

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ

1. Электромагнитное поле. Электрические заряды. Закон сохранения заряда.

- Электромагнитное поле является одной из форм материи и обладает массой, энергией, импульсом и т.д., как и вещество.
- Электрическое поле создается электрическими зарядами и изменяющимися магнитными полями и передает действие электрических сил.
- Магнитное поле создается движущимися электрическими зарядами и изменяющимися электрическими полями и передает действие магнитных сил.
- Электрический заряд - скалярная физическая величина, характеризующая свойство материальных объектов вступать в электромагнитное взаимодействие и определяющая интенсивность этого взаимодействия. Электрическим зарядом обладают элементарные частицы материи - электроны, протоны, позитроны и др.
- За единицу заряда в СИ принят кулон (Кл).
- Известно два рода электрических зарядов, условно называемых положительными и отрицательными.
- Установлено, что абсолютная величина электрического заряда таких элементарных частиц, как электроны, протоны, позитроны одинакова и равна минимальному элементарному заряду: $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

- Любой другой электрический заряд является дискретным: он состоит из целого числа элементарных зарядов $q = \pm |e| N$, где N - целое (1, 2, 3 ...) положительное число.

Электрический заряд - неотъемлемое свойство заряженных элементарных частиц. Заряженная частица не может «потерять» заряд так же, как она не может «лишиться» массы.

Закон сохранения электрического заряда: если система является замкнутой, то полный электрический заряд системы (алгебраическая сумма положительных и отрицательных зарядов) сохраняется:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const}$$

2. Закон Кулона

Количественно взаимодействие неподвижных точечных зарядов определяется законом Кулона

Согласно закону Кулона, электрическая сила, с которой точечный заряд q_1 действует в вакууме на точечный заряд q_2 , пропорциональна произведению зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлена по прямой, соединяющей заряды:

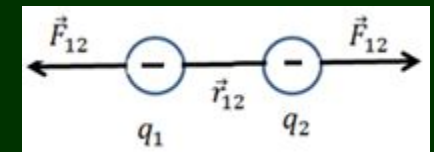
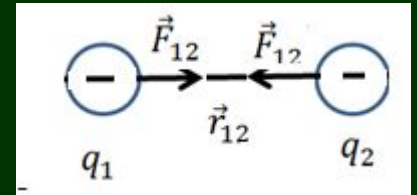
$$\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \cdot \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}}$$

где \vec{r}_{12} - радиус-вектор, проведенный от q_1 к q_2 . В СИ коэффициент пропорциональности равен: $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м электрическая постоянная. При подстановке $k = 9 \cdot 10^9$ Кл

Модуль силы F_{12}
равен:

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

где r - расстояние между зарядами.



3. Напряженность электрического поля

- Каждый заряд создает в окружающем пространстве электрическое поле (ЭП) и через него действует на другие заряды.
- Электрический заряд, которым создается ЭП, называется точечным зарядом q .
- Электрический заряд, с помощью которого обнаруживается и исследуется электрическое поле, называется *пробным зарядом*. Это точечный положительный заряд. Обозначим пробный заряд символом q_0 .
- Силовой характеристикой ЭП является напряженность электрического поля.
- *Напряженность электрического поля - векторная физическая величина, характеризующая силовое действие поля на находящиеся в нем электрические заряды и равная силе, с которой поле действовало бы на единичный пробный положительный заряд, помещенный в эту точку:*

- $$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

Сила, с которой точечный заряд q действует на пробный заряд q_0 , - сила Кулона.

$$\vec{F}_{12} = k \frac{qq_0}{r_{12}^3} \vec{r}_{12}.$$

Подставим в формулу для напряженности:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0 r^3 q_0} \vec{r}$$

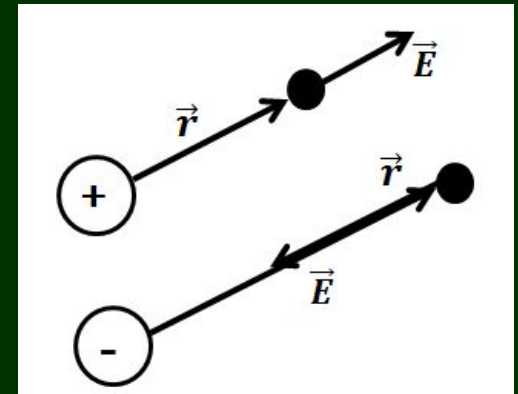
Модуль вектора напряженности поля точечного заряда равен

