

Диэлектрическая постоянная различных материалов



Физика

Электричество и магнетизм

Простые электрические схемы, резисторы и конденсаторы

Прикладные науки

Инженерные специальности

Материаловедение

Тепловые и электрические свойства

Прикладные науки

Инженерные специальности

Электротехника

Характеристики электрических устройств

Прикладные науки

Инженерные специальности

Возобновляемые источники энергии

Основные принципы



Уровень сложности

тяжелый



Кол-во учеников

-



Время подготовки

10 Минут



Время выполнения

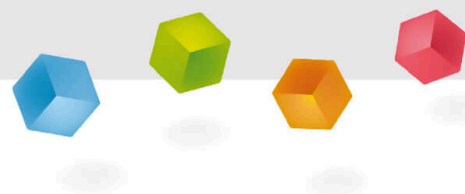
20 Минут

This content can also be found online at:


<http://localhost:1337/c/616d27f8aeb0ac0003430aaf>

PHYWE

Общая информация



Описание

PHYWE



Рис.1: Экспериментальная установка

Знание диэлектрической проницаемости различных материалов очень важно для понимания поведения электрических полей в веществе, которое имеет множество приложений везде, где используются электрические поля.

Дополнительная информация (1/2)

PHYWE

Предварительные

знания



Принцип



Предварительные знания, необходимые для этого эксперимента, можно найти в разделе "Теория".

Электрическая постоянная ϵ_0 определяется при измерении заряда на плоском конденсаторе, на который подается напряжение. Аналогично при заполнении пространства между пластинами пластиком или стеклом определяется диэлектрическая проницаемость ϵ_0 вещества.

Дополнительная информация (2/2)

PHYWE



Обучение

цель



Задачи

Цель этого эксперимента - определить диэлектрическую проницаемость различных материалов.

1. Определите зависимость между зарядом Q и напряжением U на плоском конденсаторе.
2. Определите величину электрической постоянной ϵ_0 из соотношения, полученного в пункте 1.
3. Измерьте заряд плоского конденсатора при постоянном напряжении в зависимости от величины, обратной расстоянию между пластинами.
4. Определите зависимость между зарядом Q и напряжением U на плоском конденсаторе, между пластинами которого введены различные твердые диэлектрики.

Теория (1/12)

PHYWE

Электростатические процессы в вакууме (и с хорошей степенью приближения в воздухе) описываются следующей интегральной формой уравнений Максвелла:

$$\iint \vec{E} d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\iint \vec{E} d\vec{S} = 0 \quad (2)$$

где $\vec{E}$ - напряженность электрического поля, Q – заряд, заключенный в замкнутой поверхности A , ϵ_0 = электрическая постоянная и S – замкнутый контур.

Если между двумя пластинами конденсатора приложить напряжение U , то между ними возникнет электрическое поле $\vec{E}$, которое определяется следующим образом:

$$U_c = \int_1^2 \vec{E} d\vec{r}$$

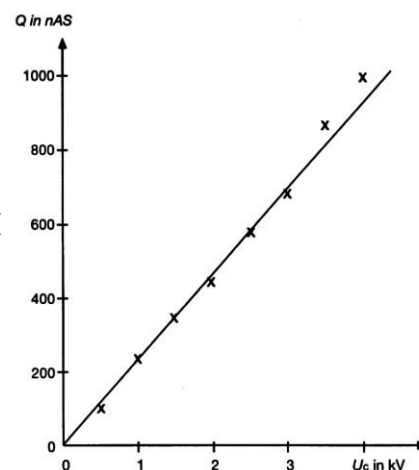
Теория (2/12)

PHYWE

Под действием электрического поля электростатические заряды противоположного знака притягиваются к поверхностям конденсатора. Поскольку источники напряжения не генерируют заряды, а могут только разделять их, абсолютные значения противоположных зарядов электростатической индукции должны быть одинаковыми. Предполагая, что силовые линии электрического поля всегда перпендикулярны поверхностям A конденсатора, в силу симметрии, которая может быть экспериментально проверена для малых расстояний d между пластинами конденсатора, из уравнения (1) получаем:

$$C = \epsilon \cdot C_{\text{vac}} \quad (3)$$

Рис. 2: График зависимости заряда Q плоского конденсатора от приложенного напряжения U_c ($d = 0,2$ см).



