

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

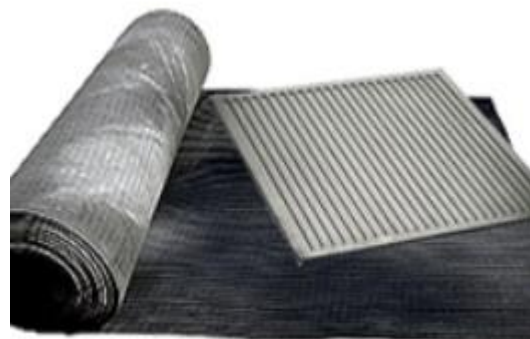
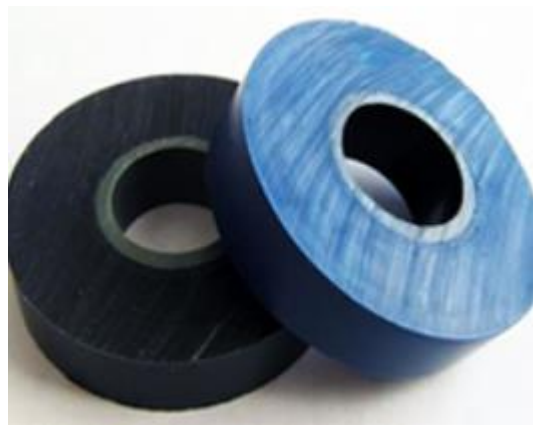


© 2024 Томский политехнический университет, ОЭЭ ИШЭ

Лектор: к.т.н., доцент Сапугольцева Ольга Владимировна

# Диэлектрические материалы -

- материалы, основным электрическим свойством которых является способность к электрической поляризации, и в которых возможно существование электрического поля



Поляризация – явление, связанное с ограниченным смещением связанных зарядов в диэлектрике или поворотом электрических диполей, обычно под воздействием внешнего электрического поля.

# Диэлектрические материалы

*основные свойства:*

**очень слабая электропроводность и**

**способность к электрической поляризации**

(существование электрического поля в объёме материала).

$\Delta W$  более 3 эВ

$\rho_V \sim 10^5 \div 10^{17} \text{ Ом}\cdot\text{м}$

**Пассивные**

(электроизоляционные)

- применяются для создания электрической изоляции

**Активные**

- изменяют свои параметры под действием внешних факторов

Примен-ся в электронной технике

# Классификация диэлектриков

По *агрегатному состоянию*:

- *твердые (кристаллические, аморфные),*
- *жидкие, газообразные,*
- *а также твердеющие материалы:* лаки, компаунды, клеи.

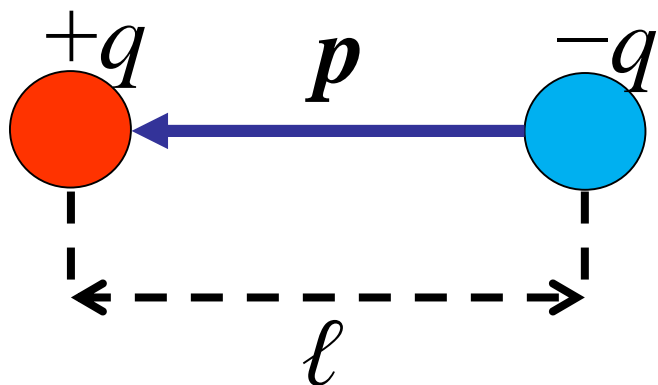
По *химической природе*:

- *органические* – молекулы содержат атомы углерода;
- *неорганические* – молекулы не содержат атомов углерода (кроме таких соединений, как алмаз, оксиды углерода, сероуглерод, угольная кислота и ее соли);
- *элементоорганические* – молекулы содержат атомы элементов не характерных для органических веществ: *Si, Mg, Al* и др.

Органич. диэл-ки более гибки и эластичны по сравнению с неорганич., но они менее нагревостойки.

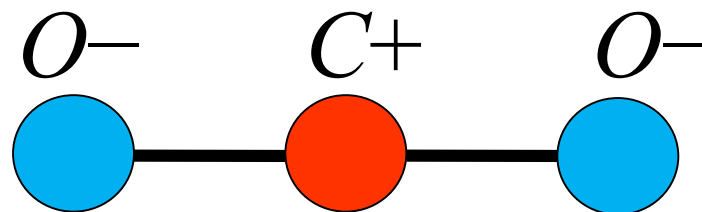
# Полярность диэлектриков

$$p = q \cdot \ell$$



$p$  – собственный электр. момент, сущ. внутр. эл. поле

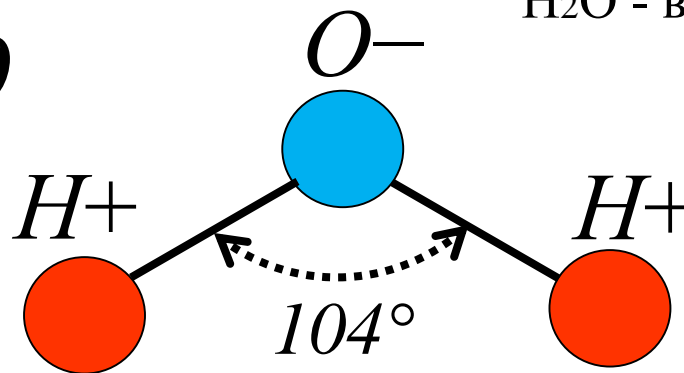
CO<sub>2</sub> - углекислый газ



$$p = 0$$

H<sub>2</sub>O - вода

$$p \neq 0$$



Если *центры тяжести отриц. и полож. зарядов в молекуле не совпадают*, то такая молекула называется **полярной**, а диэл-к – **полярным**.  $p$  молекул **неполярного** диэл-ка (*симметричн. молекула*) равен нулю.

**Основные характеристики,  
описывающие поведение диэлектриков  
в электрических полях:**

1. Электропроводность  $\gamma$  ( $\rho$ )
2. Поляризация  $\epsilon$
3. Диэлектрические потери  $tg\delta$
4. Электрическая прочность  $E_{ПР}$

Электрическая прочность – пробой диэл-в.

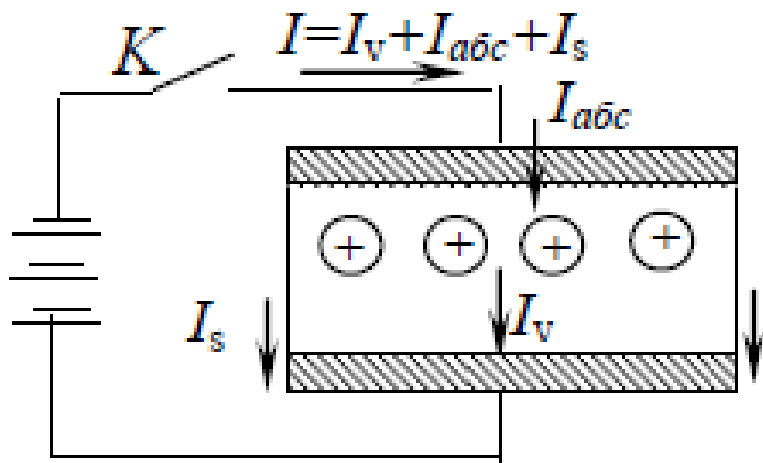
# Электропроводность диэлектриков

В зависимости от *типа носителей зарядов* в диэл-х могут наблюдаться следующие *виды электропроводности*:

- *электронная* – носители зарядов *электроны*;
  - *ионная* – носители зарядов *ионы*;
  - *молионная* – носители зарядов *молионы* (группы молекул, переносящие заряд в *коллоидах*: *эмульсии* и *суспензии*).
- 
- *Газообразные* диэл-ки: *электронная* и *ионная*.
  - *Жидкие* диэл-ки: *ионная* и *молионная*.
  - *Твердые* диэл-ки: *ионная* электр-ть.
  - В некоторых случаях (предпробивное состояние и т.д.) в *твердых* и *жидких* диэл-х может быть *электронный* тип.

