

# Электрический ток

Все вещества состоят из атомов и молекул, имеющих положительно заряженные ядра и отрицательно заряженные электроны. Атомы и молекулы электрически нейтральны, так как заряд ядра равен суммарному заряду электронов, окружающих ядро. При наличии внешних факторов (повышение температуры, электрическое поле и т.д.) атом или молекула теряет электрон. Этот атом превращается в положительный ион, а электрон, оторвавшийся от атома, может присоединиться к другому атому, превратив его в отрицательный ион, или остаться свободным. Процесс образования ионов называют ионизацией. Количество свободных электронов или ионов в единице объема вещества называется концентрацией заряженных частиц. Таким образом, в веществе, которое поместили в электрическое поле, под действием сил поля возникает процесс **движения свободных электронов или ионов в направлении сил поля**, которое называют **электрическим током**.

# Классификация веществ по электропроводности

Свойство вещества проводить ток под действием электрического поля называется **электропроводностью** вещества, которая зависит от концентрации свободных электрически заряженных частиц. Чем больше концентрация заряженных частиц, тем больше электропроводность вещества. Все вещества в зависимости от электропроводности делятся на:

- 1. проводники;**
- 2. диэлектрики (или изоляторы);**
- 3. полупроводники.**

# Проводники

## Металлы

В **металлах** явление электрического тока связано с движением свободных электронов, которые обладают очень большой подвижностью и находятся в состоянии теплового движения. Эту **электропроводность** называют **электронной**. Проводники используются для изготовления проводов, ЛЭП, обмоток электрических машин и т.п.

## Электролиты

Водные растворы солей, кислот и т.д. называют электролитами. В растворе молекулы вещества распадаются (диссоциируют) на положительные и отрицательные ионы, которые под действием электрического поля могут перемещаться. Ионы электролита при прохождении тока осаждаются на электродах, опущенных в электролит. Процесс выделения вещества из электролитов электрическим током называется **электролизом**. Его используют для добычи цветных металлов из растворов их соединений (медь, алюминий), а также для покрытия металлов защитным слоем другого металла (например, хромирование).

# Диэлектрики (изоляторы)

Вещества с очень малой электропроводностью (газы, резиновые вещества, минеральные масла и т.п.). В этих веществах электроны очень сильно связаны с ядрами атомов и под действием электрического поля редко отделяются от ядер. Т.е. диэлектрики в нормальных условиях **не проводят электрический ток**. Это их свойство используют при производстве электрозащитных средств: диэлектрические перчатки, обувь, коврики, изолирующие подставки, накладки, колпаки, изоляторы на электрооборудовании и т.п. Диэлектрики могут быть: твердые, газообразные, жидкости.

# Полупроводники

Полупроводники при низкой температуре не проводят электрический ток и являются диэлектриками. Однако при повышении температуры в полупроводнике начинает резко увеличиваться число носителей электрического заряда, и он становится проводником. У полупроводников, таких как кремний и германий, в узлах кристаллической решётки атомы колеблются около своих положений равновесия, и уже при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  это движение становится настолько интенсивным, что химические связи между соседними атомами могут разорваться. При дальнейшем повышении температуры валентные электроны (электроны, находящиеся на внешней оболочке атома) атомов полупроводников становятся свободными, и под действием электрического поля в полупроводнике возникает электрический ток.

**Применение:** широко используются при создании транзисторов, тиристоров, полупроводниковых диодов, фоторезисторов и другой сложнейшей аппаратуры. Применение интегральных микросхем в теле-, радио- и компьютерных приборах позволяет создавать устройства небольших, а порой и ничтожно малых размеров.

# Диэлектрики в электрическом поле

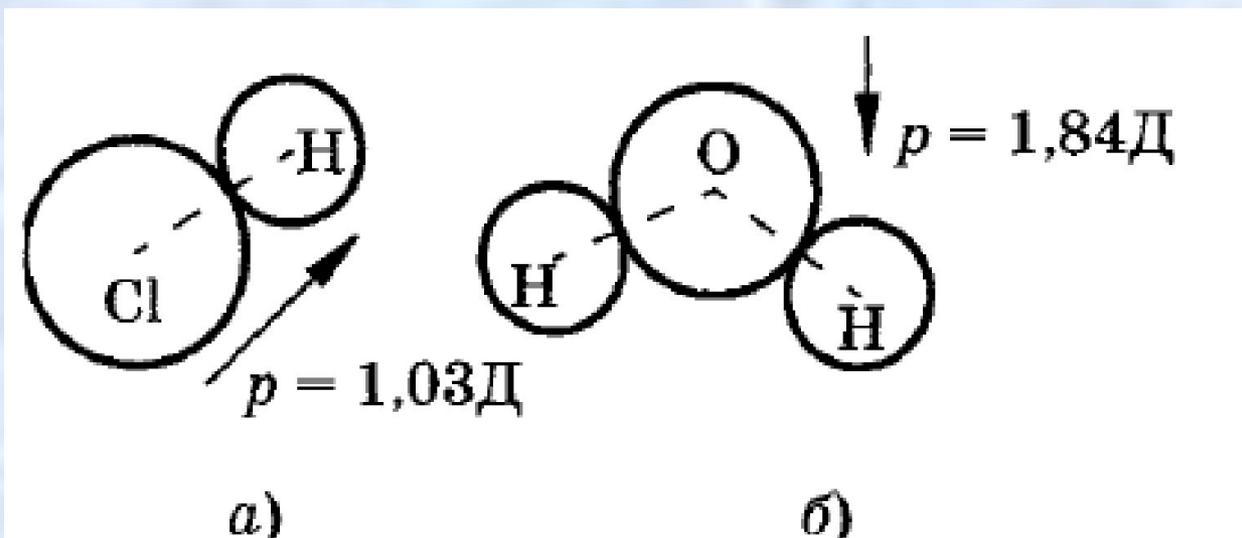
К диэлектрикам относят твердые тела, такие, как эбонит, фарфор, а также жидкости (например, чистая вода) и газы.