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Единицы измерения напряженности [В/м или Н/Кл]

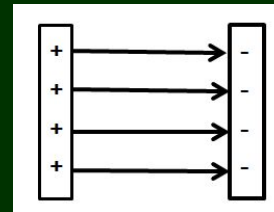
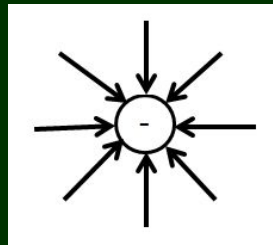
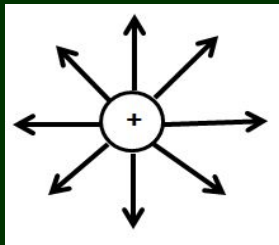
Принцип суперпозиции: результирующая напряженности ЭП равна векторной сумме напряженностей, созданных каждым зарядом в отдельности.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$$



Графически электростатическое поле изображают с помощью линий напряженности — линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора \vec{E}

- 1) Линии \vec{E} всегда разомкнуты: они начинаются на положительных зарядах и обрываются на отрицательных. Линии могут также уходить в бесконечность или приходить из бесконечности
- 2) Линии \vec{E} нигде не пересекаются
- 3) Линии \vec{E} однородного поля параллельны друг другу и проходят с одинаковой плотностью; линии неоднородного поля непараллельны



4. Потенциал электростатического поля

Пусть точечный положительный заряд q перемещается на расстояние dl в электрическом поле. На заряд действует поле с силой F , составляющей угол α с направлением движения. При этом совершается элементарная работа

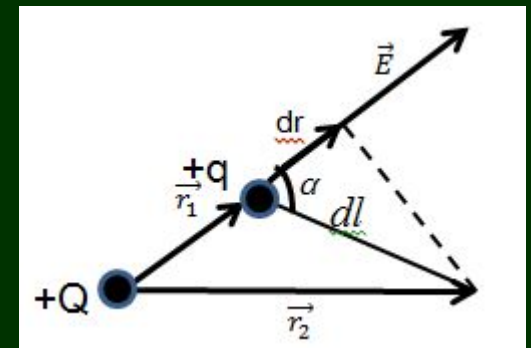
$$dA = F dl \cos \alpha$$

Но $F = q_0 E$, где E - напряженность поля. Следовательно,

$$dA = q_0 E dl \cos \alpha = q_0 E dr$$

При перемещении заряда q_0 между точками поля, находящимися от заряда Q на расстояниях r_1 и r_2 , совершается работа

$$A = q_0 \int_{r_1}^{r_2} E dl \cos \alpha = \frac{q_0 Q}{4\pi \epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{q_0 Q}{4\pi \epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$



Работа электрического поля не зависит от формы пути, по которому происходит движение заряда q , а зависит только от начального и конечного положений передвигающегося заряда, а так же от заряда, создающего поле. При движении заряда по замкнутому пути работа равна нулю. Поля, в которых работа по любому замкнутому контуру равна нулю, называют потенциальными

Отношение потенциальной энергии к пробному заряду называют потенциалом:

$$\varphi = \frac{W}{q_0}$$

Потенциал – это энергетическая характеристика электрического поля. Учитывая, что потенциальная энергия:

$$W = \frac{Qq_0}{4\pi\epsilon_0 r}$$

получим

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}$$

или

$$\varphi = \frac{kQ}{r}$$

В системе СИ потенциал измеряется в вольтах В: $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{Кл}} = \frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}^2\cdot\text{Кл}} = \text{В} \right]$

Работа электрического поля равна разности потенциальной энергии:

$$A = W_1 - W_2 = q_0(\varphi_1 - \varphi_2)$$

ил
и

$$A = -q_0\Delta\varphi$$

Эквипотенциальная поверхность – это поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал.

