

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

ИЗМЕРЕНИЕ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания
по выполнению лабораторной работы по физике
для студентов, обучающихся по техническим (550000)
и технологическим (650000) направлениям

Екатеринбург
УрФУ
2011

УДК 537.2:001.891.57(076)

Составители: А. В. Аминев, О. Е. Кириллов

Научный редактор – доц. канд. физ.-мат. наук А. Г. Волков

Измерение диэлектрической проницаемости материалов :
методические указания по выполнению лабораторной работы / сост.
А. В. Аминев, О. Е. Кириллов. Екатеринбург: УрФУ, 2011. 15 с.

Изложены теория и практическая часть проведения лабораторной работы по измерению диэлектрической проницаемости материалов, а также методика обработки полученных результатов.

Библиогр.: 3 назв. Рис. 3. Прил. 2.

Подготовлено кафедрой физики

© УрФУ, 2011

ВВЕДЕНИЕ

Емкость плоского конденсатора вычисляется по формуле

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

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика между обкладками конденсатора; S – площадь обкладок конденсатора; d – расстояние между обкладками конденсатора.

Зная геометрию конденсатора (то есть площадь обкладок и расстояние между ними) и измерив его емкость, можно вычислить диэлектрическую проницаемость по формуле

$$\varepsilon = \frac{Cd}{\varepsilon_0 S}. \quad (2)$$

В настоящей работе емкость конденсатора вычисляется по его проводимости на переменном токе в схеме, приведенной на рис.1.

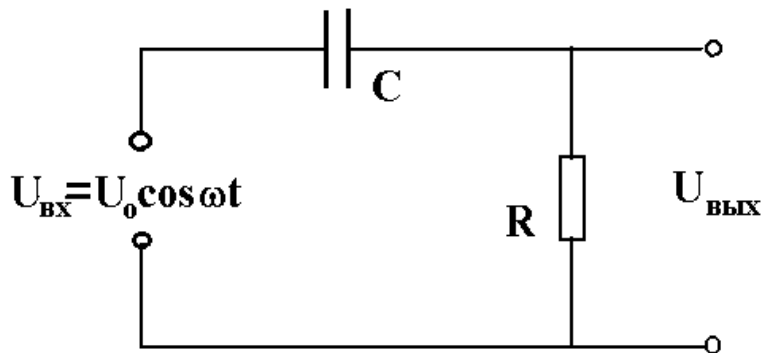


Рис. 1. Схема измерения проводимости конденсатора

Коэффициентом передачи K называется отношение амплитуды выходного напряжения к амплитуде входного напряжения.

В данном случае это отношение амплитуды напряжения на резисторе U_{0R} к амплитуде поданного на цепь напряжения U_0 от генератора

$$K = \frac{U_{0R}}{U_0}. \quad (3)$$

По закону Ома для переменного тока амплитуды силы тока I_0 и напряжения U_0 связаны соотношением

$$U_0 = I_0 \sqrt{R^2 + 1/(\omega^2 C^2)}.$$

Тогда амплитуда напряжения на резисторе рассчитывается по формуле

$$U_{0R} = I_0 R = \frac{U_0 \omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

и коэффициент передачи (3) будет иметь вид

$$K = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}.$$

Откуда емкость C может быть определена по формуле

$$C_p = \frac{K}{\omega R \sqrt{1 - K^2}}. \quad (4)$$

Измеряя амплитуды входного и выходного напряжений и определяя K по их отношению (3), вычисляется емкость по формуле (4).

На практике вычисленное (4) значение емкости конденсатора в схеме будет отличаться от емкости одиночного конденсатора. Это обусловлено тем, что между элементами цепи, а также между цепью и телами (особенно проводниками), расположенными вблизи нее, вследствие явления электрической индукции возникают дополнительные емкости, называемые паразитными. Поэтому при определении ε в формулу (2) необходимо подставлять значение $C = C_p - C_{\text{пар}}$, где C_p – значение емкости конденсатора, вычисленное по (4) – реальная измеренная емкость; $C_{\text{пар}}$ – суммарная паразитная емкость цепи.

Определение значения паразитной емкости $C_{\text{пар}}$ в реальных цепях представляет достаточно сложную задачу. В лабораторной работе используется методика, позволяющая рассчитать диэлектрическую проницаемость материала, не проводя расчет $C_{\text{пар}}$.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

На сменной плате установлен разборный конденсатор C и измерительное сопротивление R . Принципиальная схема, собранная на сменной плате приведена на рис. 2.