**При внесении в электрическое поле каких-либо диэлектриков электрическое поле изменяется.**



# Полярные диэлектрики

К **полярным** диэлектрикам принадлежат такие вещества, как вода, нитробензол и др. Молекулы этих диэлектриков не симметричны, «центры масс» их положительных и отрицательных зарядов не совпадают, поэтому такие молекулы обладают электрическим дипольным моментом даже в случае, когда электрического поля нет.



Полярные диэлектрики. HCl – слева, H<sub>2</sub>O – справа

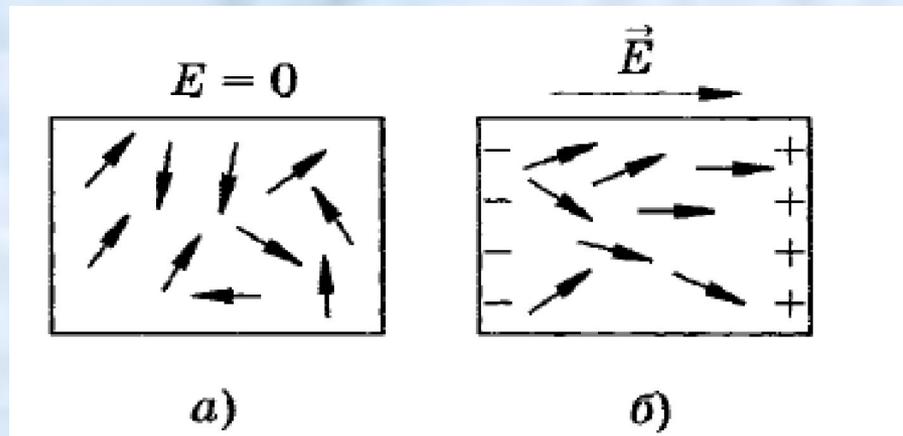
# Полярные диэлектрики

В отсутствие электрического поля дипольные моменты молекул ориентированы хаотически и векторная сумма моментов всех  $N$  молекул равна нулю:

$$\sum_{i=1}^N p_i = 0$$

Если диэлектрик поместить в электрическое поле, то дипольные моменты молекул стремятся ориентироваться вдоль поля, однако полной ориентации не будет вследствие молекулярно-теплового хаотического движения. В этом случае:

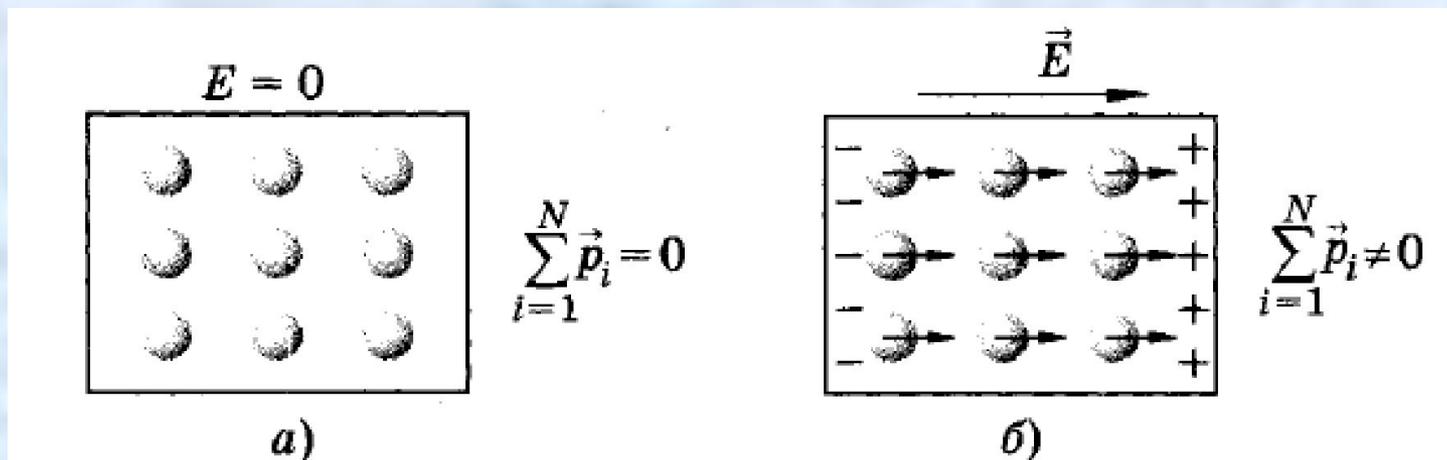
$$\sum_{i=1}^N p_i \neq 0$$



Полярный диэлектрик в отсутствие электрического поля (а) и в электрическом поле (б)

# Неполярные диэлектрики

Ко неполярным диэлектрикам относят такие вещества (например, водород, кислород и др.), молекулы которых в отсутствие электрического поля не имеют дипольных моментов. В таких молекулах заряды электронов и ядер расположены так, что «центры масс» положительных и отрицательных зарядов совпадают. Если неполярную молекулу поместить в электрическое поле, то разноименные заряды несколько сместятся в противоположные стороны и молекула будет иметь дипольный момент.



