

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1
ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ
ДИЭЛЕКТРИКОВ

Лабораторная работа разработана профессором
Саврухиным А.П.

1. Цель работы

Изучение свойств диэлектриков и освоение метода определения диэлектрической проницаемости по величине емкости конденсатора.

2. Содержание работы

Определение диэлектрической проницаемости различных диэлектриков. Расчёт и измерение ёмкости конденсатора с одним или двумя различными диэлектриками.

3. Краткие сведения о диэлектриках

Диэлектрики это вещества, в которых нет *свободных зарядов*, а потому и *токов проводимости*. Разместить диэлектрическое вещество между пластинами конденсатора, имеющими разные потенциалы, означает внести его во внешнее электростатическое поле. Это поле создают *сторонние заряды*, имеющиеся на обкладках (пластинах) конденсатора. Поскольку в диэлектрике все *заряды связанные*, поле может только смещать электроны и ядра атомов диэлектрика. Характер перераспределения зарядов определяется химическим составом и агрегатным состоянием вещества.

В результате на некоторых участках, например, на границе вещества могут появиться не скомпенсированные макроскопические **поляризационные заряды**, а такое перераспределение связанных зарядов называется *поляризацией диэлектрика*. Полное поле \mathbf{E} будет суперпозицией полей сторонних $\mathbf{E}^{\text{стор}}$ и поляризационных $\mathbf{E}^{\text{пол}}$ зарядов, и для напряженностей получим: $\mathbf{E} = \mathbf{E}^{\text{стор}} + \mathbf{E}^{\text{пол}}$.

Молекулу удобно представить в виде диполя. Суммарный заряд диэлектрика равен нулю, и он складывается из суммы отрицательных зарядов электронов и суммы положительных зарядов протонов. Если центры этих сумм совпадают (Рис. 1а), то это молекула **неполярная** (дипольный момент равен нулю у H_2 , O_2 , N_2), а если не совпадают (Рис. 1б), то она **полярная** (дипольный момент не равен нулю у H_2O , CO , HCl).

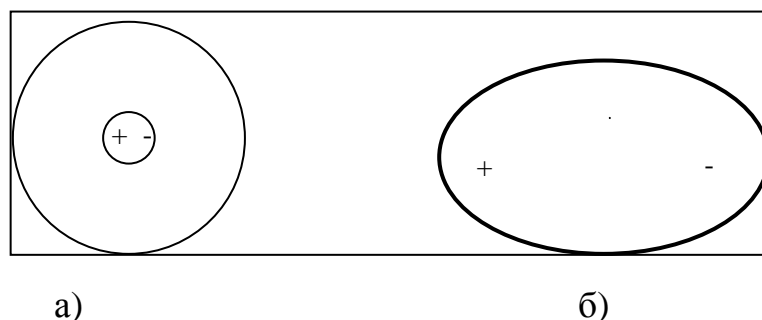


Рис. 1. неполярная (а) полярная (б) молекулы

Деформационная поляризация в неполярных диэлектриках это смещение под действием внешнего электрического поля зарядов молекул: положительных по направлению поля, отрицательных против поля. В результате молекула приобретает дипольный момент, прямо

пропорциональный напряженности поля E .

Ориентационная поляризация полярных диэлектриков это переход отдельных диполей при наложении внешнего поля из состояния хаотичной ориентации (Рис. 2а) в состояние направленности вдоль линии напряженности поля (Рис. 2б).