Нижняя обкладка разборного конденсатора неподвижно закреплена на плате. Верхняя обкладка съемная и крепится на плате с помощью двух винтов. Исследуемый материал, закрепленный в диэлектрическую рамку, зажимается между верхней и нижней обкладками с помощью винтов.

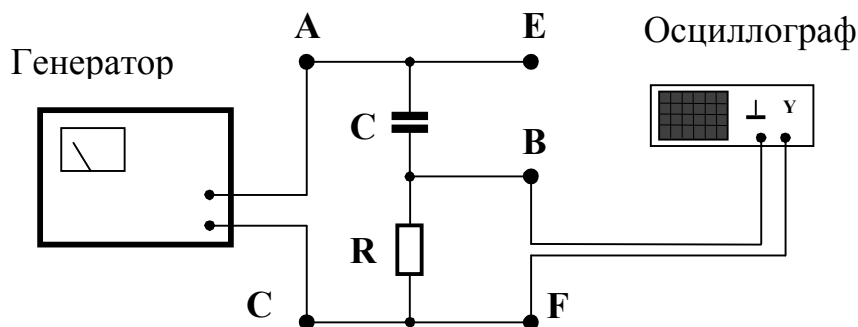


Рис. 2. Принципиальная схема установки

Для измерения емкости конденсатора в точку А схемы (рис. 2) подают переменное напряжение от звукового генератора.

Для измерения амплитуды напряжения генератора используют вольтметр, находящийся на передней панели генератора. С учетом входных емкостей кабеля и электронного осциллографа $C_{\text{вх}}$, входного сопротивления электронного осциллографа $R_{\text{вх}}$ и паразитных емкостей монтажа $C_{\text{пар}}$ схема измерения имеет вид, представленный на рис. 3.

В этой схеме $C_{\text{вх}} \approx 100$ пФ; $R_{\text{вх}} \approx 1$ МОм. Величина измерительного сопротивления $R = 5,1$ кОм. Поэтому влиянием входного сопротивления можно пренебречь, при этом ошибка измерения $U_{\text{вых}}$ не превысит 0,5 %. Сопротивление переменному току входной емкости на частотах не выше 10 кГц не превышает 200 кОм, что вносит ошибку измерения не более 2,5 %. Поэтому на таких частотах для расчетов коэффициента передачи и измеряемой емкости можно пользоваться формулой (4).

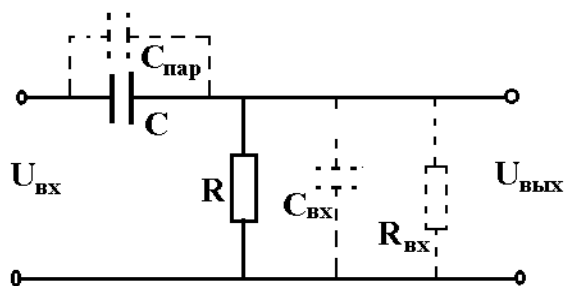


Рис. 3. Эквивалентная схема установки

Если значение сопротивления R не указано на плате, то его измерение производится омметром между точками B и C . Учет паразитной емкости монтажа выполняется с помощью набора образцов с различной площадью диэлектрика в диэлектрической рамке и известной толщиной диэлектрической прослойки. Уменьшение площади диэлектрика осуществляется удалением части пленки за счет сверления в ней отверстий. Тогда емкость полученного сложного конденсатора может быть рассчитана как сумма параллельно включенных конденсаторов с диэлектрической и вакуумной прослойками:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon (S - S_{\text{отв}}) + \varepsilon_0 S_{\text{отв}} / d + C_{\text{пар}} , \quad (5)$$

где $S_{\text{отв}}$ – общая площадь отверстий. Учитывая то, что $S_{\text{отв}} = S - S_{\text{д}}$, где $S_{\text{д}}$ – площадь диэлектрика, получаем

$$C = \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) S_{\text{д}} / d + \varepsilon_0 S / d + C_{\text{пар}} . \quad (6)$$

Как видно из формулы (6), емкость конденсатора линейно зависит от площади диэлектрика $S_{\text{д}}$, то есть имеет вид $C = k S_{\text{д}} + C_0$, где

$$k = \varepsilon_0(\varepsilon - 1) / d, \quad C_0 = \varepsilon_0 S / d + C_{\text{пар}} . \quad (7)$$

Площадь перекрытия пластин S указывается на стенде, толщина пластин d измеряется микрометром. Тогда, используя метод наименьших квадратов, можно найти коэффициент наклона линейной зависимости k и диэлектрическую проницаемость пластин без расчета паразитной емкости $C_{\text{пар}}$.