# Электропроводность диэлектриков

- По сравнению с электропр-ю *р-в* и *п/п-ов* **электропр-ть диэлектриков** имеет ряд характерных **особенностей**.
- Все диэлектрики под воздействием **не изменяющегося во времени напряжения** пропускают некоторый, хотя и **весьма незначительный ток**, называемый **током утечки  $I$** .



Виды эл. тока в образце диэлектрика

$I$  – ток утечки;

$I_v$  – объемный ток;

$I_s$  – поверхностный ток;

$I_{abc}$  – ток абсорбции – ток, обусловленный **перераспределением объемных зарядов**, а также **установлением медленных видов поляризации** (релаксацион., миграцион.); **спадание** может продолжаться **в течение нескольких минут, часов и т.д.** (зависит от структуры диэ-ка);

$I_{скв} = I_v + I_s$  – сквозной ток – **не изменяющ. во времени**, обусловленный **объемной и поверхностной электропроводн-ми** (за счет несовершенства).



**Объемный ток утечки  $I_v$  :  $I_v = U / R_v$**

**Активное сопротивление диэлектрика  $R_v$  :**

$$R_v = \rho_v \cdot h / S,$$

где:

$\rho_v$  – удельное объемное сопротивление [Ом·м];

$h$  – толщина образца (расстояние между обкладками плоского конденсатора) [м];

$S$  – площадь измерительного электрода (пластины конденсатора) [м<sup>2</sup>].

# Изменение тока в диэлектрике при приложении постоянного напряжения



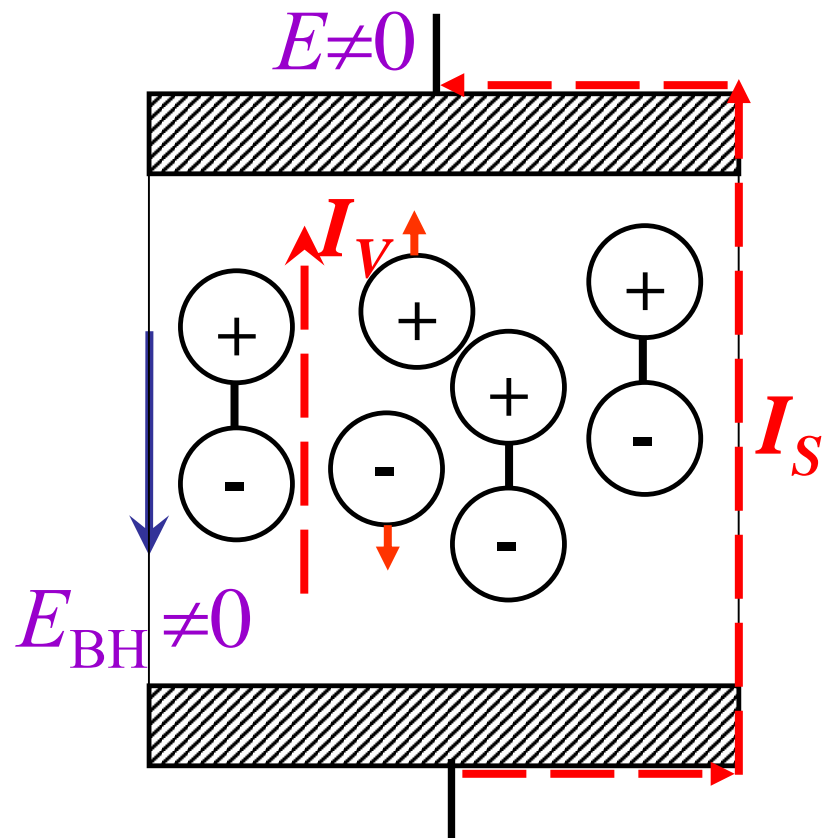
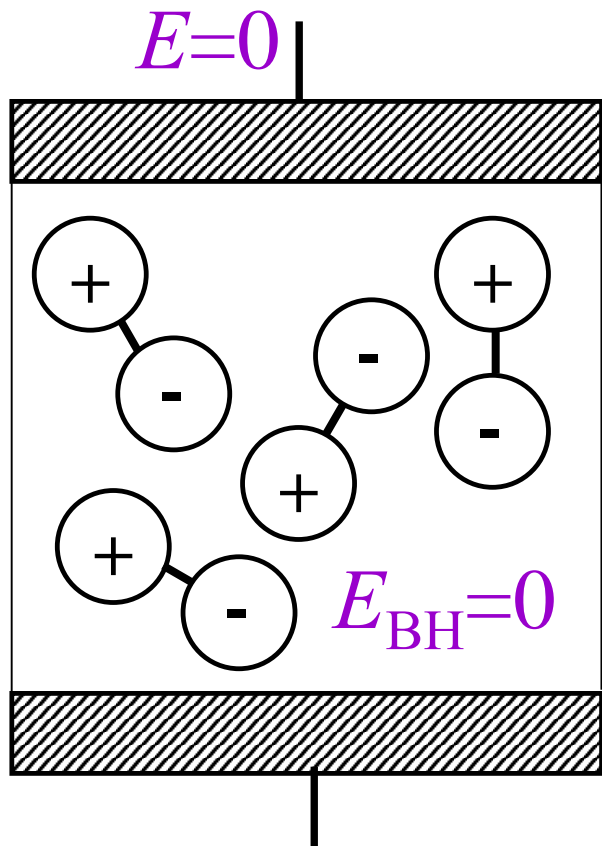
$I_{см}$  следует отличать от тока проводимости, который вызван движением заряженных частиц (электронов и ионов).  $I_{см}$  появляются только в том случае, если эл. смещение переменное.

# Ток смещения:

- Постоянный ток в цепи с конденсатором не течет, переменный - протекает. В конденсаторе, обкладки которого разделяет диэлектрик, *ток проводимости*, вызванный перемещением электронов, идти не может.
- Значит, если ток переменный (присутствует переменное электрическое поле), происходит некоторый процесс, который замыкает ток проводимости *без переноса заряда между обкладками конденсатора*. Этот процесс называют *током смещения*.
- Так как магнитное поле – обязательный признак любого тока, Максвелл назвал переменное электрическое поле *током смещения*.

# ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Поверхность м.б. загрязнена – свободн. носит. заряда будут перемещаться.



Компенсатор – эл. моменты отдельных молекул взаимно компенсируют друг друга.