Эквипотенциальные поверхности имеют следующие свойства:

1. Работа при перемещении заряда между любыми точками одной и той же эквипотенциальной поверхности равна нулю:

$$A = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = 0$$

2. Вектора напряженности перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям. Действительно, т.к. работа определяется по формуле:

$$A = \vec{F} d\vec{r} = q\vec{E} d\vec{r} \cos\alpha$$

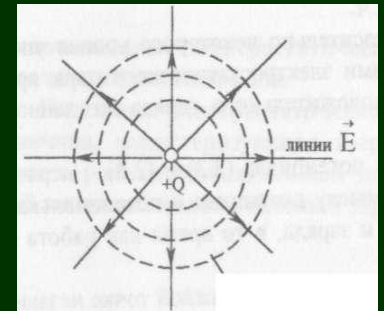
где α – угол между \vec{E} и $d\vec{r}$, т.е. угол между вектором напряженности и элементом эквипотенциальной поверхности.

Но работа при перемещении по эквипотенциальной поверхности равна нулю. Следовательно,

$$q\vec{E} d\vec{r} \cos\alpha = 0$$

Так
как

$$q \neq 0 \quad \vec{E} \neq 0 \quad d\vec{r} \neq 0 \quad \cos\alpha = 0 \quad \alpha = 90$$
$$\vec{E} \perp d\vec{r}$$



5. Связь между напряженностью и потенциалом электростатического поля

При перемещении заряда q из точки 1 в точку 2 силы поля совершают работу, которая может быть выражена:

$$dA = \vec{F} d\vec{r} = qE dx \cos \alpha = qE_x dx$$

или

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = -q d\varphi$$

Приравняв правые части и сократив на q , получим

$$qE_x dx = -q d\varphi \quad E_x = -\frac{d\varphi}{dx}$$

Производная $\frac{d\varphi}{dx}$ — характеризует быстроту изменения потенциала вдоль оси x

Так как потенциал может изменяться и вдоль осей y и z , то следует писать

частную производную

$$E_y = -\frac{d\varphi}{dy} \quad E_z = -\frac{d\varphi}{dz}$$

Для нахождения вектора по его проекциям необходимо каждую проекцию умножить на единичный вектор соответствующей оси и затем сложить полученные векторы:

$$E = E_x \vec{i} + E_y \vec{j} + E_z \vec{k}$$

ил
и

$$\vec{E} = - \left(\frac{d\varphi}{dx} \vec{i} + \frac{d\varphi}{dy} \vec{j} + \frac{d\varphi}{dz} \vec{k} \right)$$

Векторная величина, стоящая в правой части, называется градиентом потенциала и обозначается $grad \varphi$

Градиент потенциала - это вектор, направленный в сторону быстрого возрастания потенциала и численно равный приращению потенциала на единицу длины этого направления.

$$\vec{E} = -grad\vec{\varphi}$$

Напряженность в каждой точке электростатического поля равна по абсолютной величине и противоположна по направлению градиенту потенциала в этой же точке.

6. Поток вектора напряженности

Число линий напряженности, пронизывающих единицу площади поверхности, перпендикулярную линиям напряженности, должно быть равно модулю вектора \vec{E} . Тогда число линий напряженности, пронизывающих элементарную площадку dS , нормаль \vec{n} к которой образует угол α с вектором \vec{E} , равно

$$E dS \cos \alpha = E_n dS$$

где E_n — проекция вектора \vec{E} на нормаль \vec{n} к площадке dS .

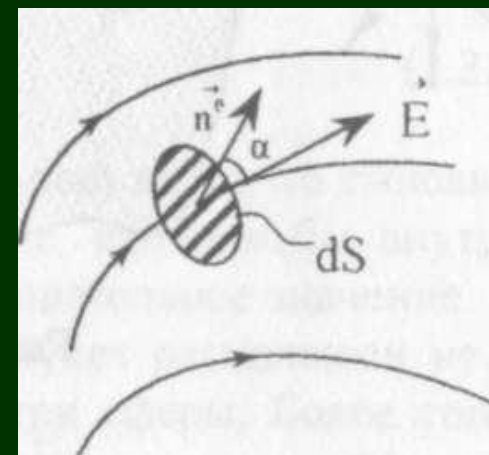
Величина $d\Phi_E = E_n dS = \vec{E} d\vec{S}$

называется потоком вектора напряженности
сквозь площадку dS .

Единица потока вектора напряженности
электростатического поля В·м.

Для произвольной замкнутой поверхности S поток
вектора \vec{E} через эту поверхность равен интегралу по
замкнутой поверхности

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = \oint_S \vec{E} d\vec{S}$$



7. Теорема Остроградского-Гаусса

Определим поток вектора напряженности через замкнутую сферическую поверхность, в центре которой находится положительный точечный заряд Q .