РЕКОМЕНДУЕМЫЙ ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Цель лабораторной работы – определить диэлектрическую проницаемость для трех заданных диэлектриков.

1. Соберите схему, соответствующую данной работе.
2. Включите звуковой генератор и электронный осциллограф.
3. Микрометром измерьте толщину пластинок. Запишите площади диэлектрических пластинок и площадь перекрытия пластин конденсатора S . Запишите величину измерительного сопротивления R .
4. Установите заданные преподавателем (лаборантом) входное напряжение U_0 и частоту ν входного напряжения. Напряжение U_0 измеряется вольтметром, установленным на передней панели генератора. *Вольтметр показывает действующее значение напряжения! В протокол измерений необходимо записывать амплитудное значение U_0 !*
5. Измерьте U_{0R} для всех пластинок.
6. Повторите п.4,5 для всех заданных преподавателем (лаборантом) амплитуд U_0 и частот ν входного напряжения.
7. Выключите электронный осциллограф и звуковой генератор.
8. Подпишите у преподавателя (лаборанта) результаты измерений (протокол измерений).
9. Обработайте результаты измерений (см. прил. 2).
10. Составьте отчет (см. прил. 1).

По всем вопросам обращайтесь к лаборанту или преподавателю.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое конденсатор?
2. Закон Ома для переменного тока.
3. Что такое диэлектрическая проницаемость?
4. Как измеряется диэлектрическая проницаемость в данной работе?
5. Как можно определить графически диэлектрическую проницаемость?
6. Как определяется паразитная емкость схемы в данной работе?

1. Савельев С. И. Курс общей физики / С. И. Савельев. М.: Наука, 1987. Т. 2. 320 с.
2. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм / А. Н. Матвеев. М.: Высш. школа, 1983. 256 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики / Д. В. Сивухин. М.: Наука, 1983. Т. 3. 435 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Рекомендуемая форма отчёта

Титульный лист

УрФУ
КАФЕДРА ФИЗИКИ

ОТЧЕТ

о лабораторной работе

**ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ**

Студент(ка) _____.

Группа _____.

Дата _____.

На внутренних страницах:

1. Цель работы.

Определение диэлектрической проницаемости материалов по измерению емкости плоского конденсатора.

2. Расчетные формулы.

$$C_p = \frac{K}{\omega R \sqrt{1 - K^2}},$$

где C_p – реальная (измеренная) емкость плоского конденсатора;
 K – коэффициент передачи;
 R – величина измерительного сопротивления;
 ω – циклическая частота.

$$\varepsilon = 1 + \frac{k \langle d \rangle}{\varepsilon_0},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость вещества;
 $\langle d \rangle$ – средняя толщина пластинок;
 ε_0 – электрическая постоянная;
 k – угловой коэффициент (формула (7)).

3. Принципиальная схема установки.

4. Средства измерений и их характеристики.

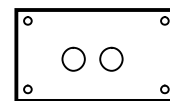
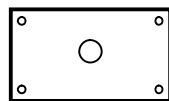
Электронный осциллограф, звуковой генератор, универсальный лабораторный стенд, сменная плата с макетом лабораторной работы, набор диэлектрических пластин, микрометр.

Погрешности приборов.

5. Результаты измерений.

5.1. Площадь и толщина диэлектрических пластин.

Площадь обкладок конденсатора $S = 706 \text{ мм}^2$.



Фторопласт
 мм^2

$$S_1 = 685 \text{ мм}^2$$

$$S_2 = 484 \text{ мм}^2$$

$$S_3 = 283$$

(белый)

$$\langle d \rangle =$$

Текстолит
 мм^2

$$S_1 = 685 \text{ мм}^2$$

$$S_2 = 520 \text{ мм}^2$$

$$S_3 = 455$$

(коричневый)

$$\langle d \rangle =$$

Стеклотекстолит
 мм^2

$$S_1 = 685 \text{ мм}^2$$

$$S_2 = 520 \text{ мм}^2$$

$$S_3 = 455$$

(желтый)

$$\langle d \rangle =$$

5.2 . Параметры схемы.

Измерительное сопротивление $R =$

5.3. Определение емкости конденсатора в схеме C_p (вычисляется по формуле (4)).

Таблица

U_0	ν	ω	U_{0R}	K	C_p	$\langle C_p \rangle$	σ_p

Внимание! Таблица заполняется для каждой исследуемой пластинки. Если задана одна частота и одна амплитуда входного сигнала, то в таблицах по одной строчке и последние две колонки не нужны!

6. Обработка результатов измерений.