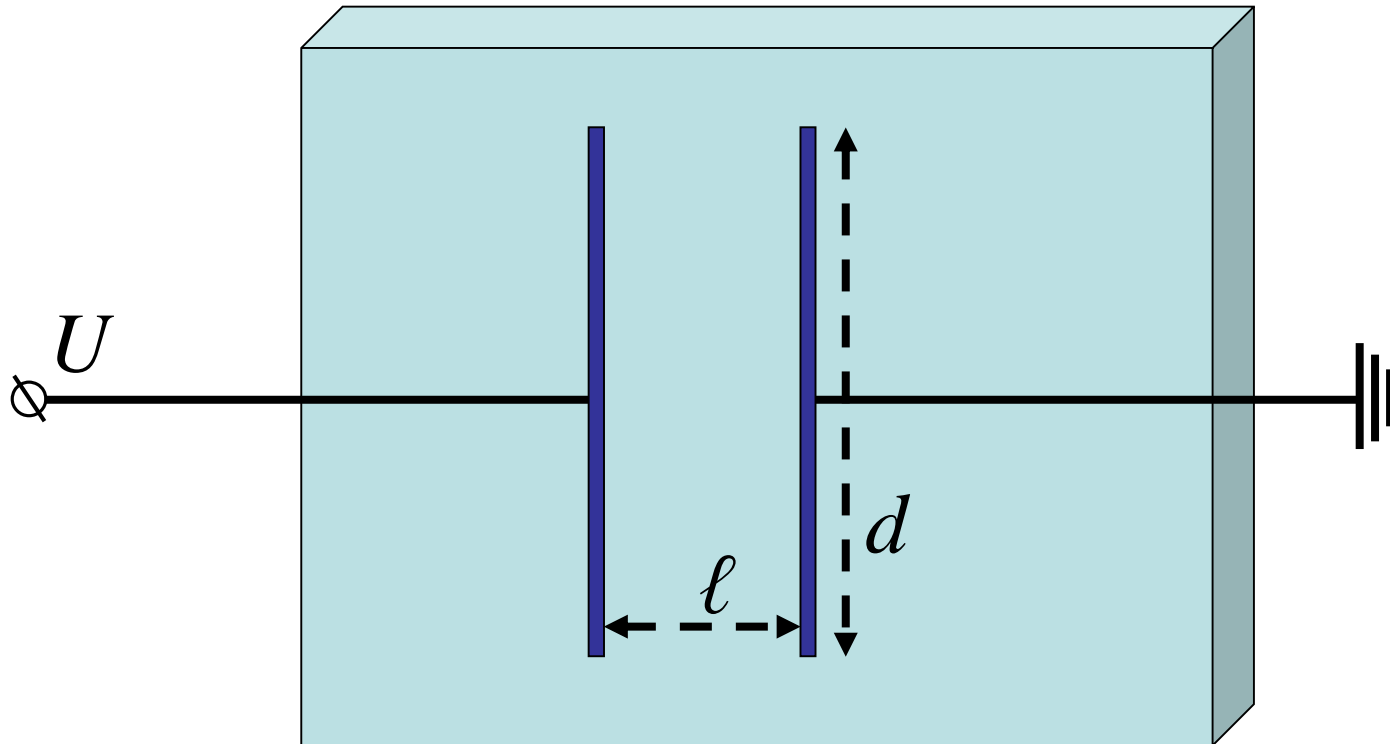
$E_{вн}$  направлено навстречу  $E$ . Свободн. носит. заряда будут перемещ. от «-» к «+».

# Удельное поверхностное сопротивление:

$$\rho_S = 1/\gamma_S = R_S d/\ell \quad [\text{Ом}]$$

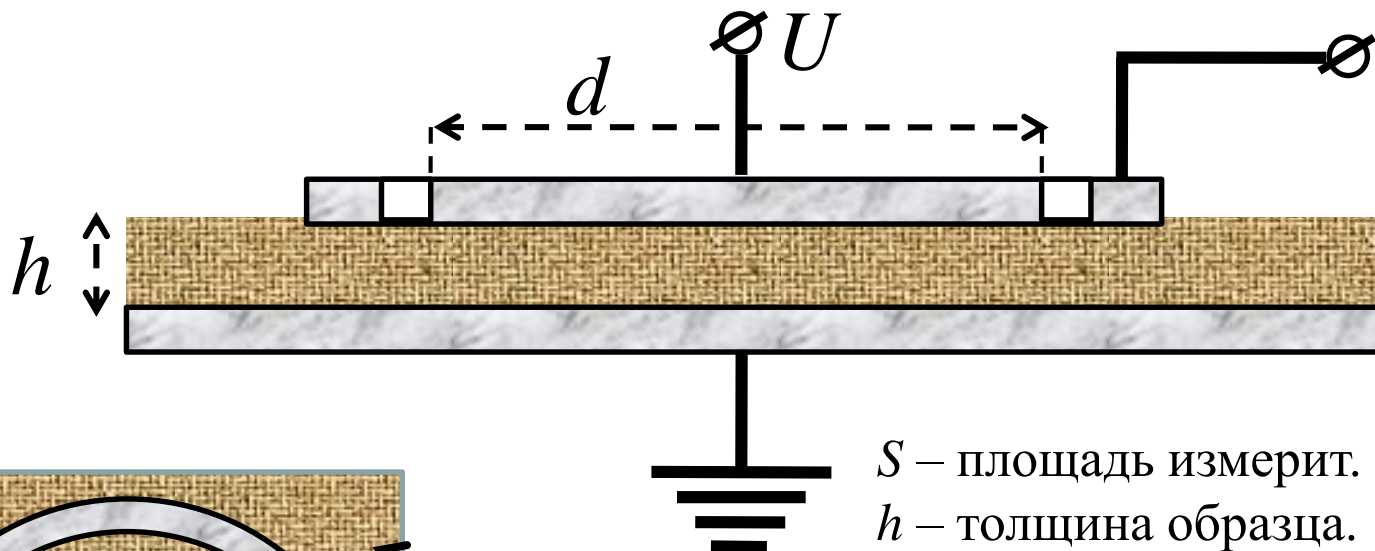
$d$  – длина измерит. электрода;

$\ell$  – расстояние между электродами.



# Удельное объемное сопротивление:

$$\rho_V = 1/\gamma_V = R_V S/h \text{ [Ом}\cdot\text{м]}$$



$S$  – площадь измерит. электрода;  
 $h$  – толщина образца.

образец

измерительный электрод

охранное кольцо

Охранное кольцо (1-2 мм) не пускает поперх. ток.

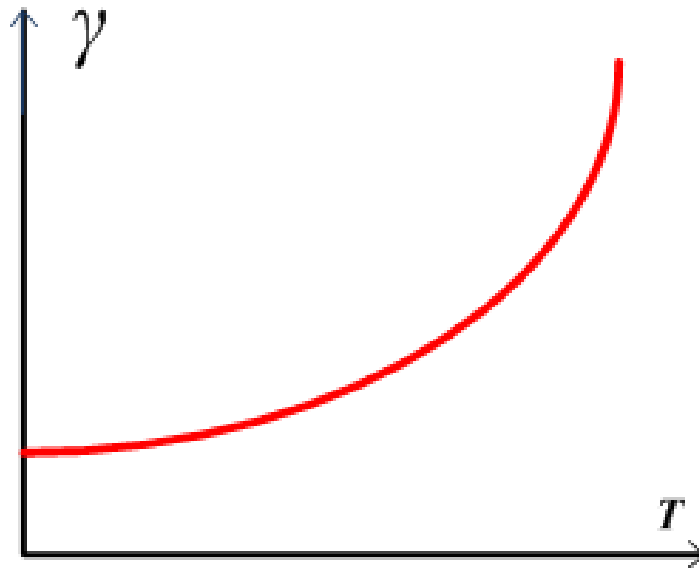
# Электропроводность диэлектриков

- При измерении *удельного сопротивления диэлектриков ток абсорбции* необходимо *исключить*, выдерживая образец под напряжением в течение некоторого времени (через 1 мин после подачи напряжения, чтобы произошла зарядка геометрической емкости).
- *Объемная и поверхностная эл. проводимости* диэл-в зависят от:
  - структуры диэл-в;
  - эксплуатационных факторов: *температуры*, наличия *влаги*, *напряженности* эл. поля.