Силовые линии из точечного положительного заряда исходят радиально, т.е. направлены перпендикулярно к поверхности сферы
Силовые линии из точечного положительного заряда исходят радиально, т.е. направлены перпендикулярно к поверхности сферы

Напряженность поля в любой точке по поверхности сферы радиуса r одинакова и равна

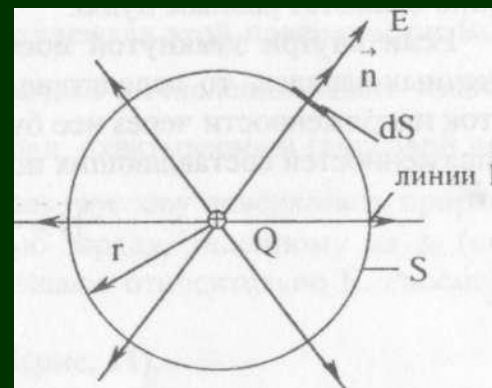
$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Поток напряженности

$$\Phi_E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \oint_S dS$$

Но поверхность сферы $\oint_S dS = 4\pi r^2$,

$$\Phi_E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{Q}{\epsilon_0}$$



➤ Поток напряженности электрического поля через любую замкнутую поверхность, окружающую точечный заряд Q , всегда равен $\frac{Q}{\varepsilon_0}$.

➤ Если внутри замкнутой поверхности будут расположены несколько точечных зарядов, то вследствие наложения электрических полей общий поток напряженности через нее будет равен алгебраической сумме потоков напряженностей составляющих полей:

$$\Phi_E = \frac{Q_1}{\varepsilon_0} + \frac{Q_2}{\varepsilon_0} + \dots + \frac{Q_n}{\varepsilon_0}$$

т.е.
$$\Phi_E = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum Q$$

где $\sum Q$ - алгебраическая сумма зарядов, охватываемых этой замкнутой поверхностью.

□ **Теорема Остроградского-Гаусса:** *поток вектора напряженности электростатического поля в вакууме сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности зарядов, деленной на электрическую постоянную.*

8. Применение теоремы Остроградского-Гаусса

Если заряд Q протяженный, его разбивают на элементарные порции dQ , которые можно считать точечными.

Заряд, распределенный по объему, поверхности и линии, называют объемным, поверхностным, линейным.

➤ **Поверхностная плотность заряда σ** - это заряд, приходящийся на единицу поверхности

$$\sigma = \frac{dQ}{dS}$$

□ **линейная плотность заряда** – это заряд, приходящийся на единицу длины:

$$\tau = \frac{dQ}{dl}$$

□ **объемная плотность заряда** – это заряд, приходящийся на единицу объема:

$$\rho = \frac{dQ}{dV}$$

8.1 Напряженность электрического поля равномерно заряженной сферы

Пусть общий заряд сферы радиуса R равен Q . Поскольку она заряжена равномерно, то поле, окружающее ее, обладает сферической симметрией: его напряженность будет иметь в каждой точке направление радиус-вектора.

Определим напряженность в некоторой точке A , расположенной на расстоянии r от центра сферы. Проведем мысленно через эту точку сферическую поверхность (радиуса r). Поток напряженности через эту поверхность

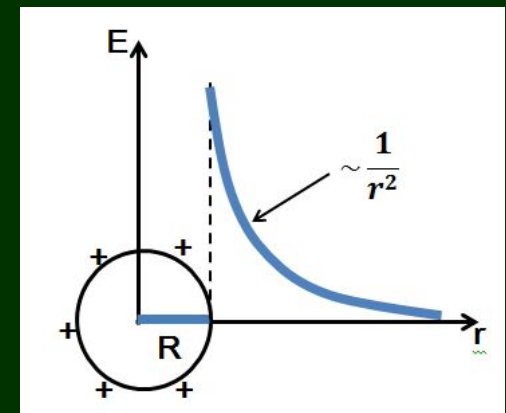
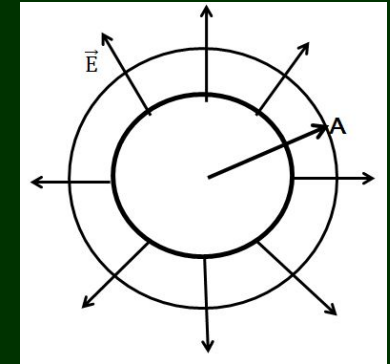
$$\Phi_E = E \cdot S = E \cdot 4 \pi r^2$$