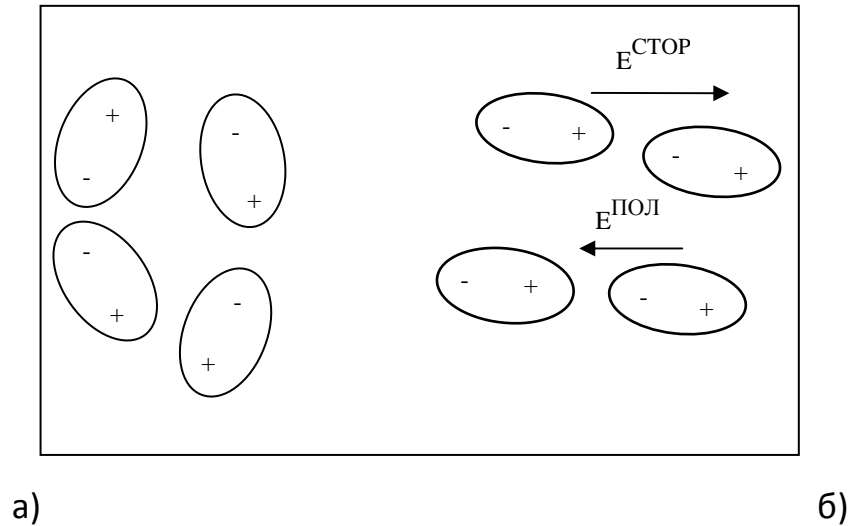


Рис. 2. Исходное состояние (а) и ориентационная поляризация (б) полярных диэлектриков

Диэлектрическая проницаемость вещества определяется по величине ёмкости конденсатора, заполненного исследуемым диэлектриком. Примем, что при упругой деформации после снятия внешнего поля вещество возвращается в исходное деполяризованное состояние.

Что происходит при подключении конденсатора к источнику постоянного напряжения, как показано на рис. 3? Поскольку на подводящих проводниках падение напряжения мало, на обкладках конденсатора разность потенциалов должна стать равной напряжению источника питания U . Источник совершает работу по переносу зарядов (ток $I_{\text{пров}}$) так, что на левой обкладке потенциал повышается, а на правой – понижается. Нарастание напряженности поля $E^{\text{СТОП}}$ приводит к повороту электрических диполей. Как показано на рис. 4, имеются составляющие скорости перемещения зарядов диполя, направленные вдоль поля $E^{\text{СТОП}}$ (2) и против поля (отрицательный заряд 1). Эти местные перемещения трактуются как отрезки тока, условно называемого **током смещения** $I_{\text{смещ}}$. Этот импульсный процесс зарядки конденсатора заканчивается тогда, когда поле $E^{\text{ПОЛ}}$ полностью скомпенсирует поле $E^{\text{СТОП}}$.

Когда диэлектрик отсутствует, а пластины помещены в вакуум, суть процесса зарядки состоит в поляризации вакуума, который есть не что иное, как особая среда с диэлектрической проницаемостью ϵ_0 . Заряды на одной обкладке ничего не знают о зарядах на другой обкладке; они реагируют на состояние пространства в их окрестности. А именно, заряды влияют на состояние вакуума, и это изменение распространяется по среде,

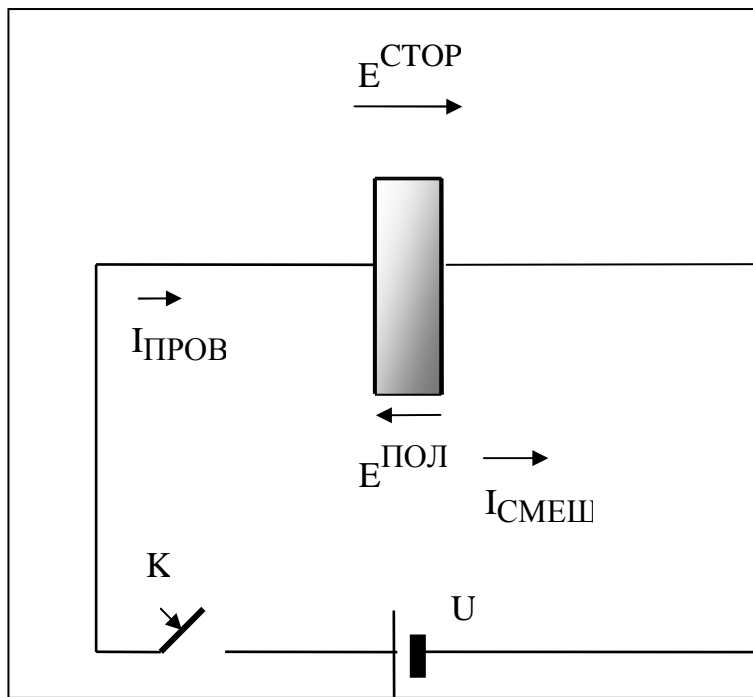


Рис.3. Схема зарядки конденсатора от источника постоянного напряжения

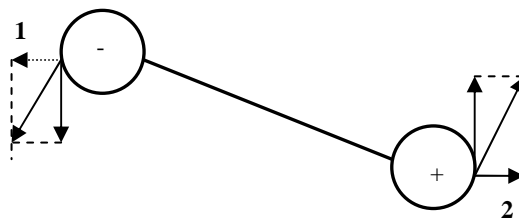


Рис.4. Поворот диполя во внешнем поле

подобно тому, как давление на резину в точке распространяется на весь объём. Это изменённое состояние и называют **электрическим полем**.