Если уд. сопр-е померить сразу, но будет меньше на 5-6 порядков.

# Электропроводность диэлектриков

- Увеличение *температуры* приводит к *возрастанию тепловых флуктуаций частиц*, вследствие *повышения их тепловой энергии  $kT$* .
- Тепловые флуктуации приводят к *диссоциации некоторых молекул* или *вырыванию слабозакрепленных ионов* из узлов решетки.





# ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ГАЗОВ

В стационарном случае концентрация ионов  $n$ :

$$n = n_- = n_+ = \sqrt{(N_{REC} / \alpha)},$$

$N_{REC} = \alpha n_- n_+$  – число рекомбинирующих ионов в  $1 \text{ м}^3$ ;  $\alpha$  – коэффициент рекомбинации.

В слабых полях удельная проводимость:

$$\gamma = qn(\mu_- + \mu_+)$$

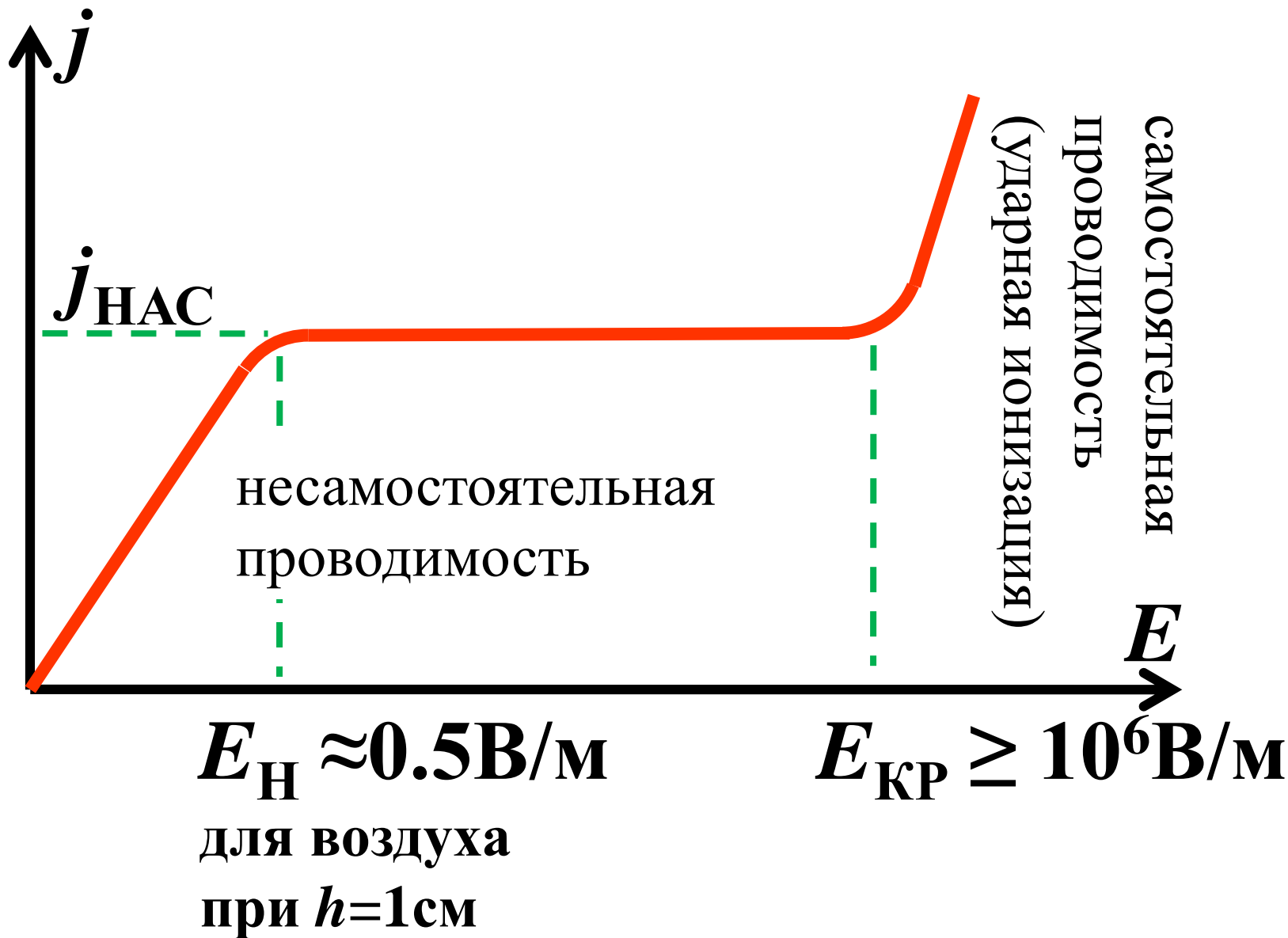
$\mu_-$  И  $\mu_+$  – подвижность ионов

Для воздуха (в слабых полях)

$$\alpha \sim 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}; \quad \gamma \sim 10^{-15} \text{ См/м}$$

# Электропроводность газов

- Молекула газа должна распасться, чтобы образовались свобод. носители заряда - *ионы*.
- *Под действием* радиацион. воздействия, темп-ры – ежесекундно появляется 10-30 свободных ионов (*чем выше темп-ра, тем больше ионов*).
- *При поглощении энергии* молекула газа *теряет электрон* и превращается в *положительный ион*. *Высвобождаемый* при этом *электрон* «прилипает» к нейтральной молекуле, образуя *отрицательный ион*.
- Через определенное время останутся одни ионы «+» и «-», которые *рекомбинируют*, общее количество будет const, т.к. между процессами *генерации* и *рекомбинации* заряженных частиц устанавливается *динамическое равновесие*.



$E_H$  – напряженность, при которой наступает насыщение.

# Электропроводность газов

- I участок – плотность тока линейно возрастает, т.к. *подвижность, число рекомбинирующих ионов (проводимость) const*, справедлив *з. Ома*.
- II участок – наступает *насыщение*, плотность тока const, т.к. все частицы совершают *хаотическое тепловое движение*, из-за возрастания скорости дрейфа ионов, *вероятность их рекомбинации уменьшается* (время пробега иона м/у электродами становится малым по сравнению со временем, необходимым для рекомбинации), ионы устремляются к электродам.
- III участок – под действием сильной  $E$  происходит *разрыв молекул, увеличиваются свободные носит. заряда*, вследствие процессов *ударной ионизации* молекул *электронами* в сильном эл. поле *вплоть до пробоя* газового промежутка.

Условие возникновения ударной ионизации –  $W < q\lambda E$ , где  $W$  – энергия ионизации;  $q$  – заряд электрона;  $\lambda$  – длина свободного пробега;  $E$  – напряженность.