Теория (3/12)

PHYWE

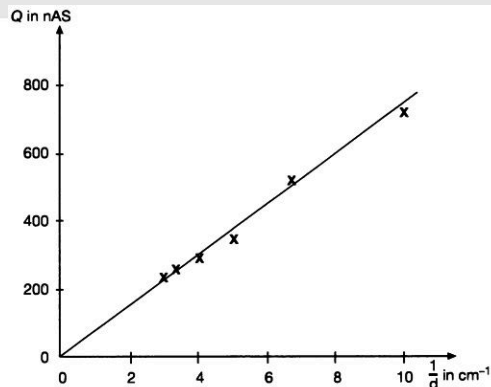


Рис. 3: График зависимости заряда Q плоского конденсатора от величины обратной расстоянию между пластинами конденсатора $1/d$ ($U_c = 1,5$ кВ).

За объем интегрирования, указанный на рис. 7, был взят объем, включающий только одну пластину конденсатора. Поскольку поверхность внутри конденсатора может перемещаться без изменения магнитного потока, поле конденсатора является однородным. Как поток, так и электрическое поле $\vec{E}$ вне конденсатора равны нулю, поскольку для произвольных объемов, которые охватывают обе пластины конденсатора, общий заключенный заряд равен нулю.

Таким образом, заряд Q конденсатора пропорционален напряжению; константа пропорциональности C называется емкостью конденсатора.

$$Q = CU_c = \varepsilon_0 \frac{A}{d} \cdot U_c \quad (4)$$

Теория (4/12)

PHYWE

Линейная зависимость между зарядом Q и напряжением U , приложенным к неизменному в остальном конденсатору, представлена на рис. 2. Уравнение (4) также показывает, что емкость C конденсатора обратно пропорциональна расстоянию d между пластинами:

$$Q = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \frac{A}{d} \cdot U_c \quad (5)$$

При постоянном напряжении величина обратная расстоянию между пластинами и, следовательно, емкость являются мерой величины заряда, который может выдержать конденсатор (см. рис. 5). Измеренные величины U , Q , d и A позволяют вычислить электрическую постоянную ε_0 :

$$\varepsilon_0 = \frac{d}{A} \cdot \frac{Q}{U_c} \quad (6)$$

В этом эксперименте можно получить следующее значение для электрической постоянной $\varepsilon_0 = 8.8 \cdot 10^{-12}$ Кл/(Вм), по сравнению с табличным значением $\varepsilon_0 = 8.85420 \cdot 10^{-12}$ Кл/(Вм)

Теория (5/12)

PHYWE

Уравнения (4), (5) и (6) справедливы только приблизительно из-за предположения, что силовые линии поля параллельны. На очень больших расстояниях приближение однородного поля больше не работает в достаточной степени, что, в свою очередь, систематически приводит к слишком большой погрешности при определении электрической постоянной из уравнения (6). Именно поэтому значение электрической постоянной следует определять для небольшого и постоянного расстояния между пластинами (см. Рис. 2).

Ситуация меняется, когда между пластинами помещается изолирующий материал (диэлектрик). У диэлектриков нет свободно движущихся носителей заряда, как у металлов, но у них есть положительные ядра и отрицательные электроны.

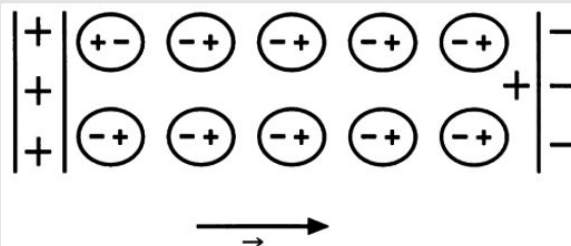


Рис. 4: Образование свободных зарядов в диэлектрике за счет поляризации молекул в электрическом поле плоского конденсатора.

Теория (6/12)

PHYWE

Они могут быть расположены вдоль линий электрического поля. Таким образом, ранее неполярные молекулы ведут себя как локально стационарные диполи. Как видно на рис. 4, эффекты одиночных диполей макроскопически компенсируют друг друга внутри диэлектрика. Однако на поверхностях нет носителей с противоположными зарядами; таким образом, они имеют постоянный заряд, называемый свободным зарядом.