Диэлектрик с крупными доменами увеличивает ток смещения на величину относительной диэлектрической проницаемости ϵ , которая находится экспериментально. Диэлектрическая проницаемость воздуха мала, а конденсаторы без диэлектрика используются на таких высоких частотах, при которых диэлектрические потери в обычных диэлектриках становятся недопустимо большими. В частности, потери возникают за счёт вязкости вещества диэлектрика, а также эффекта запаздывания перемещения доменов относительно скорости изменения подводимого напряжения.

Введение диэлектрика между обкладками конденсатора позволяет увеличить его ёмкость, а также предотвращает возникновение появления тока проводимости при пробое промежутка между обкладками.

Таблица 1 относительной диэлектрической проницаемости и допустимой напряжённости электрического поля для обычных

диэлектриков

Вещество	относительная диэлектрическая проницаемость	допустимая напряженность электрического поля
	ϵ	Епробоя, кВ/мм
воздух	1.00057	1
оргстекло (плексиглас)	3.5-4.5	18-35
гетинакс	7-8	16-25
винипласт	3.1-3.5	45
вода	78	
слюда мусковит	6.8-7.5	10^5

На практике, измерение емкости удобнее проводить на переменном электрическом поле. В данной лабораторной работе выбран такой диапазон частот, что зависимость диэлектрической проницаемости от частоты электрического поля сказывается незначительно, и ею можно пренебречь.

4. Описание измерительной установки

Схема измерений дана на рис. 5, где приняты следующие обозначения:

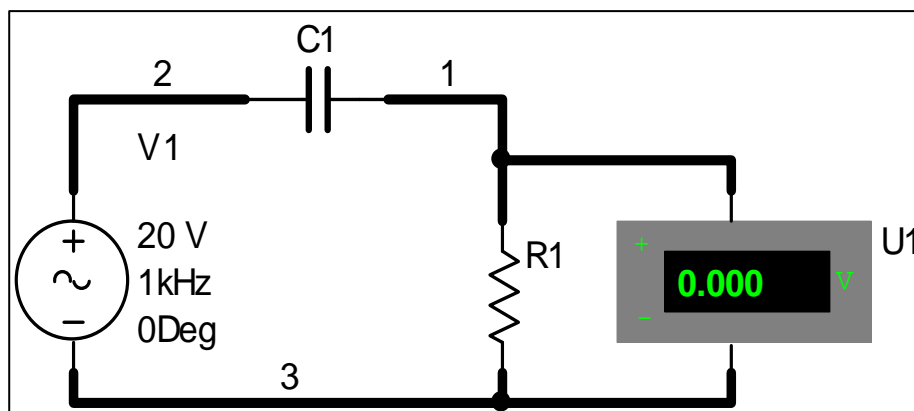


Рис. 5. Электрическая схема измерений

V1 – источник переменного напряжения, R1 – измерительный резистор, U1 – вольтметр переменного тока, C1 – исследуемый конденсатор.

Источник задаёт ток в цепи, вольтметр измеряет напряжение на резисторе, что позволяет вычислить ток в цепи.

5. Приборы для выполнения работы

1. Генератор синусоидального переменного тока. 2. Милливольтметр. 3. Конденсатор с двумя металлическими пластинами в виде круглых дисков.