Неполярный диэлектрик в отсутствии (а) и при наличии электрического поля (б).

# Кристаллические диэлектрики

Решетка **кристаллических диэлектриков** (напр. NaCl) состоит из положительных и отрицательных ионов. Такой диэлектрик можно схематически рассматривать как совокупность двух «подрешеток», одна из которых заряжена положительно, другая — отрицательно. При отсутствии поля подрешетки расположены симметрично и суммарный электрический момент такого диэлектрика равен нулю. Если диэлектрик поместить в электрическое поле, то подрешетки немного сместятся в противоположные стороны и диэлектрик приобретет электрический момент.

# Поляризация

Процессы, происходящие в разных диэлектриках при наложении электрического поля, объединяют общим термином **поляризация**, т. е. **приобретение диэлектриком дипольного момента**.



# Поляризованность

Изменение напряженности электрического поля, в котором находится диэлектрик, будет влиять на состояние его поляризации. Охарактеризовать степень поляризации диэлектрика суммарным электрическим моментом всех его  $N$  молекул  $\left(\sum_{i=1}^N p_i\right)$  нельзя, так как эта величина зависит, в частности, от объема диэлектрика. Для оценки состояния поляризации диэлектрика вводят величину, называемую **поляризованностью**, среднее значение которой равно отношению суммарного электрического момента элемента объема  $V$  диэлектрика к этому объему:

$$P_e = \frac{\sum_{i=1}^N p_i}{V}$$

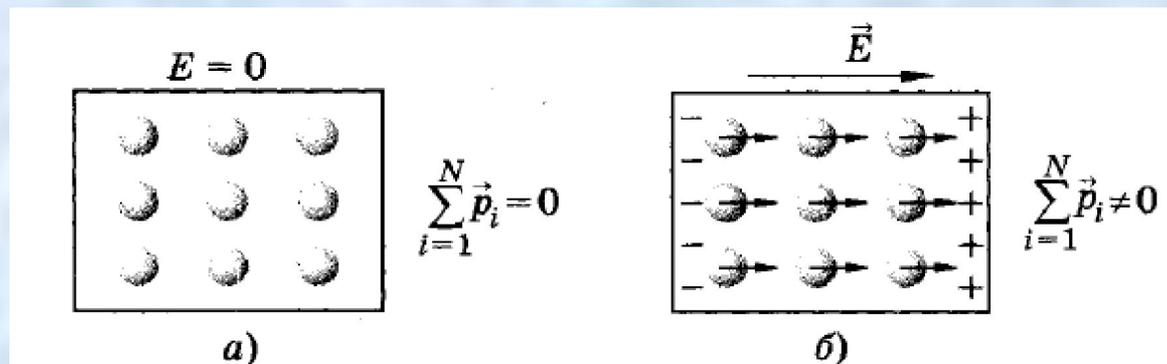
Единицей поляризованности является кулон на квадратный метр (Кл/м<sup>2</sup>).

# Плотность связанных зарядов $\sigma_{\text{св}}$

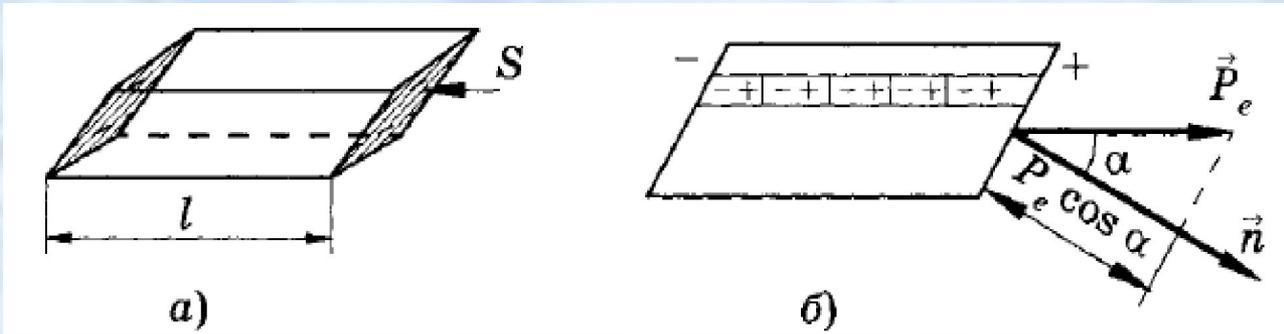
При поляризации диэлектрика на одной его поверхности (границе) создаются положительные заряды, а на другой — отрицательные. Эти электрические заряды называют связанными, так как они принадлежат молекулам диэлектрика (или кристаллической решетке при ионной поляризации) и не могут перемещаться в отрыве от молекул или быть удалены с поверхности диэлектрика в отличие от свободных зарядов, которых в идеальном диэлектрике нет.

При возрастании напряженности электрического поля растет степень упорядоченности ориентации молекул (ориентационная поляризация), увеличиваются дипольные моменты молекул (электронная поляризация), а также происходит большее смещение «подрешеток» (ионная поляризация) — все это приводит к увеличению **поверхностной плотности  $\sigma_{\text{св}}$  связанных электрических зарядов.**

Таким образом,  $\sigma_{\text{св}}$  также характеризует степень поляризации диэлектрика.