Свободные заряды, в свою очередь, ослабляют электрическое поле $\vec{E}$ существующих зарядов Q , находящихся на пластинах конденсатора, внутри диэлектрика.

Ослабление электрического поля $\vec{E}$ в диэлектрике выражается безразмерной величиной - удельной диэлектрической проницаемостью вещества ϵ ($\epsilon = 1$ в вакууме):

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{\epsilon} \quad (7)$$

где $\vec{E}_0$ - электрическое поле, создаваемое только реальными зарядами Q .

Теория (7/12)

PHYWE

Таким образом, противоположное поле, создаваемое свободными зарядами, должно быть равно

$$\vec{E}_f = \vec{E}_0 - \vec{E} = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \vec{E}_0 \quad (8)$$

Если макроскопически пренебречь зарядами в объеме диэлектрика, то только заряды на свободной поверхности ($\pm Q_f$) эффективно создают противоположное поле:

$$E_f = \frac{Q_f}{A\varepsilon_0} = \frac{Q_f \cdot d}{V\varepsilon_0} = \frac{p}{V\varepsilon_0} \quad (9)$$

где p – суммарный дипольный момент поверхностных зарядов.

В общем случае неоднородного диэлектрика уравнение (9) принимает следующий вид:

Теория (8/12)

PHYWE

$$\vec{E}_f = \frac{1}{\varepsilon_0} \int \frac{d\vec{P}}{dV} = \frac{1}{\varepsilon_0} \vec{P} \quad (10)$$

где $\vec{P}$ – суммарный дипольный момент в единице объема – называется диэлектрической поляризацией.

Если дополнительно $\vec{D}$ определяется поле (диэлектрическое смещение):

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (11)$$

силовые линии поля которого начинаются или заканчиваются только на реальных (непосредственно измеряемых) зарядах, три электрические величины, напряженность поля $\vec{E}$, диэлектрическое смещение $\vec{D}$ и диэлектрическая поляризация $\vec{P}$ связаны между собой следующим уравнением:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \vec{E}$$

Теория (9/12)

PHYWE

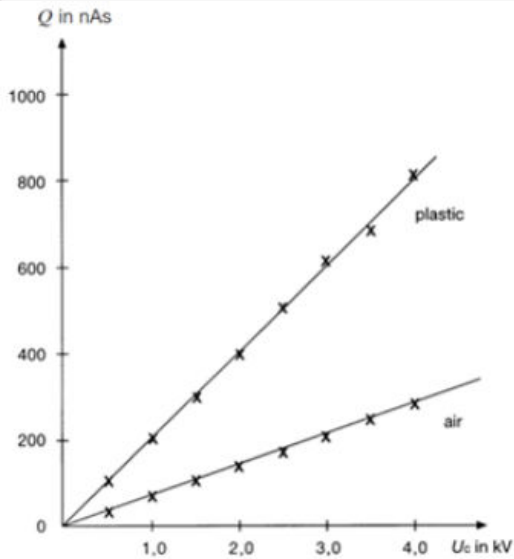


Рисунок 5: Электростатический заряд Q плоского конденсатора в зависимости от приложенного напряжения U_c , с диэлектриком (пластиком) между пластинами и без него ($d = 0,98$ см).

Теория (10/12)

PHYWE

Если на конденсаторе остается реальный заряд Q , а между пластинами помещается диэлектрик, то, согласно определению (3), напряжение U_c между пластинами уменьшается по сравнению с напряжением U_{vac} в вакууме (или, в хорошем приближении, в воздухе) на диэлектрическую проницаемость:

$$U_c = \frac{U_{vac}}{\varepsilon} \quad (12)$$

Аналогично, из определения емкости (4) можно получить:

$$C = \varepsilon \cdot C_{vac} \quad (13)$$

Общая форма уравнения (4) выглядит следующим образом:

$$Q = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \cdot U_c \quad (14)$$

Теория (11/12)

PHYWE

На рис. 5 показан график зависимости заряда Q на конденсаторе от приложенного напряжения U_c на пластине для сравнения с ситуацией с пластиком между пластинами конденсатора и без него, все остальные условия остаются неизменными: таким образом, для того же напряжения величина на конденсаторе конденсатора значительно увеличивается за счет диэлектрика, в этом эксперименте в 2,9 раза.