Рис. 6а. Генератор

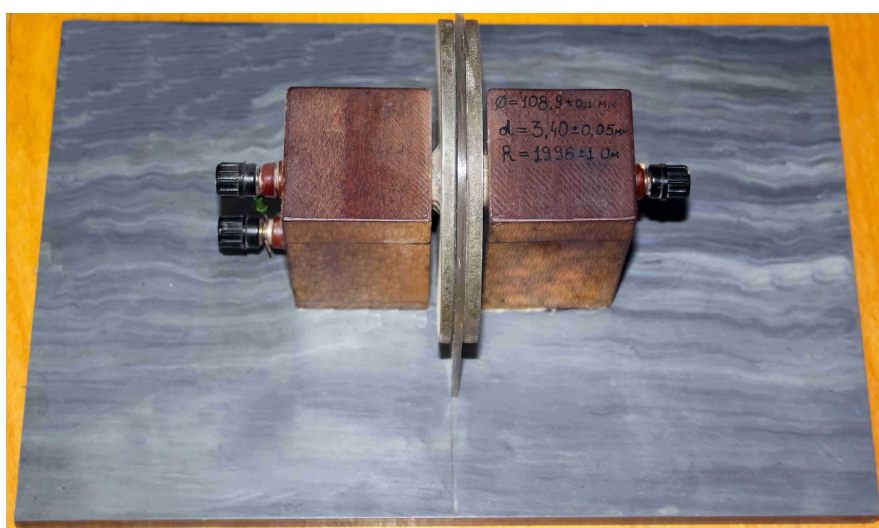


Рис. 6б. Исследуемый конденсатор.

4. Набор исследуемых диэлектриков.

6. Порядок выполнения работы

Опыт 1. Собрать цепь согласно рис. 5. без диэлектрика. Генератор подключить к правой клемме и к нижней клемме слева. Вольтметр подключить к двум клеммам слева. В заданном в таблице 2 режиме произвести измерение напряжения на резисторе R1 и заполнить соответствующие графы. Установить и поддерживать напряжение на выходе генератора $V_1 = 20$ В.

Опыт 2. Прodelать пункт 1 с вставленным между пластинами диэлектриком.

Опыт 3. Прodelать пункт 2 с введением диэлектрика между пластинами, оставив половину площади свободной.

Таблица 2

измерение		расчёт		
частота генератора	напряжение на резисторе R1	ток конденсатора	ёмкость конденсатора C1	относительная диэлектрическая проницаемость
f, кГц	U_{R1} , мВ	I_{C1} , мкА	C1, пФ	
1	опыт 1			
	опыт 2			
	опыт 3			
5				
10				
50				
100				
среднее значения емкости C1 для каждого из трёх опытов				

В ячейки, разбитые на три строки, заносить данные последовательно из трёх опытов.

7. Обработка результатов измерений

Исходные данные. Диаметр пластин $D=109.15$ мм.

Расстояние между пластинами $d=3.4 \pm 0.05$ мм.

Последовательно включённый резистор $R1=1996 \pm 1$ Ом.

Толщина диэлектрика из оргстекла $d_{орг}=2.7$ мм. Для воздуха принять $\epsilon=1$.

Опыт 1.

1. Расчётная ёмкость конденсатора в опыте 1 вычисляется по формуле:

$$C_1 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} \quad (1)$$

где электрическая постоянная $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, площадь пластин $S = \frac{\pi D^2}{4}$.

2. Вычислить среднее значение емкости конденсатора C_1 , округленное до десятых долей пикофарады, и сравнить с расчётом. Для этого: найти для всех частот $I_{C1} = U_{R1} / R_1$, вычислить круговую частоту $\omega = 2\pi f$ источника V_1 , найти напряжение на конденсаторе $U_{C1} = V_1 - U_{R1}$. Реактивное сопротивление конденсатора вычисляется по формуле $X_c^{теор} = 1 / \omega C_1$, а по результатам измерения равно $X_c^{измер} = U_{C1} / I_{C1}$, отсюда ёмкость по результатам измерений равна $C_1^{измер} = I_{C1} / \omega U_{C1}$. Среднее значение равно сумме измерений на пяти частотах, делённое на 5.

Опыт 2. Схема по рис.7.

1. Найти для всех частот $I_{C1} = U_{R1} / R_1$, вычислить круговую частоту $\omega = 2\pi f$ источника V_1 , найти напряжение на конденсаторе $U_{C1} = V_1 - U_{R1}$.

2. Вычислить среднее значение емкости конденсатора C_1 , округленное до десятых долей пикофарады.

3. Определить величину относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика ε_d .