# Связь между поляризованностью $P_e$ и плотностью связанных зарядов $\sigma_{CB}$



Поляризованный диэлектрик

Если на грани параллелепипеда с площадью  $S$  возник связанный заряд  $q_{CB}$ , то суммарный электрический момент  $\left| \sum_{i=1}^N p_i \right|$

всего параллелепипеда численно равен  $q_{CB} l$ , но так как

$$q_{CB} = \sigma_{CB} S, \text{ то } \left| \sum_{i=1}^N p_i \right| = \sigma_{CB} S l$$

Объем параллелепипеда  $V = S l \cos \alpha$

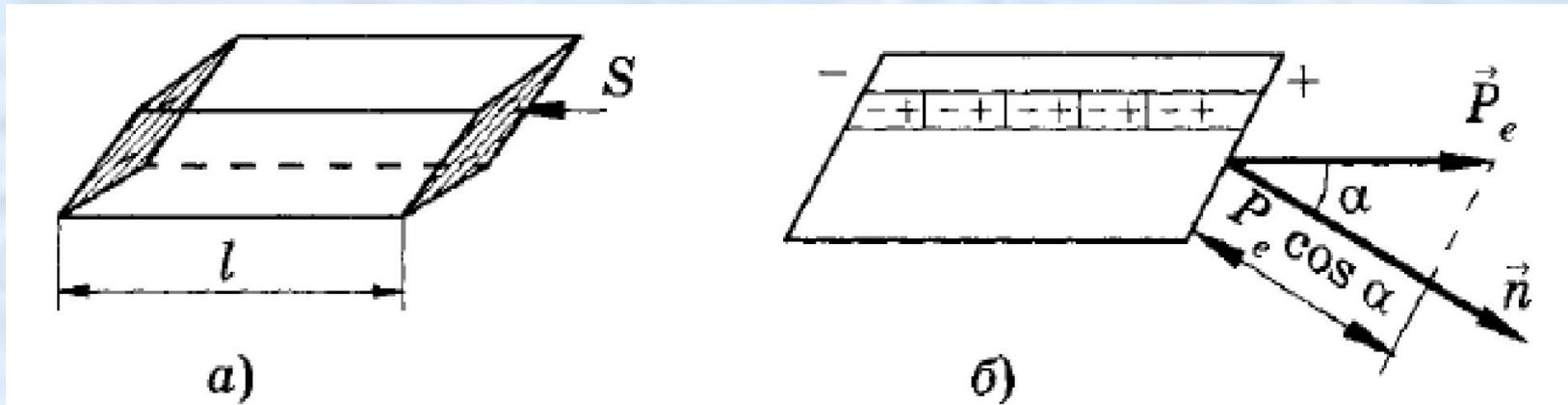
На основании двух последних равенств имеем  $\left| \sum_{i=1}^N p_i \right| = \frac{\sigma_{CB} V}{\cos \alpha}$

$$P_e = \frac{\left| \sum_{i=1}^N p_i \right|}{V} \cdot \cos \alpha \quad \text{Следовательно:}$$

$$\sigma_{CB} = P_e \cos \alpha$$

# Связь между поляризованностью $P_e$ и плотностью связанных зарядов $\sigma_{св}$

Поверхностная плотность связанных зарядов  $\sigma_{св}$  равна перпендикулярной к грани составляющей вектора  $\vec{P}_e$ :  $\sigma_{св} = P_e \cos \alpha$



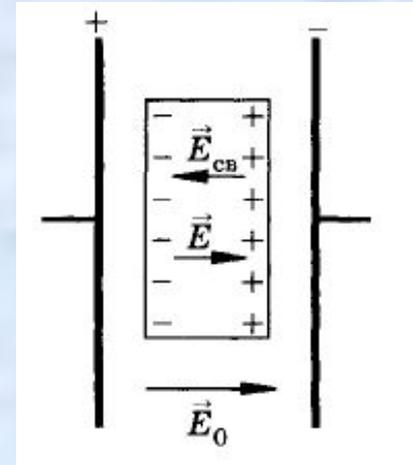
# Диэлектрическая восприимчивость

Рассмотрим плоский диэлектрик, расположенный в однородном электрическом поле.

$E_0$  напряженность поля в отсутствие диэлектрика (поле в вакууме).

Связанные заряды создают однородное поле напряженностью  $E_{CB}$ , в результате в диэлектрике будет электрическое поле напряженностью:

$$(1) E = E_0 - E_{CB}$$



Диэлектрическая проницаемость среды  $\epsilon$  равна отношению силы взаимодействия зарядов в вакууме к силе взаимодействия этих же зарядов на том же расстоянии в среде:

$$\epsilon = \frac{F_0}{F} \text{ или } F_0 = F \epsilon$$

Так как напряженность электрического поля пропорциональна силе, действующей на, то аналогичное соотношение можно записать для  $E_0$  и  $E$ :  $E_0 = E \epsilon$

Напряженность электрического поля, образованного связанными электрическими зарядами:  $E_{CB} = \frac{P_e}{\epsilon_0}$  В данном случае. Тогда  $E_{CB} = \frac{P_e}{\epsilon_0}$

Подставляя это в формулу (1), получаем:  $E = E_0 - \frac{P_e}{\epsilon_0}$

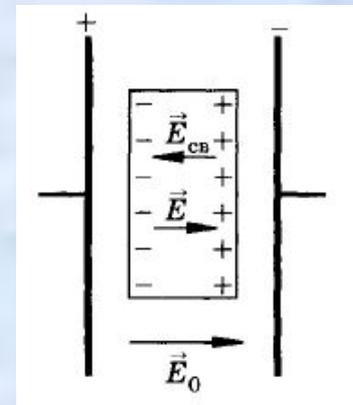
Или:  $P_e = \epsilon_0 (\epsilon - 1) E$