**Что такое поляризация в  
диэлектриках?**

**явление, связанное с  
ограниченным смещением  
связанных зарядов в  
диэлектрике или поворотом  
электрических диполей, обычно  
под воздействием внешнего  
электрического поля.**

**Какие диэлектрики  
относятся к  
электроизоляционным?**

**Пассивные.**



**В каких пределах лежит  
величина уд. объемного  
сопротивления диэл-в?**

$\Delta W$  более 3 эВ

$\rho_V \sim 10^5 \div 10^{17} \text{ Ом}\cdot\text{м}$

**На какие группы делятся  
диэлектрики по  
агрегатному состоянию?**

- *твердые (кристаллические, аморфные),*
- *жидкие, газообразные,*
- *а также твердеющие материалы:* лаки, компаунды, клеи.

**На какие группы делятся  
диэлектрики по  
химической природе?**

• **органические** – молекулы содержат атомы углерода;

• **неорганические** – молекулы не содержат атомов углерода (кроме таких соединений, как алмаз, оксиды углерода, сероуглерод, угольная кислота и ее соли);

• **элементоорганические** – молекулы содержат атомы элементов не характерных для органических веществ: *Si, Mg, Al* и др.

**Какие диэлектрики  
называются полярными?**

Если *центры тяжести отриц. и полож. зарядов в молекуле не совпадают*, то такая молекула называется ***полярной***, а *диэл-к* – ***полярным***.  *$\rho$*  молекул ***неполярного*** *диэл-ка* (*симметричн. молекула*) равен нулю.



**Какие существуют  
основные характеристики,  
описывающие поведение  
диэлектриков в  
электрических полях?**

1. Электропроводность  $\gamma$  ( $\rho$ )
2. Поляризация  $\epsilon$
3. Диэлектрические потери  $\text{tg}\delta$
4. Электрическая прочность  $E_{\text{ИП}}$

**Какие существуют виды  
электропроводности в  
зависимости от типа  
носителей зарядов в диэл-  
х?**

- **электронная** – носители зарядов **электроны**;
- **ионная** – носители зарядов **ионы**;
- **молионная** – носители зарядов **молионы** (группы молекул, переносящие заряд в **коллоидах**: *эмульсии* и *суспензии*).

**Какие виды  
электропроводности  
наблюдаются в  
газообразных, жидких и  
твёрдых диэл-х?**

- *Газообразные* диэл-ки: *электронная* и *ионная*.
- *Жидкие* диэл-ки: *ионная* и *молионная*.
- *Твердые* диэл-ки: *ионная* электр-ть.
- В некоторых случаях (предпробивное состояние и т.д.) в *твердых* и *жидких* диэл-х может быть *электронный* тип.

**Какие виды эл. тока  
наблюдаются в образце  
диэлектрика?**

$I$  – ток утечки;

$I_v$  – объемный ток;

$I_s$  – поверхностный ток;

$I_{abc}$  – ток абсорбции – ток, обусловленный *перераспределением объемных зарядов*, а также *установлением медленных видов поляризации* (релаксацион., миграцион.); *спадание* может продолжаться *в течение нескольких минут, часов и т.д.* (зависит от структуры диэ-ка);

$I_{скв} = I_v + I_s$  – сквозной ток – *не изменяющ. во времени*, обусловленный *объемной и поверхностной электропроводн-ми* (за счет несовершенства).



**Что такое ток абсорбции?**

$I_{abc}$  – ток абсорбции – ток, обусловленный *перераспределением объемных зарядов*, а также *установлением медленных видов поляризации* (релаксацион., миграцион.); *спадание* может продолжаться *в течение нескольких минут, часов и т.д.* (зависит от структуры диэ-ка);

**Как изменяется  
электропроводность диэл-  
в с увеличением  
температуры?**

**Увеличивается.**

**Почему  
электропроводность диэл-  
в с увеличением  
температуры -  
увеличивается?**

- Тепловые флуктуации приводят к *диссоциации некоторых молекул* или *вырыванию слабозакрепленных ионов* из узлов решетки.

**Как плотность тока  
изменяется с увеличением  
напряженности эл. поля?**

**Увеличивается (на 1 и 3  
участке).**



# ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ

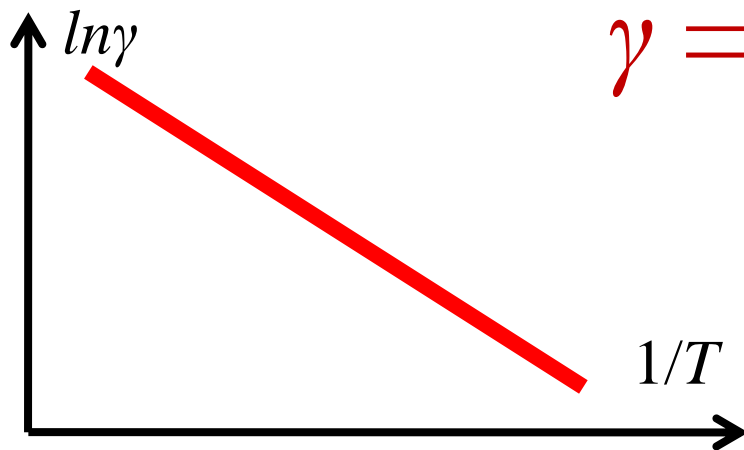
$$\gamma = qn(\mu_- + \mu_+)$$

$$n = n_0 \exp(-W/kT)$$

$W$  – энергия диссоциации молекул;

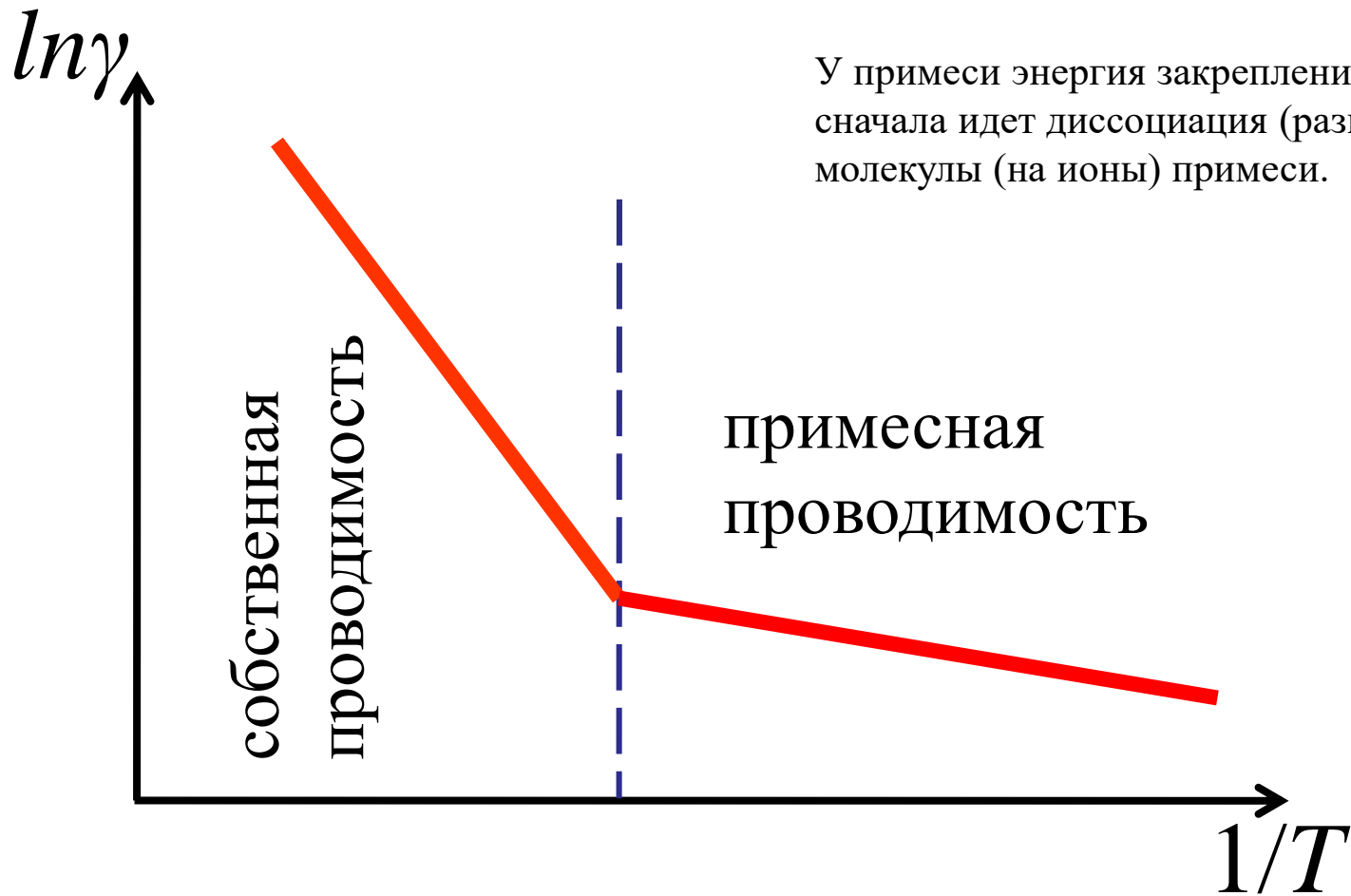
обозначим:  $a = W/k, A = n_0(\mu_- + \mu_+)$ ;

