) для каждого диэлектрика для одного из трех значений эффективного напряжения $\mathbf{U_0}$. Напряженность поля свободных зарядов найдите из известного выражения: $E_0 = \frac{U_0}{d}$.
4. Определите значение модуля напряженности поля в диэлектрике **E** по формуле (11), используя данные предыдущего пункта.
5. Рассчитайте абсолютные ($\Delta\varepsilon, \Delta D, \Delta E$) и относительные ($\varepsilon_\varepsilon$, ε_D, ε_E) погрешности измерения параметров электрического поля в диэлектрике.

6. Результаты расчетов занесите в таблицу 2.

Таблица 2

Параметры поля диэлектриков

ε	$\Delta\varepsilon$	ε_ε, %	D, Кл/м^2	ΔD, Кл/м^2	ε_D, %	E, В/м	ΔE, В/м	ε_E, %	Примечание
									диэлектрик №1
									диэлектрик №2

Контрольные вопросы

1. Какими параметрами описываются электрические свойства молекулы, диэлектрика?
2. Какие существуют типы поляризации?
3. В чем заключается поляризация полярного, неполярного диэлектрика?
4. Каково различие между векторами **D** и **E** ?
5. Как определяется напряженность поля в диэлектрике?