# Диэлектрическая восприимчивость

Таким образом:

$$P_e = \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) E$$

**Поляризованность пропорциональна напряженности электрического поля в диэлектрике.**



На основании этого выражения вводят понятие **диэлектрической восприимчивости среды**:

$$\chi = \varepsilon - 1$$

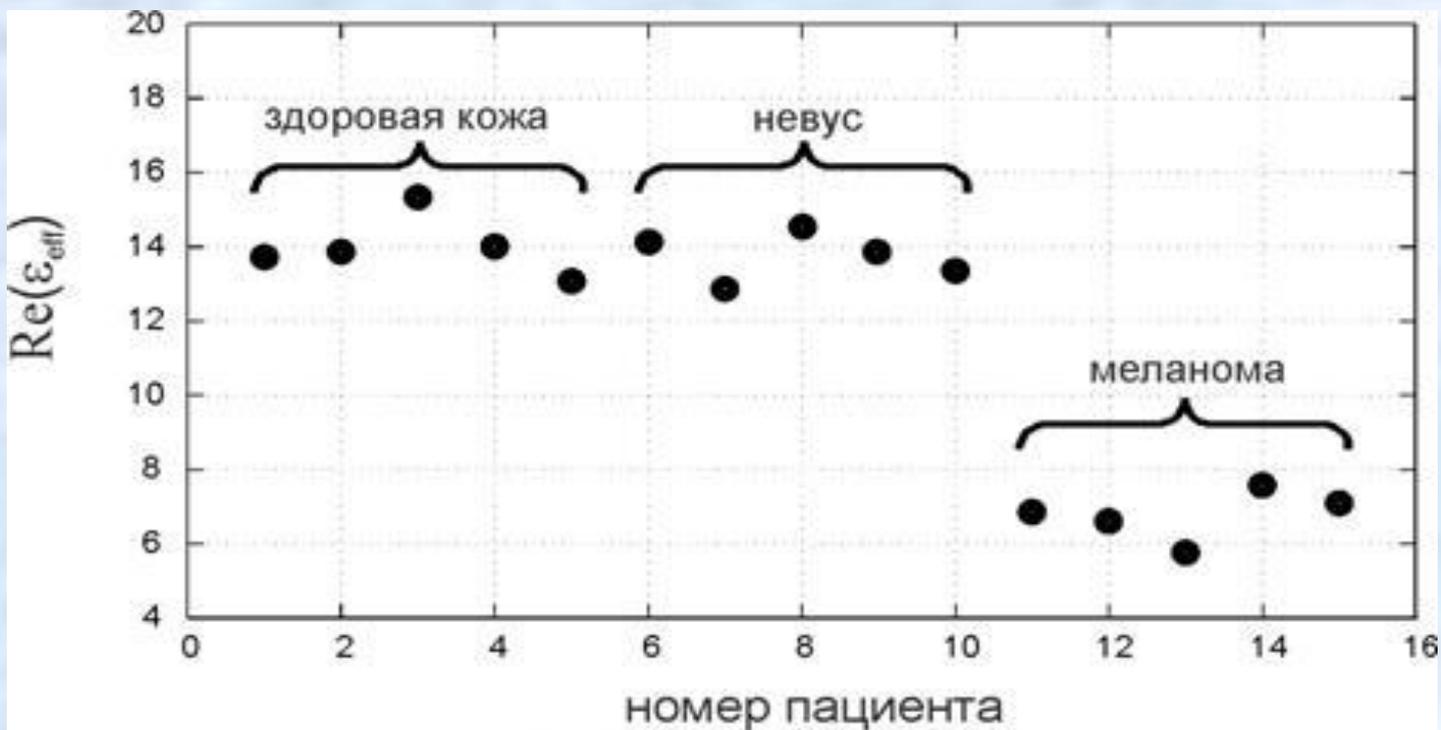
которая вместе с диэлектрической проницаемостью с характеризует способность диэлектрика к поляризации и зависит от его молекулярного строения, а возможно и от температуры. В переменных электрических полях  $\varepsilon$  и  $\chi$  изменяются также в зависимости от частоты.

	$\varepsilon$		$\varepsilon$
Керосин	2	Белок яичный	72
Масло растительное	2—4	Вода	81
Стекло	6—10	Кровь цельная	85
Крахмал	12	Серое вещество мозга	85
Молоко коровье	66	Нерв зрительный	89
		Белое вещество мозга	90

Значения диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  для различных биологических сред

# Диагностическое применение диэлектрической проницаемости

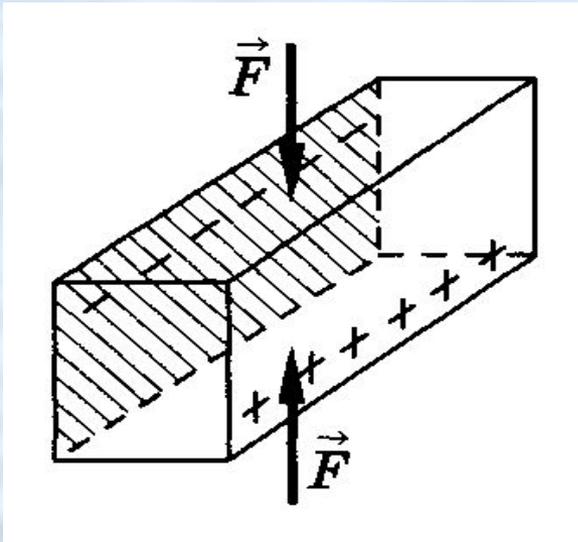
Различие диэлектрической проницаемости нормальных и патологических тканей и сред как в постоянных, так и в переменных, электрических полях можно использовать для диагностических целей.