$$\gamma = A \exp(-a/T)$$



Межмолекулярные и внутримолекулярные связи гораздо сильнее, нужно приложить больше энергии (под действие темп-ры, излучения и т.д.), чтобы молекула распалась на ионы «+» и «-».

Жидкость, которая не содержит примеси.



У примеси энергия закрепления ниже, сначала идет диссоциация (развал) молекулы (на ионы) примеси.

собственная  
проводимость

примесная  
проводимость

В жидкостях рост  $\gamma$  (с ростом  $T$ ) связан не только *с диссоциацией молекул*, но и *с уменьшением вязкости*.  
Большое влияние оказывают *примеси*.

# Электропроводность жидкостей

- В связи с *увеличением энергии* хаотического *теплового* движения молекул *степень ионизации и концентрация ионов* *растет* с *повышением температуры* по экспоненциальному закону.
- *Вязкость  $\eta$*  жидкости экспоненциально *убывает* при *увеличении температуры* (если нет полимеризации или других побочных процессов).
- В *термопластичных* полимерных материалах, которые размягчаются при нагревании и становятся твердыми при охлаждении, *перелом в зависимости* наблюдается так же *при переходе* из *стеклообразного* (твердого) состояния в *высокоэластическое* (размягченное – увеличение  $\gamma$  за счет увеличения подвижности с.н.з.).

**Проводимость жидкости:** сильно зависит от *полярности*

Для **сильно полярных** жидкостей  
(вода, этиловый спирт, ацетон)

$$\rho = 10^3 \div 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

Для **слабо полярных** жидкостей  
(совол, касторовое масло)

$$\rho = 10^8 \div 10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

Молекулы **неполярных жидкостей**  
(бензол, трансформаторное масло) диссоциируют слабо.

Проводимость примесная:

$$\rho \geq 10^{10} \div 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

В коллоидах (эмульсии, суспензии) носителями заряда м.б. **молионы**, что используют при нанесении покрытий электрофорезом.

# Электропроводность жидкостей

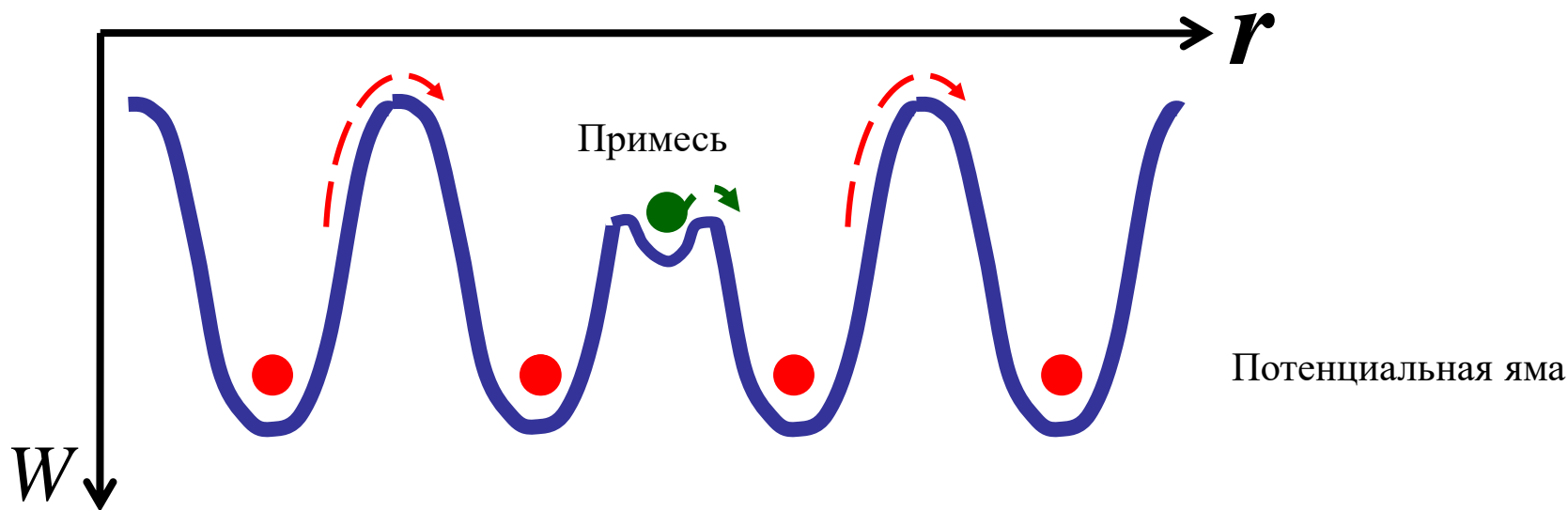
- *Диссоциация молекул легче* происходит в *полярных жидкостях*, чем в неполярных.
- В *неполярных жидкостях* молекулы основного вещества практически *не диссоциируют* на ионы. Их электропроводность обусловлена *примесями*, особенно *примесями полярных веществ*.
- *Стабильность эмульсий и суспензий*, т.е. способность их длительно сохраняться без оседания дисперсной фазы на дно сосуда (или всплывания ее на поверхность), вследствие различия плотностей обеих фаз, объясняется *наличием на поверхности частиц дисперсной фазы эл. зарядов — молионы*.