Если заряды, полученные с диэлектриком и без него (уравнения [4] и [14]), разделить друг на друга:

$$\frac{Q_{\text{plastic}}}{Q_{\text{vacuum}}} = \varepsilon \quad (15)$$

то полученное числовое значение является диэлектрической проницаемостью пластика.

Теория (12/12)

PHYWE

Для стеклянных пластин значение $\varepsilon = 9,1$ получается аналогичным образом.

Для того чтобы учесть описанное выше влияние свободных зарядов, уравнение Максвелла (1) обычно дополняется диэлектрической проницаемостью ε диэлектрика, заполняющего соответствующий объем:

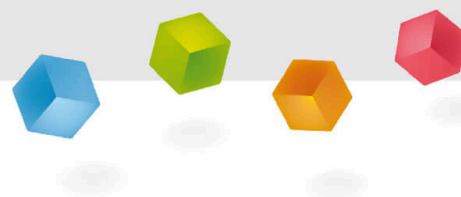
$$\iint_A \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \vec{E} d\vec{A} = \iint \vec{D} d\vec{A} = Q \quad (16)$$

Таким образом, уравнение (14) преобразуется в уравнение (4).

Оборудование

Позиция	Материал	Пункт No.	Количество
1	PHYWE Источник питания, высоковольтный пост. ток: 0... ± 10 кВ, 2 мА	13673-93	1
2	PHYWE Универсальный измерительный усилитель	13626-93	1
3	Плоский конденсатор, d=260 мм	06220-00	1
4	Пластиковая пластина (диэлектрик), 283 x 283 мм	06235-00	1
5	Стеклянная пластина (диэлектрик), 300 x 300 мм	06233-03	1
6	Цифровой мультиметр, 3 1/2 разрядный дисплей с NiCr-Ni термопарой	07122-00	1
7	Соединительный проводник, 30 кВ, 500 мм	07366-00	1
8	Соединительный проводник, 100 мм, желто-зеленый	07359-16	1
9	Соединительный проводник, 500 мм, красный	07361-01	1
10	Соединительный проводник, 500 мм, синий	07361-04	1
11	Соединительный проводник, 1000 мм, желтый	07363-02	1
12	Резистор, с 4 мм разъемом и гнездом, 10 МОм	07160-00	1
13	Конденсатор, 220 нФ/ 250 В, G1	39105-19	1
14	Кабель с защитным покрытием, BNC, l=750 мм	07542-11	1
15	Переходник, гнездо BNC/ 4 мм штекер	07542-20	1
16	Соединитель Т-типа, BNC / 4 мм штекер	07542-21	1
17	Переходник, штепсель BNC / 4 мм гнездо	07542-26	1

PHYWE



Подготовка и выполнение работы

Подготовка

PHYWE

Экспериментальная установка показана на рис. 1, а соответствующая электрическая схема - на рис. 6. Пластина конденсатора с высокой степенью изоляции подключается к верхнему разьему источника питания высокого напряжения через защитные резисторы 10 МОм . Средний разъем высоковольтного источника питания и противоположная пластина конденсатора заземлены через конденсатор 220 нФ . Правильное измерение начального напряжения должно быть обеспечено соответствующей регулировкой тумблера на приборе. Заряд электростатической индукции на плоском конденсаторе можно измерить по напряжению на конденсаторе 220 нФ в соответствии с уравнением (4). Измерительный усилитель настроен на высокое входное сопротивление, коэффициент усиления 1 и постоянную времени 0.

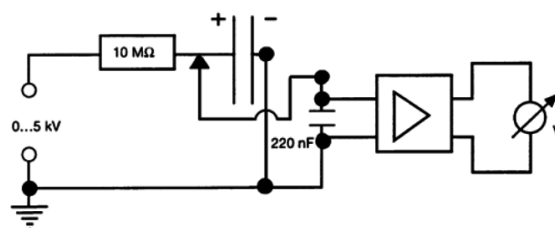


Рис. 6: Схема подключения

Выполнение работы

PHYWE

На первом этапе плоский конденсатор заряжается от высоковольтного источника питания. На втором этапе (при отключенном высоковольтном источнике питания!) измеряется заряд плоского конденсатора.