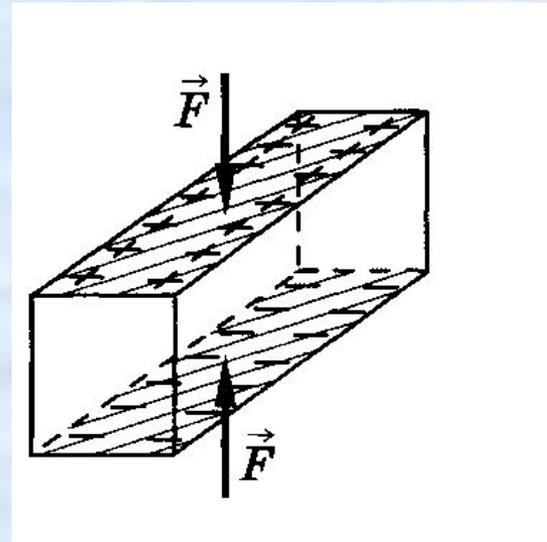
Диэлектрическая проницаемость кожи для датчика с глубиной зондирования 1.1 мм кожи в области пигментных новообразований [Янин Д.В., Галка А.Г. и др., институт прикладной физики РАН, 2014 г.].

# Пьезоэлектрический эффект

В кристаллических диэлектриках **поляризация** может возникнуть и при отсутствии электрического поля **из-за деформации**. Это явление получило название **пьезоэлектрического эффекта** (пьезоэффекта).



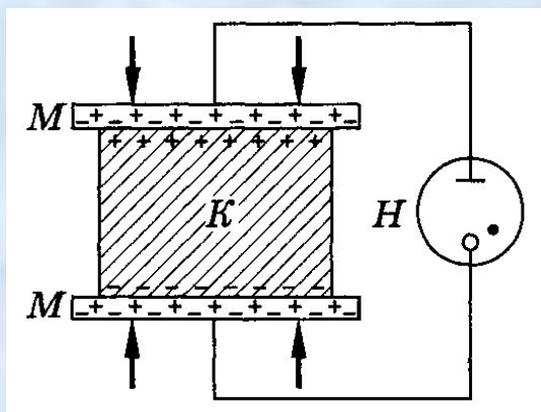
**Поперечный  
пьезоэффект**



**Продольный  
пьезоэффект**

# Пьезоэлектрический эффект

Пьезоэлектрический эффект обусловлен деформацией элементарных кристаллических ячеек и сдвигом подрешеток относительно друг друга при механических деформациях. Поляризованность при небольших механических деформациях пропорциональна их величине. Пьезоэффект возникает в кварце, сегнетовой соли и некоторых других кристаллах.



К кристаллу К, обладающему пьезоэлектрическими свойствами, приложены металлические пластины М, которые замкнуты через неоновую лампу Н. Эта лампа потребляет небольшой силы ток и загорается при определенном напряжении, т. е. является своеобразным индикатором напряжения. При ударе по кристаллу (деформации) появляется напряжение на его гранях, а значит, и на металлических пластинах, и неоновая лампа вспыхивает.

Наряду с рассмотренным прямым пьезоэлектрическим эффектом наблюдается и **обратный пьезоэффект**: при наложении электрического поля на кристаллы последние деформируются.

# Пьезоэлектрический эффект: применение

Оба пьезоэффекта — прямой и обратный — применяют в тех случаях, когда необходимо преобразовать механическую величину в электрическую или наоборот.

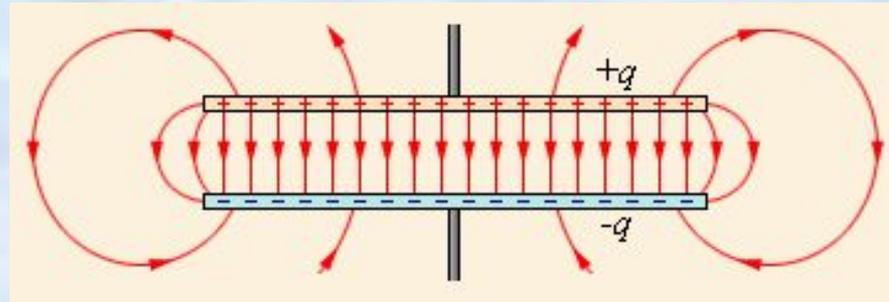
**Прямой пьезоэффект** используют в медицине — в датчиках для регистрации пульса, в технике — в адаптерах, микрофонах и для измерения вибраций, а

**Обратный пьезоэффект** — для создания механических колебаний и волн ультразвуковой частоты (УЗИ).

Существенный пьезоэффект возникает в костной ткани при наличии сдвиговых деформаций. Причина эффекта — деформация коллагена — основного белка соединительной ткани. Поэтому пьезоэлектрическими свойствами обладают также сухожилия и кожа.

# Конденсатор

В радиотехнике для создания электрических, сосредоточенных в малой области пространства, используют специальные устройства – **конденсаторы**. Конденсатор представляет собой два проводника, разделенные слоем диэлектрика, на которых размещены одинаковые по величине и противоположные по знаку заряды. Эти проводники называются пластинами конденсатора.



Поле плоского конденсатора

**Электрическая емкость:  $C = q/U$**

Единица емкости - фарад ( $\Phi = \text{Кл/В}$ ).