# Электрофорез:

- При наложении на коллоидную систему эл. поля *молионы* приходят в движение, что проявляется в виде *электрофореза*.
- *Электрофорез* применяют в лечебных целях в *физиотерапии* (метод лечения, основанный на *введении лекарств через кожу и слизистые оболочки* с помощью постоянного эл. тока).
- *Молионная электропроводность* присуща жидким лакам и компаундам, увлажненным маслам и т.п. Ее вклад в проводимость, как и вклад ионной электропроводности, зависит от *вязкости жидкости*.

# ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТВЁРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

- ✓ с.н.з. – *ионы*;
- ✓ *примесные ионы* активируются легче, чем собственные:



$$\gamma = qn\mu$$

Межмолекулярные и внутримолекулярные связи еще гораздо сильнее.

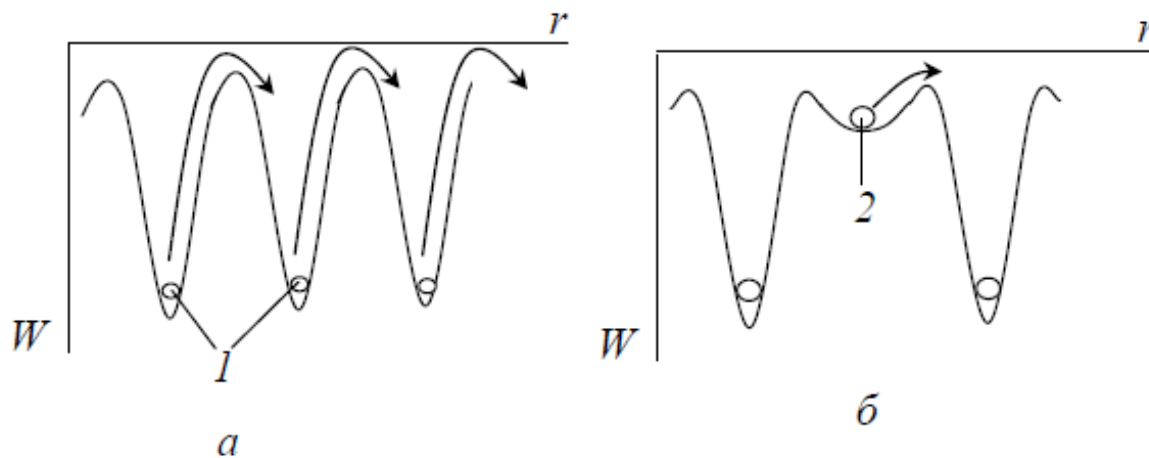
# Электропроводность тв. диэл-в

- Электропроводность диэл-в в отличие от п/п-в чаще всего носит не электронный, а *ионный* характер. Это связано с тем, что ширина ЗЗ в диэл-х  $\Delta W \gg kT$  (тепловой эн-и) и лишь *ничтожное количество эл-в* может отрываться от своих атомов *за счет теплового движения*.
- *Ионы* же часто оказываются *слабо связанными* в узлах решетки, и энергия  $W$ , необходимая для их срыва, *сравнима* с  $kT$ .
- *Ионная провод-ть* оказывается *больше электронной* за счет значительно *большей концентрации свободных ионов* (хотя подвижность ионов меньше подвижности эл-в):  
 $n_{\text{ион}} \mu_{\text{ион}} \gg n_{\text{эл}} \mu_{\text{эл}}$ .



# Электропроводность тв. диэл-в

- При низких  $T$  передвигаются *слабо связанные ионы* (например, *ионы примесей*). При высоких  $T$  получают возможность двигаться *ионы кристаллической решетки*.
- Направленное *движение ионов* (дрейф) осуществляется путём перескока («прыжковая проводимость») с ловушки на ловушку:



Механизмы а) собственной, б) примесной электропроводности (1-собственные ионы, 2-ион примеси).

С изменением  $T$  меняется  $n$  и  $\mu$  с.н.з.:

$$n = n_0 \exp(-W_{\text{Д}}/kT)$$

$W_{\text{Д}}$  – энергия диссоциации, необходимая для вырывания иона из кристаллической решётки

$$\mu = \mu_0 \exp(-W_{\text{П}}/kT)$$

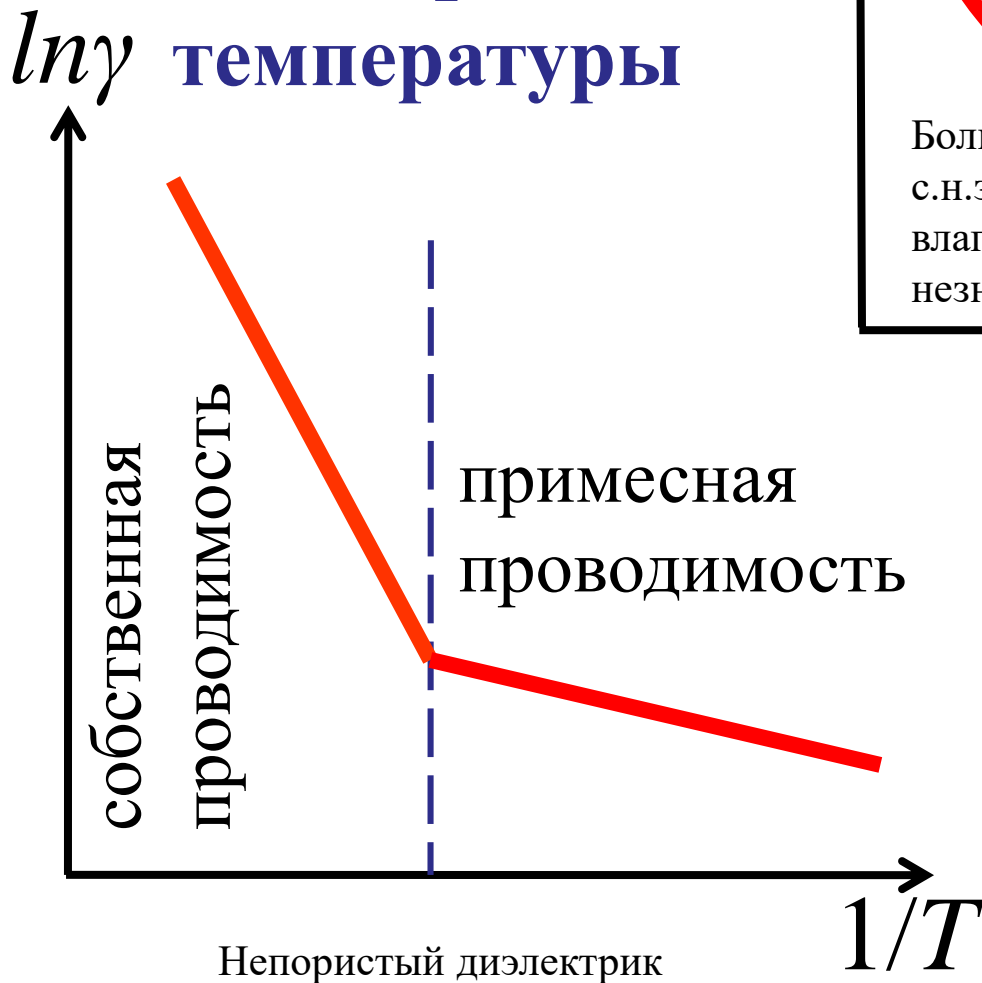
$W_{\text{П}}$  – энергия «перескока», необходимая для перехода иона из одного узла кристаллической решётки в другой