Для начала определяется площадь поверхности пластин конденсатора, измеряя их радиус. Эксперимент проводится в двух частях:

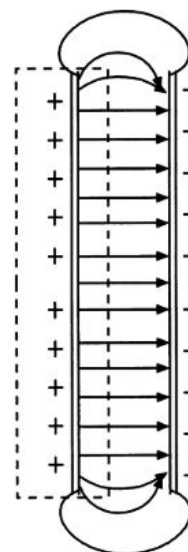
- В первой части измеряется заряд на пластинах плоского конденсатора, изменяя при постоянном напряжении расстояние между пластинами конденсатора. Затем проверяется линейная зависимость между зарядом и напряжением на плоском конденсаторе. Данные измерений позволяют определить электрическую постоянную ϵ_0 , используя уравнение (4). Убедитесь, что во время измерений Вы не находитесь рядом с конденсатором, так как в противном случае электрическое поле конденсатора может быть искажено.

Выполнение работы

PHYWE

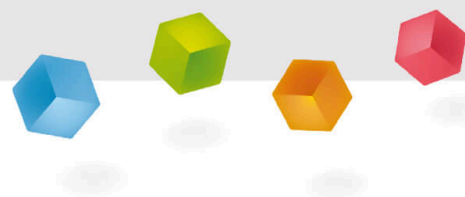
- Во второй части исследуется зависимость заряда электростатической индукции от напряжения с пластиковой пластиной и без нее (без воздушного зазора!) В пространстве между пластинами при одинаковом расстоянии между пластинами. Соотношение между зарядами электростатической индукции позволяет определить диэлектрическую проницаемость ϵ_0 пластика. Диэлектрическая проницаемость стеклянной пластины определяется аналогичным образом.

Рис. 7: Электрическое поле плоского конденсатора с небольшим расстоянием между пластинами, по сравнению с диаметром пластин. Пунктирные линии показывают объем интегрирования.



PHYWE

Оценка



Результаты (1/2)

PHYWE

Измерение электрической постоянной:

	$A = 0.0531 \text{ м}^2$			$U_c = 1.5 \text{ кВ}$		$C = 218 \text{ нФ}$
$U, \text{ В}$	3.3	2.4	1.6	1.35	1.2	1.1
$d, \text{ см}$	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
$1/d \text{ [см}^{-1}\text{]}$	10.0	6.7	5.0	4.0	3.3	2.9
$Q, \text{ нКл}$	719	523	350	294	262	240
$\varepsilon_0, \text{ пКл/Вм}$	9.00	9.85	8.75	9.25	9.85	10.50

	$A = 0.0531 \text{ м}^2$			$d = 0.2 \text{ см}$		$C = 218 \text{ нФ}$		
$U_c, \text{ кВ}$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$U, \text{ В}$	0.5	1.1	1.6	2.05	2.65	3.15	4.0	4.6
$Q, \text{ нКл}$	109	240	348	447	578	687	872	1003
$\varepsilon_0, \text{ пКл/Вм}$	8.2	9.0	8.7	8.4	8.7	8.6	9.4	9.5

Результаты (2/2)

PHYWE

Измерение диэлектрической проницаемости

Пластик: $A = 0.0531 \text{ м}^2$ $d = 0.98 \text{ см}$ $C = 218 \text{ нФ}$

U_c , кВ	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
U , В	0.5	0.92	1.35	1.8	2.3	2.8	3.1	3.7
Q , нКл	109	201	294	392	501	610	676	807
$Q \frac{d}{A\epsilon_0} \frac{1}{U_c}$	4.6	4.2	4.1	4.1	4.2	4.3	4.0	4.2
U_{vac} , В	0.16	0.32	0.51	0.62	0.78	0.95	1.12	1.3
Q_{vac} , нКл	35	70	111	135	170	207	244	283
Q/Q_{vac}	3.1	2.9	2.6	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9

Стекло

 $d = 0.17 \text{ см}$ $\bar{U} = 5.8 \text{ В}$ $Q = 1.264 \text{ мкКл}$ $U_c = 500 \text{ В}$
 $\epsilon_{glass} = 9.1$