По теореме Остроградского-Гаусса поток напряженности равен:

$$\Phi_E = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad \text{Следовательно}$$

или
$$E = \frac{Q}{4 \pi r^2 \epsilon_0}$$

В точках, для которых расстояние меньше R , электрическое поле отсутствует, т.е. напряженность равна нулю, т.к. внутри сферы нет зарядов.



8.2 Напряженность поля объемно заряженного шара

Пусть шар радиуса R с общим зарядом Q заряжен равномерно с объемной плотностью ρ

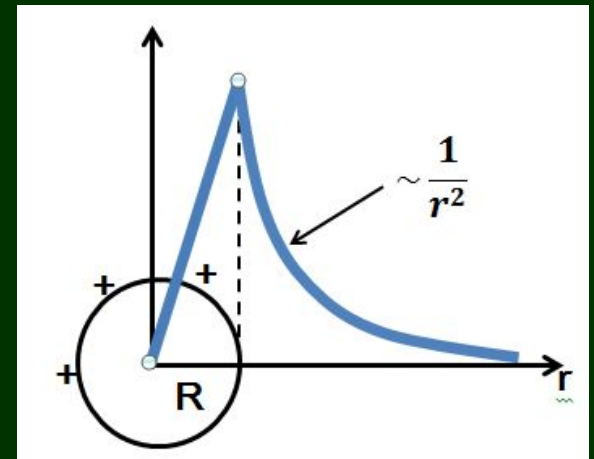
Для напряженности поля вне шара получится тот же результат, что и для равномерно заряженной сферы. Внутри же шара напряженность поля будет другая.

Напряженность поля вне равномерно заряженного шара описывается формулой

$$E = \frac{Q}{4 \pi r^2 \epsilon_0}$$

Напряженность внутри заряженного шара изменяется линейно с расстоянием r согласно выражению

$$E = \frac{Qr}{4\pi\epsilon_0 R^3}$$



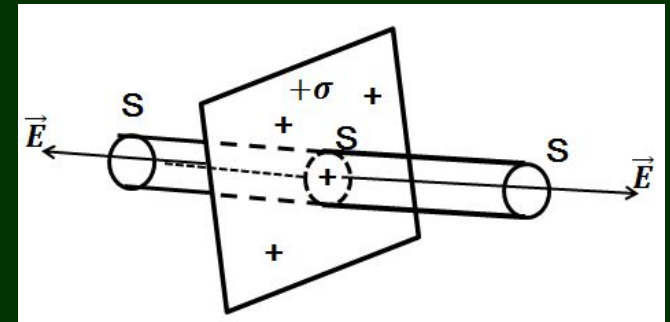
8.3 Напряженность поля равномерно заряженной бесконечной плоскости

Предположим, что имеется бесконечная плоскость, заряженная с постоянной поверхностной плотностью $+\sigma$.

Линии напряженности перпендикулярны рассматриваемой плоскости и направлены от нее в обе стороны. В качестве замкнутой поверхности мысленно построим цилиндр, основания которого параллельны заряженной плоскости.

Поток вектора напряженности сквозь боковую поверхность цилиндра равен нулю, а полный поток сквозь цилиндр равен сумме потоков сквозь его основания

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$



Напряженность поля на любых расстояниях одинакова по модулю, иными словами, поле однородно

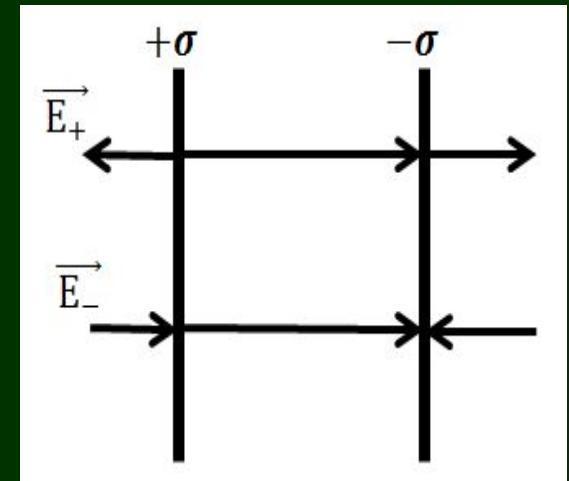
8.4 Напряженность поля двух параллельных, бесконечных, разноименно заряженных плоскостей

Пусть плоскости заряжены равномерно разноименными зарядами с поверхностными плотностями $-\sigma$ и $+\sigma$.