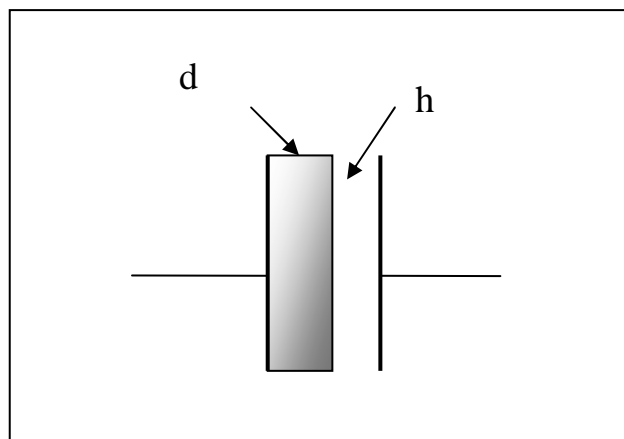


Рис. 7. Конденсатор с диэлектриком толщиной $d=2.7$ мм и воздушной прослойкой толщиной $h=0.7$ мм.

Схема представляет вариант последовательного соединения конденсатора с диэлектриком d и ёмкостью C_d , и конденсатора с диэлектриком h и ёмкостью C_h . Полная ёмкость вычисляется по формуле: $1/C_1 = 1/C_d + 1/C_h$.

По результатам измерений полная ёмкость равна $C1^{измер} = I_{C1} / \omega U_{C1}$.

Ёмкость воздушного конденсатора C_h вычисляется по формуле (1), причём вместо d подставляется h . По результатам измерений

$C_d^{измер} = C1^{измер} \cdot C_h / (C_h - C1^{измер})$. С другой стороны, $C_d = \epsilon_d \epsilon_0 S / d$. Приравняв эти значения, найдём искомую величину относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика ϵ_d .

Опыт 3. Схема по рис. 8.

1. Найти для всех частот $I_{C1} = U_{R1} / R1$, вычислить круговую частоту $\omega = 2\pi f$ источника $V1$, найти напряжение на конденсаторе $U_{C1} = V1 - U_{R1}$.
2. Вычислить среднее значение емкости конденсатора $C1$, округленное до десятых долей пикофарады.
3. Сравнить найденное значение ёмкости с расчётной.

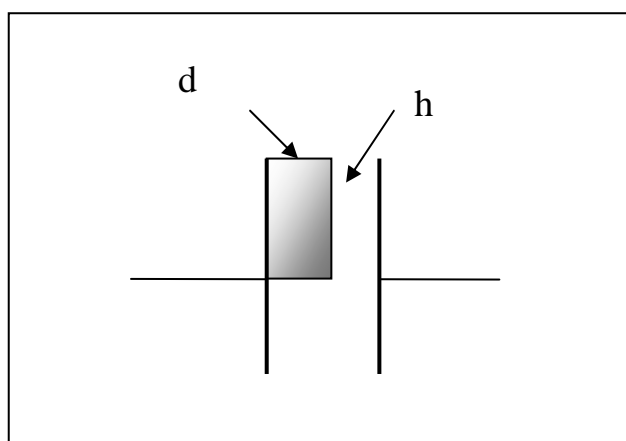


Рис. 8. Конденсатор с диэлектриком толщиной $d=2.7$ мм и воздушной прослойкой толщиной $h=0.7$ мм. Площадь диэлектрика равна половине S .

В данной схеме включены параллельно два конденсатора: ёмкость нижнего равна половине ёмкости $C1$, найденной в опыте 1, а ёмкость верхнего равна половине ёмкости $C1$, найденной в опыте 2. Полная ёмкость равна их сумме.

8. Вопросы для самопроверки

1. Какие заряды называются свободными, связанными, сторонними, поляризационными?
2. Каков механизм поляризации полярных диэлектриков.

3. Каков механизм поляризации неполярных диэлектриков.
4. Каков физический смысл диэлектрической проницаемости ϵ ?
5. Что такое конденсатор? Где применяются конденсаторы?
6. Что такое ток смещения?
7. Будет ли работать конденсатор без диэлектрика в абсолютной пустоте?
8. Напишите формулы для ёмкости плоского конденсатора в вакууме; суммарной ёмкости при последовательном и параллельном соединении нескольких конденсаторов.

9. Литература

1. Савельев И.В. Курс физики, кн.2. Электричество и магнетизм. – М.: Высшая школа, 2003.
2. Калашников С.Г. Электричество. - М.: Наука, 2004.
3. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.
Фейнмановские лекции по физике. Выпуск 5. "Электричество и магнетизмом". Изд.: Едиториал УРСС, 2004 г.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.3,-М.:ФИЗМАТЛИТ;Изд. МИФИ,2002.