$$\gamma = A \exp(-b/T),$$

$$A = qn_0\mu_0$$

$$b = (W_{\text{Д}} + W_{\text{П}})/k$$

# Зависимость проводимости диэлектрика от температуры



## Проводимость увлажнённого диэлектрика

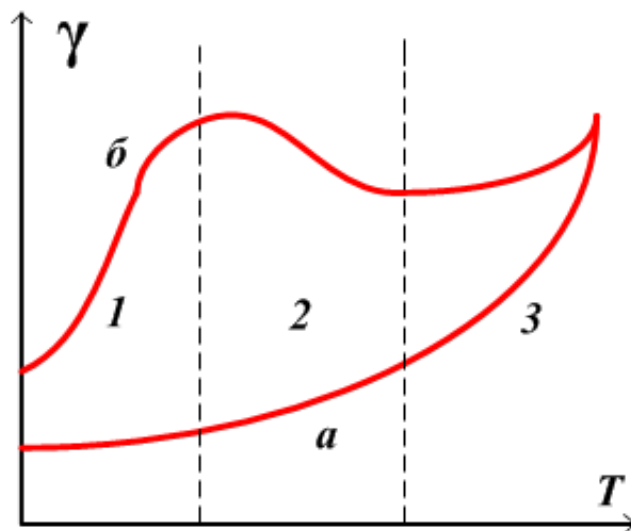
Пористый диэлектрик при наличии в нем влаги, даже в ничтожных количествах, резко увелич. свою эл-ть.

# Электропроводность тв. диэл-в

- Температура, при которой наблюдается излом зависимости  $\ln\gamma=f(1/T)$ , сильно зависит от *степени чистоты* и *совершенства материала*. При *увеличении* содержания примесей и дефектов *примесная удельная проводимость* *растет* и оказывается существенной при более высоких  $T$ .
- *Электропроводность диэлектриков с примесями больше*, чем у тех же диэлектриков без них.
- Некоторые диэлектрики (титансодержащие керамические материалы) обладают *электронной или дырочной* электропроводностью. Однако *носителями* часто являются *электроны не основного вещества*, а *примесей и дефектов*.

## Увлажнение тв. диэл-в:

- Присутствие в диэл-ке *даже* **малого кол-ва влаги** *увеличивает эл. проводимость на несколько порядков*, т.к. *сильно полярные молекулы воды и растворимые в воде примеси легко диссоциируют на ионы.*
- **Влага способствует** так же *диссоциации молекул основного вещества* – результат – **рост концентрации с.н.з.**



Зависимость электропроводности  $\gamma$  от температуры  $T$  для сухого (кривая  $a$ ) и увлажненного (кривая  $b$ ) диэлектриков.

# Зависимость проводимости $\gamma$ диэлектрика от напряжённости электрического поля $E$

В сильных полях (при  $E > E_{\text{кр}}$ ) выполняется

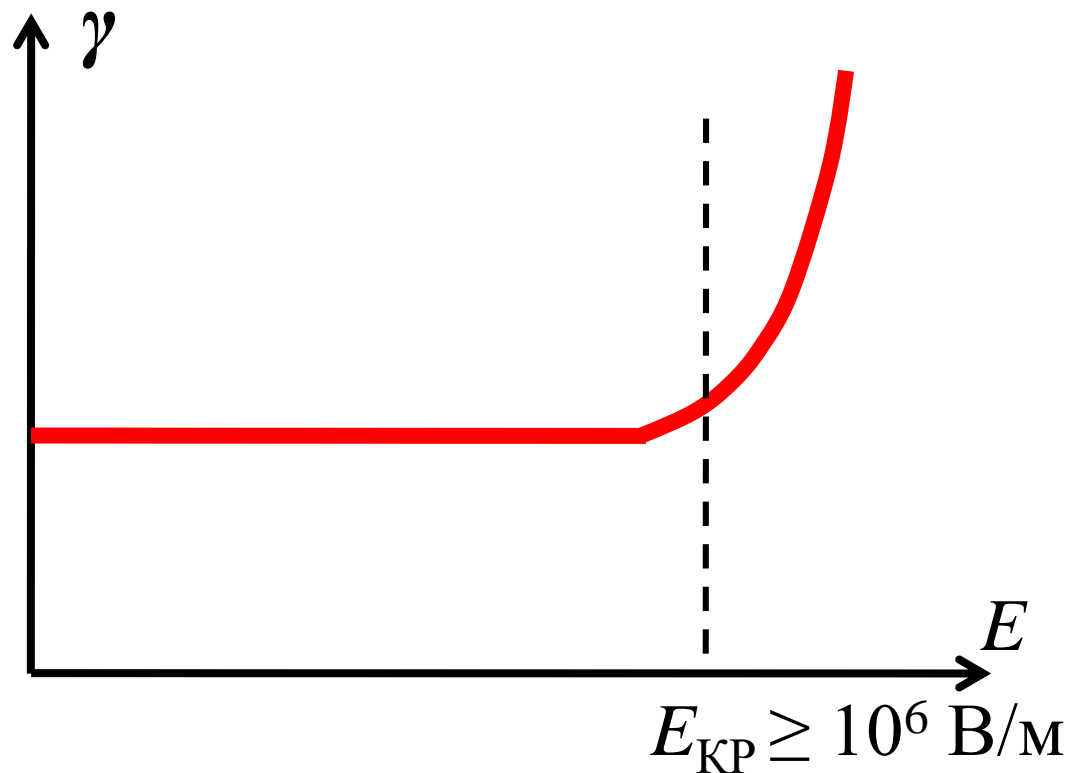
*закон Пуля:*

$$\gamma = \gamma_0 \exp(\beta_1 E)$$

Для ряда диэлектриков, как и для п/п-в, выполняется

*закон Френкеля:*

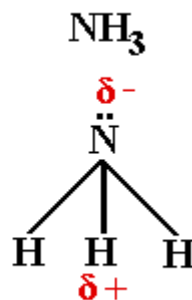
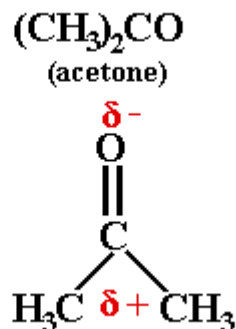
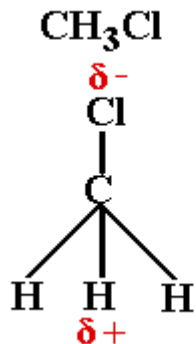
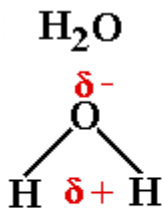
$$\gamma = \gamma_0 \exp(\beta_2 \sqrt{E})$$



Под действием  $E$ ,  $T$  происходит *наклон энергетически зон*, происходит отрывание электрона — электронная электропроводность (может произойти пробой).

# Электропроводность диэлектриков

- ✓ Удельная **поверхностная** провод-ть диэл-в на 1-2 порядка **выше** удельной **объемной** провод-ти и **сильно** зависит от **состояния** поверхности.
- ✓ Увлажнение и загрязнение поверхности, поры и трещины на поверхности способствуют **повышению** **поверхностной** **проводимости**.
- ✓ Наиболее **резкое** увеличение наблюдается у **полярных** диэл-в, т.к. они **лучше** смачиваются водой.
- ✓ Характер зависимостей **обоих** проводимостей **сходен**.



Полярные диэл-ки: вода, спирт.