Поле таких плоскостей найдем как суперпозицию полей, создаваемых каждой из плоскостей в отдельности.

На рисунке верхние стрелки соответствуют полю от положительно заряженной плоскости, нижние — от отрицательной плоскости.

Слева и справа от плоскостей поля вычитаются (линии напряженности направлены навстречу друг другу), поэтому здесь напряженность поля $E = 0$.



В области между плоскостями $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} + \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$
Результирующая напряженность

ил
и

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

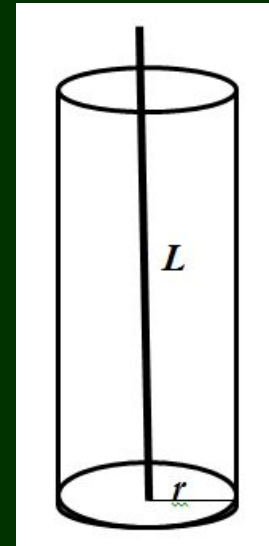
8.5 Напряженность поля вблизи равномерно заряженной нити (равномерно заряженного бесконечного цилиндра)

Пусть нить длиной L несет равномерно распределенный на ней заряд Q .

$$\frac{Q}{L} = \tau$$

Напряженность на расстоянии r от бесконечно заряженной нити равна:

$$E = \frac{\tau}{2\pi r \epsilon_0}$$



Проводники и диэлектрики в электрическом поле

В зависимости от способности проводить электрический ток все вещества делятся на проводники, диэлектрики (изоляторы) и полупроводники.

Проводники - это вещества, хорошо проводящие электрический ток. В таких веществах имеются свободные носители заряда, концентрация которых может достигать 10^{29} м^{-3} . Проводниками являются металлы, электролиты, расплавы, ионизованные газы, плазма и др.

Диэлектрики - это вещества, плохо проводящие электрический ток. При не слишком высоких температурах и при не очень сильных полях диэлектрики проводят ток в $10^{15} - 10^{20}$ раз хуже, чем проводники. Свободных носителей заряда в диэлектриках почти нет. Диэлектриками являются газы при обычных условиях, многие чистые жидкости, слюда, фарфор, мрамор и др.

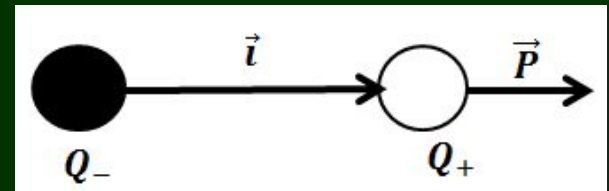
Полупроводники - это вещества, которые по своей способности проводить ток занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. К ним относятся некоторые химически чистые элементы (кремний, германий, селен и др.) и многие химические соединения.

1. Диполь. Поляризация диполя

Электрический диполь – система двух равных по модулю разноименных точечных зарядов ($+Q$, $-Q$), расстояние между которыми значительно меньше расстояния до рассматриваемых точек поля.

Вектор, направленный по оси диполя от отрицательного заряда к положительному и равный расстоянию между ними, называют плечом диполя \vec{l} . Вектор, совпадающий по направлению с плечом диполя и равный произведению заряда $|Q|$ на плечо \vec{l} , называется электрическим моментом диполя или дипольным моментом

$$\vec{P} = |Q|\vec{l}$$

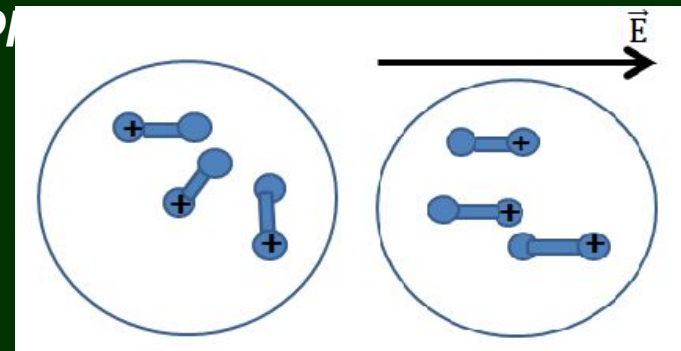


У некоторых диэлектриков (H_2O , NH_3 , SO_2 , CO и др.) молекулы имеют асимметричное строение: центры «тяжести» отрицательных и положительных зарядов у них не совпадают.