6.1. Нанесем результаты измерений на график $C_p(S_d)$. (Графики $C_p(S_d)$ строятся в одних числовых осях.)

6.2. Теоретически зависимость $C_p(S_d)$ представляется линейной функцией $C_p(S_d) = kS_d + C_0$. Применяя метод наименьших квадратов, получим следующее.

Фторопласт:

$$C_0 = \dots; k = \dots; \sigma_{C_0} = \dots; \sigma_k = \dots; R_{xy} = \dots, P = 0,95.$$

Текстолит:

$$C_0 = \dots; k = \dots; \sigma_{C_0} = \dots; \sigma_k = \dots; R_{xy} = \dots, P = 0,95.$$

Стеклотекстолит:

$$C_0 = \dots; k = \dots; \sigma_{C_0} = \dots; \sigma_k = \dots; R_{xy} = \dots, P = 0,95.$$

6.3. Определение диэлектрической проницаемости.

Фторопласт $\epsilon_f =$

Стеклотекстолит $\epsilon_c =$

Текстолит $\epsilon_T =$

7. Оценка погрешностей.

Случайная погрешность определения емкости

$$\sigma_C = \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_{c0}^2} .$$

Систематическая погрешность определения емкости

$$\theta_C = \langle C \rangle \gamma_k , \quad \gamma_k = \sqrt{\left(\frac{\Theta_{U_{\text{ВЫХ}}}}{U_{\text{ВЫХ}}} \right)^2 + \left(\frac{\Theta_{U_{\text{ВХ}}}}{U_{\text{ВХ}}} \right)^2} .$$

$$\theta_{U_{\text{ВЫХ}}} = \sqrt{\theta_{\text{ОСН,ВЫХ}}^2 + \theta_{\text{ОТС,ВЫХ}}^2} , \quad \theta_{U_{\text{ВХ}}} = \sqrt{\theta_{\text{ОСН,ВХ}}^2 + \theta_{\text{ОТС,ВХ}}^2} .$$

Полная погрешность:

$$\Delta \varepsilon_\phi = \sqrt{\sigma_c^2 + \theta_c^2} \frac{d}{\varepsilon_0 S} .$$

8. Запись окончательного результата.

Фторопласт: $\varepsilon_\phi = \langle \varepsilon_\phi \rangle \pm \Delta \varepsilon_\phi .$

Стеклотекстолит: $\varepsilon_c = \langle \varepsilon_c \rangle \pm \Delta \varepsilon_c .$

Текстолит: $\varepsilon_T = \langle \varepsilon_T \rangle \pm \Delta \varepsilon_T .$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Метод наименьших квадратов

Метод применяется, если известно, что теоретическая зависимость параметров $Y(X)$ линейная, то есть имеет вид $Y=kX+b$. Обозначим наиболее вероятные значения k и b как k_o, b_o , тогда

$$k_o = \frac{\langle XY \rangle - \langle X \rangle \langle Y \rangle}{\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2}, \quad b_o = \langle Y \rangle - k_o \langle X \rangle .$$

Стандартные отклонения для величин k и b определяются следующим образом:

$$S_k = \frac{S_{\min}}{\sqrt{n(\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2)}}, \quad S_b = S_{\min} \sqrt{\frac{1}{n} \left(n + 1 + \frac{\langle X \rangle^2}{\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2} \right)},$$

где $S_{\min}^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (Y_i - k_o X_i - b_o)^2$.

Случайные погрешности

$$\varepsilon_k = t_{n-1;0,95} \cdot S_k ; \quad \varepsilon_b = t_{n-1;0,95} \cdot S_b$$

и окончательно

$$k = k_o \pm \varepsilon_k , \quad b = b_o \pm \varepsilon_b .$$

Коэффициент корреляции

$$R_{XY} = \frac{\langle XY \rangle - \langle X \rangle \langle Y \rangle}{\sqrt{\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2} \sqrt{\langle Y^2 \rangle - \langle Y \rangle^2}}$$

Учебное издание

**ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ**

Составители:
Аминев Александр Валерьевич,
Кириллов Олег Евгеньевич

Редактор *И. В. Коршунова*

Компьютерный набор *авторский*

Подписано в печать 22.04.2011. Формат 60x84 1/16.
Бумага писчая. Плоская печать. Усл. печ. л. 0,93.
Уч.-изд. л. 0,8. Тираж 50 экз. Заказ

Редакционно-издательский отдел УрФУ
620002, Екатеринбург, Мира, 19
rio@mail.ustu.ru

Ризография НИЧ УрФУ
620002, Екатеринбург, Мира, 19