Плоский конденсатор состоит из двух параллельных пластин площади  $S$ , разделенных слоем диэлектрика толщины  $d$  с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Расстояние между пластинами много меньше их радиусов. Емкость такого конденсатора вычисляется по формуле:

$$C = \epsilon \epsilon_0 S/d$$

# Энергия электрического поля

**Система зарядов или заряженных тел, заряженный конденсатор обладают энергией.**

Вычислим энергию поля конденсатора. Чтобы зарядить его, будем многократно переносить положительный заряд  $dq$  с одной обкладки на другую. По мере его переноса увеличивается напряжение между обкладками конденсатора. Работа, которую необходимо совершить против сил электрического поля для зарядки конденсатора, равна энергии конденсатора:  $W_{эл} = A$ .

Элементарная работа по перемещению заряда против сил поля равна

$$dA = Udq.$$

Перенос заряда  $dq$  с одной обкладки конденсатора на другую изменяет напряжение его на  $dU$ , и тогда из формулы для емкости запишем

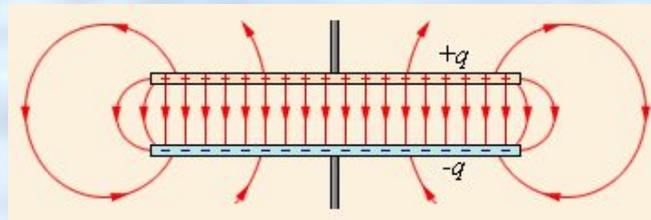
$$dq = CdU, \text{ а значит, } dA = CUdU.$$

Проинтегрировав это равенство в пределах от  $U_0 = 0$  до некоторого конечного значения  $U$ , найдем выражение для энергии поля заряженного конденсатора:

$$A = W_{эл} = CU^2/2$$

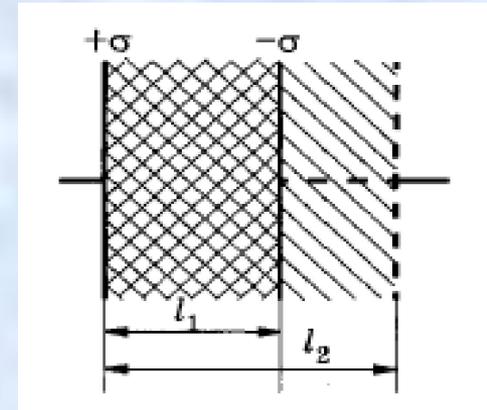
учитывая, что  $C = q/U$

$$W_{эл} = qU/2 = q^2/(2C).$$



# Энергия электрического поля

Если, не изменяя заряда на обкладках конденсатора, отключенного от источника напряжения, раздвинуть его пластины от расстояния  $l_1$  до  $l_2$ , то емкость уменьшится. Как видно из формулы, при этом энергия конденсатора с увеличением объема, занимаемого электрическим полем, возрастет, а напряженность поля останется постоянной. Отсюда ясно, что энергия заряженного конденсатора сосредоточена в объеме, занимаемом электрическим полем.



$$W_{\text{эл}} = qU/2 = q^2/(2C).$$

Выразим энергию поля через его характеристики.

Подставив выражение для емкости плоского конденсатора и напряжение:

$$W_{\text{эл}} = \varepsilon \varepsilon_0 E^2 V / 2,$$

где  $V = Sl$  — объем, занимаемый электрическим полем конденсатора.

Предполагая, что электрическое поле плоского конденсатора однородно, разделим на объем и получим объемную плотность энергии поля:

$$w_{\text{эл}} = \varepsilon \varepsilon_0 E^2 / 2.$$

# Электропроводимость электролитов

**Биологические жидкости являются электролитами**, электропроводимость которых имеет сходство с электропроводимостью металлов: в обеих средах, в отличие от газов, носители тока существуют независимо от наличия электрического поля.

В этих средах под воздействием электрического поля возникает упорядоченное (направленное) движение свободных электрических зарядов (электронов, ионов) — электрический ток. Скалярной характеристикой электрического тока является **сила тока (I)**, равная отношению заряда ( $\Delta q$ ), переносимого через сечение проводника или некоторую поверхность за интервал времени  $\Delta t$ , к этому интервалу:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \text{ или } I = \frac{dq}{dt}.$$

Если электрический ток равномерно распределен по сечению проводника, то отношение силы тока к площади сечения проводника (S) называется **плотностью тока (j)**:

$$j = \frac{I}{S}.$$

# Электропроводимость электролитов

Установим связь плотности тока с некоторыми характеристиками носителей тока. Связь между плотностью потока вещества, молярной концентрацией и скоростью направленного движения частиц для плотности потока частиц:

$$J = vn.$$

Если эту формулу умножить на заряд  $q$  носителя тока, то произведение  $qJ$  будет соответствовать заряду, проходящему через единицу площади сечения за одну секунду, т. е. будет являться плотностью тока:

$$j = qJ = qnv.$$

**Плотность тока прямо пропорциональна заряду носителя тока, концентрации носителей и скорости их направленного движения.**

# Электропроводимость электролитов

Плотность тока для электролитов следует представить в виде суммы выражений для положительных и отрицательных ионов:

$$j_+ = qn_+ v_+ \text{ и } j_- = qn_- v_- ,$$

т.е. суммарная плотность тока равна

$$j = j_+ + j_- = q(n_+ v_+ + n_- v_-).$$

Если предположить, что каждая молекула диссоциирует на два иона, то концентрация положительных и отрицательных ионов одинакова:

$$n_+ = n_- = \alpha n ,$$

где  $\alpha$  — коэффициент диссоциации,  $n$  — концентрация молекул электролита.