Таким образом, эти молекулы в отсутствие внешнего электрического поля обладают дипольным моментом. Их называют **полярными молекулами**.

При отсутствии внешнего поля дипольные моменты полярных молекул вследствие теплового движения ориентированы в пространстве хаотично и их суммарный момент равен нулю.

Но если такой диэлектрик поместить во внешнее электрическое поле, то силы поля будут стремиться повернуть диполи вдоль поля, в результате чего на поверхности диэлектрика появляются электрические заряды и возникает отличный от нуля результирующий дипольный момент. Это явление носит название **поляризации диэлектрика**. **Поляризацией диэлектрика называется процесс ориентации диполей или появление под воздействием электрического поля ориентированного диполя**



Другие диэлектрики (N_2 , H_2 , O_2 , CO_2 , CH_4 и др.) имеют симметричное строение молекул. У них центры «тяжести» положительных и отрицательных зарядов в отсутствие внешнего электрического поля совпадают. Их дипольный момент в силу этого равен нулю. Такие молекулы называют **неполярными**.

В электрическом поле вследствие деформации электронных оболочек атомов, образующих молекулу, происходит разделение центров положительного и отрицательного зарядов, вследствие чего молекула поляризуется и приобретает дипольный момент.

В электрическом поле оси таких молекул также ориентируются по полю тем более интенсивно, чем больше напряженность поля.

Однако отделить положительный заряд от отрицательного у диэлектрика нельзя; если разделить его на две или несколько частей, то на концах каждой части обнаружится электризация противоположного знака, которая исчезает после прекращения действия поля.

Поляризация диэлектриков ослабляет в ε раз электрическое поле в них.

*Отношение напряженности поля в вакууме к напряженности поля в однородной изотропной диэлектрической среде при неизменных зарядах, создающих внешнее поле, называется **относительной диэлектрической проницаемостью ε этой среды**:*

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}$$

Относительная диэлектрическая проницаемость ε есть величина безразмерная она количественно характеризует свойство диэлектрика поляризоваться в электрическом поле.

2. Проводники в электрическом поле

Под влиянием электрического поля свободные электроны проводника начнут перемещаться против поля. В результате одна часть поверхности проводника зарядится отрицательно, а другая, на которой окажется недостаток электронов - положительно. Это явление называется *электростатической индукцией*.

Индукцированные заряды создают внутри проводника свое собственное поле, которое, очевидно, будет направлено противоположно внешнему полю, первоначально пронизывающему проводник.

Перераспределение зарядов будет происходить до тех пор, пока внешнее поле внутри проводника не скомпенсируется собственным полем индуцированных зарядов. При этом перераспределение зарядов прекратится и поле внутри проводника станет равным нулю.

Таким образом, внутри проводника, помещенного в электрическое поле, поле отсутствует. Это означает, что все точки проводника имеют одинаковый потенциал, т.е. что проводник является *эquipотенциальным телом, а поверхность его является столь сильным, что оказывается способным ионизировать молекулы воздуха. Возникает явление, называемое стеканием зарядов.*

При сообщении уединенному проводнику заряда q его потенциал изменяется на $\Delta\varphi$. Опыт показывает, что между q и φ всегда существует прямо пропорциональная зависимость

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi}$$

Отношение $\frac{q}{\Delta\varphi}$ для данного проводника есть величина постоянная, обозначаемая буквой C и называемая *емкостью проводника* (или просто «емкостью»).

Емкость уединенного проводника зависит от его размеров и формы, но совершенно не зависит от материала проводника, массы, его агрегатного состояния и температуры.

За единицу емкости уединенного проводника в СИ принимают емкость такого проводника, потенциал которого изменяется на 1 В при сообщении ему заряда в 1 Кл. Эта единица емкости называется фарадой:

$$1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл} / 1 \text{ В}$$

3. Конденсаторы

Приборы, способные накапливать заряд, называют конденсаторами.

Чтобы емкость C проводников не зависела от окружающих тел, нужно обеспечить наличие поля только между этими проводниками. Достигается это путем придания проводникам формы либо двух близко расположенных параллельных пластин, либо двух коаксиальных цилиндров, либо двух концентрических сфер и сообщения им равных по величине и противоположных по знаку зарядов.

Системы, состоящие из двух разноименно заряженных проводников, расстояние между которыми значительно меньше их линейных размеров, называются конденсаторами.

Форма обкладок определяет название конденсатора:

- плоский,
- цилиндрический,
- сферический и т.п.)

Зарядом конденсатора называют абсолютную величину заряда одной из обкладок.

Емкостью конденсатора называется физическая величина численно равная отношению заряда конденсатора к абсолютной величине разности потенциалов между его обкладками:

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi}$$

Емкость конденсатора зависит от формы, размеров и взаимного расположения обкладок и от проницаемости ϵ диэлектрика между обкладками.

Связь между разностью потенциалов и напряженностью: $\Delta\varphi = Ed$,

напряженность ЭП двух параллельных пластин $E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}$,

поверхностная плотность заряда связана с зарядом $\sigma = \frac{q}{S}$,

тогда емкость

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} = \frac{\sigma S}{Ed} = \frac{\sigma S \epsilon \epsilon_0}{\sigma d} = \frac{S \epsilon \epsilon_0}{d}$$

$$C = \frac{S \epsilon \epsilon_0}{d}$$

4. Соединение конденсаторов

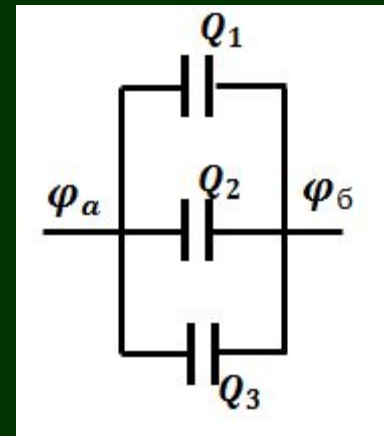
У всех параллельно соединенных конденсаторов разность потенциалов на обкладках будет одинакова и равна $\varphi_a - \varphi_b$, так как обкладки соединены проводником. Сумма одноименных зарядов на обкладках $Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = Q$

Емкость такой батареи равна

$$C = \frac{Q_1}{\varphi_a - \varphi_b} + \frac{Q_2}{\varphi_a - \varphi_b} + \dots + \frac{Q_n}{\varphi_a - \varphi_b}$$

ил
и

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

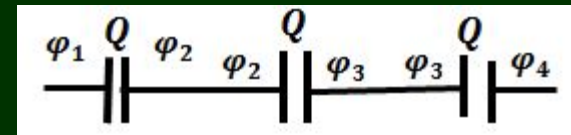


- при параллельном соединении конденсаторов емкость равна сумме емкостей конденсаторов

При последовательном соединении заряды, всех обкладок будут одинаковыми по величине и равными Q , а разность потенциалов

$$\varphi_1 - \varphi_4 = (\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_3) + (\varphi_3 - \varphi_4)$$

Емкость такой
батареи



$$\frac{1}{C} = \frac{\varphi_1 - \varphi_4}{Q} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{Q} + \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{Q} + \frac{\varphi_3 - \varphi_4}{Q}$$

Но $\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{Q} = \frac{1}{C_1}$ есть величина, обратная емкости первого конденсатора, следовательно, при последовательном соединении конденсаторов:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

5. Энергия заряженного конденсатора

$$W = \frac{Q\Delta\varphi}{2} = \frac{C\Delta\varphi^2}{2}$$

$$C = \frac{S\varepsilon\varepsilon_0}{d} \quad \Delta\varphi = Ed$$

$$W = \frac{S\varepsilon\varepsilon_0 E^2 d^2}{2d} = \frac{S\varepsilon\varepsilon_0 E^2 d}{2}$$

Учитывая, что $Sd = V$ $W = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} \cdot V$

$\frac{W}{V} = \omega$ - **плотность энергии** – энергия ЭП, заключенная в единице объема:

$$\omega = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}$$