Направленное движение ионов в электрическом поле можно приближенно считать равномерным, при этом сила  $qE$ , действующая на ион со стороны электрического поля, уравновешивается силой трения  $rv$ :

$$qE = rv ,$$

откуда, заменяя  $q/r = b$ , получаем

$$v = bE .$$

Коэффициент пропорциональности  $b$  называют **подвижностью носителей заряда** (ионов). Он равен отношению скорости направленного движения ионов, вызванного электрическим полем, к напряженности этого поля.

# Электропроводимость электролитов

$$v = bE.$$

Для ионов разных знаков соответственно имеем:  $v_+ = b_+E$  и  $v_- = b_-E$ .

Таким образом, плотность тока:  $j = nq\alpha(b_+ + b_-)E$ .

Представим электролит в виде прямоугольного параллелепипеда с гранями-электродами площадью  $S$ , расположенными на расстоянии  $l$  (рис.).

Считая поле однородным, и учитывая, что  $E = U/l$  получаем:

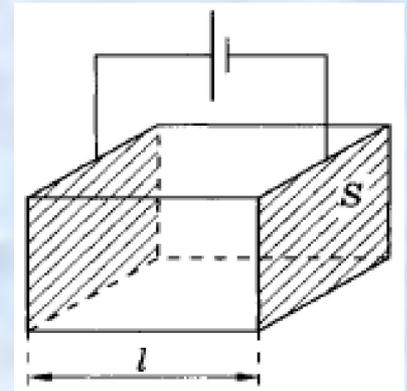
$$jS = nq\alpha(b_+ + b_-)\frac{U}{l}S.$$

Так как  $I = jS$ , то (12.57) соответствует закону Ома для участка цепи без источника тока:  $I = U/R$ , где

$$R = \frac{l}{S n q \alpha (b_+ + b_-)}$$

— сопротивление электролита. Сравнивая полученное выражение с  $R = \frac{\rho l}{S}$ , выражение для проводимости:

$$\gamma = 1/\rho = nq\alpha(b_+ + b_-).$$



# Электропроводимость электрических тканей при постоянном токе

$$\gamma = 1/\rho = nq\alpha(b_+ + b_-).$$

Удельная проводимость у электролита тем больше, чем больше концентрация ионов, их заряд и подвижность. При повышении температуры возрастает подвижность ионов и увеличивается электропроводимость.

Электропроводимость тканей и органов зависит от их функционального состояния и, следовательно, может быть использована как диагностический показатель. Так, например, при воспалении, когда клетки набухают, уменьшается сечение межклеточных соединений и увеличивается электрическое сопротивление; физиологические явления, вызывающие потливость, сопровождаются возрастанием электропроводимости кожи и т. д.

	$\rho$ , Ом · м		$\rho$ , Ом · м
Спинномозговая жидкость	0,55	Ткань жировая	33,3
Кровь	1,66	Кожа сухая	$10^5$
Мышцы	2	Кость без надкостницы	$10^7$
Ткань мозговая и нервная	14,3		

# Электрический разряд в газах. Аэроионы и их лечебно-профилактическое действие

Газ, состоящий только из нейтральных частиц, является диэлектриком (изолятором). Если его ионизовать, то он становится электропроводным. Любое устройство, явление, фактор, способный вызвать ионизацию молекул и атомов газа, называют ионизатором.

Чтобы ионизовать нейтральный атом, следует совершить некоторую работу  $A_{и}$  по отрыву электрона, равную энергии ионизации. В физике принято энергию (работу) ионизации выражать ионизационным потенциалом

$$\varphi_{и} = A_{и} / e.$$

	$\varphi_{и}, \text{В}$		$\varphi_{и}, \text{В}$
Пары натрия	5,1	Азот	15,5
Пары ртути	10,4	Водород	15,6
Кислород	12,5	Гелий	21,5
Углекислый газ	14,4		

# Электрический разряд в газах. Аэроионы и их лечебно-профилактическое действие

В земных условиях воздух практически всегда содержит некоторое количество ионов благодаря природным ионизаторам, главным образом радиоактивным веществам в почве и газах, и космическому излучению. Ионы и электроны, находящиеся в воздухе, могут, присоединяясь к нейтральным молекулам и взвешенным частицам, образовать более сложные ионы. Эти ионы в атмосфере называют **аэроионами**.

Они различаются не только знаком, но и массой, их условно делят на легкие (газовые ионы) и тяжелые (взвешенные заряженные частицы — пылинки, частицы дыма и влаги).

**Тяжелые ионы вредно действуют на организм. Легкие и в основном отрицательные аэроионы оказывают благотворное влияние.** Их используют, в частности, для лечения — аэроионотерапия.

Различают естественную аэроионотерапию, связанную с пребыванием больного в природных условиях с повышенной ионизацией воздуха (горы, водопады пр.)<sup>1</sup>, и искусственную, проводимую с помощью специальных устройств — аэроионизаторов, которым может быть любой ионизатор, создающий ионы в воздухе. Однако, используемый для лечебных целей, он не должен вызывать побочного вредного воздействия на организм. Разновидностью искусственной аэроионотерапии является электростатический душ (франклинизация).

При франклинизации применяют постоянное электрическое поле высокого напряжения (до 50 кВ). Лечебное действие оказывают образующиеся при этом аэроионы и небольшое количество озона. Франклинизацию проводят в виде общих и местных процедур. При общей франклинизации больной сидит на изолированном деревянном стуле с металлической пластиной, соединенной с положительным полюсом аппарата. Над головой больного на расстоянии 10—15 см устанавливают электрод в виде паука, подключенный к отрицательному полюсу аппарата.