

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

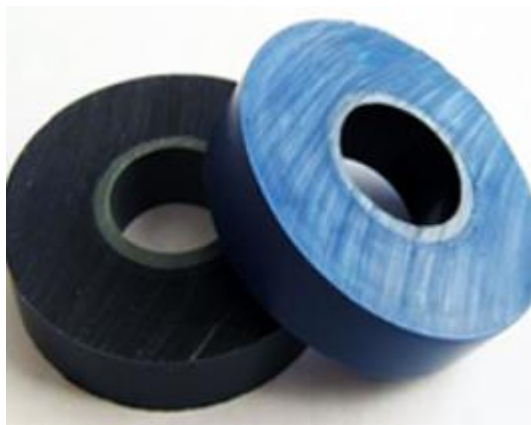


© 2022 Томский политехнический университет, ОЭЭ ИШЭ

Лектор: к.т.н., доцент Васильева 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).

ΔW 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.

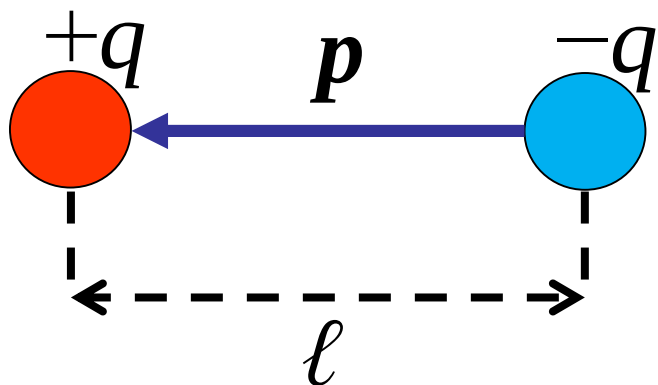
По *химической природе*:

- *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.

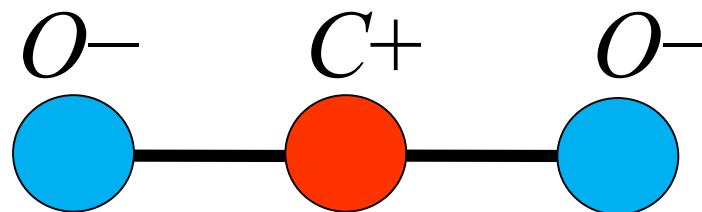
Полярность диэлектриков

$$p = q \cdot \ell$$



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

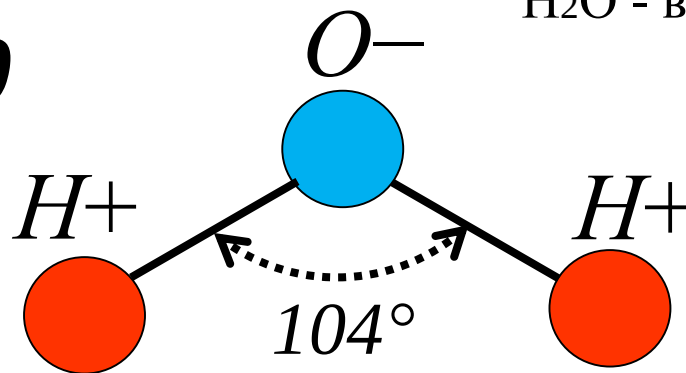
CO₂ – углекислый газ



$$p=0$$

H₂O – 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 γ (ρ)
2. Поляризация ϵ
3. Диэлектрические потери $tg\delta$
4. Электрическая прочность $E_{пр}$

Электрическая прочность – пробой диэл-в.

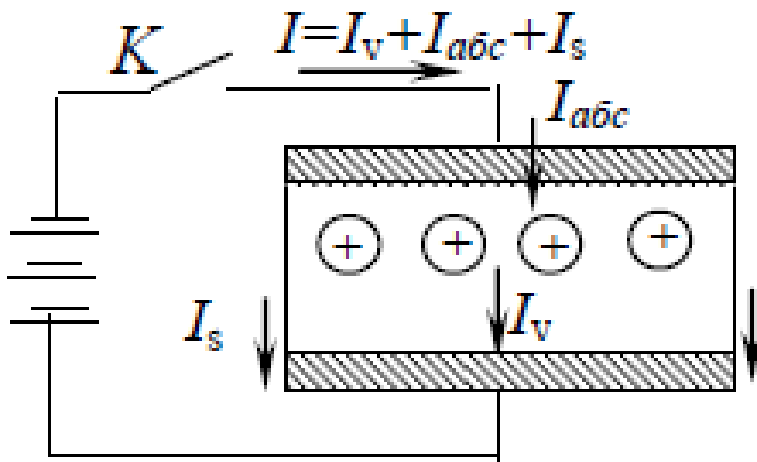
Электропроводность диэлектриков

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 пр-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:

ρ_v — удельное объемное сопротивление [Ом·м];

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

S — площадь измерительного электрода (пластины конденсатора) [м²].

Изменение тока в диэлектрике при приложении постоянного напряжения



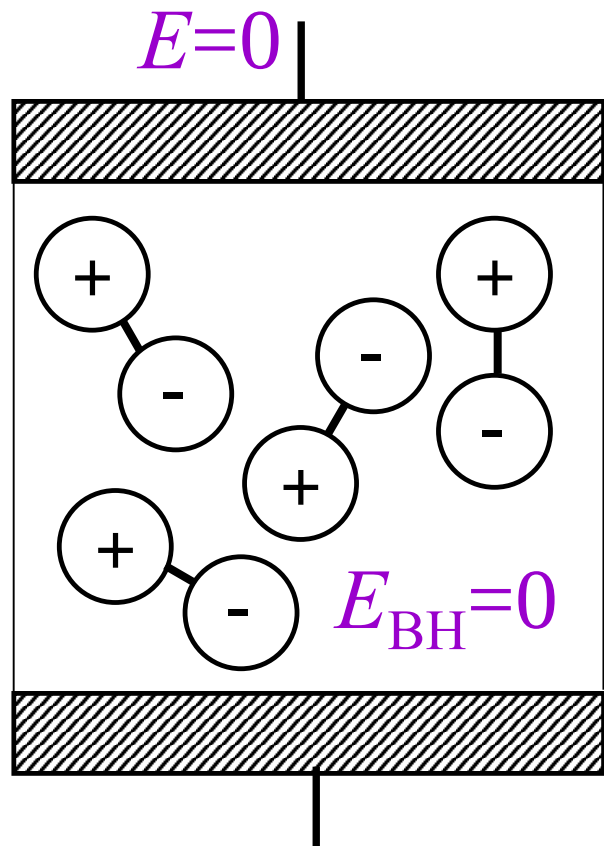
$I_{см}$ следует отличать от тока проводимости, который вызван движением заряженных частиц (электронов и ионов). $I_{см}$ появляются только в том случае, если эл. смещение переменное.

Ток смещения:

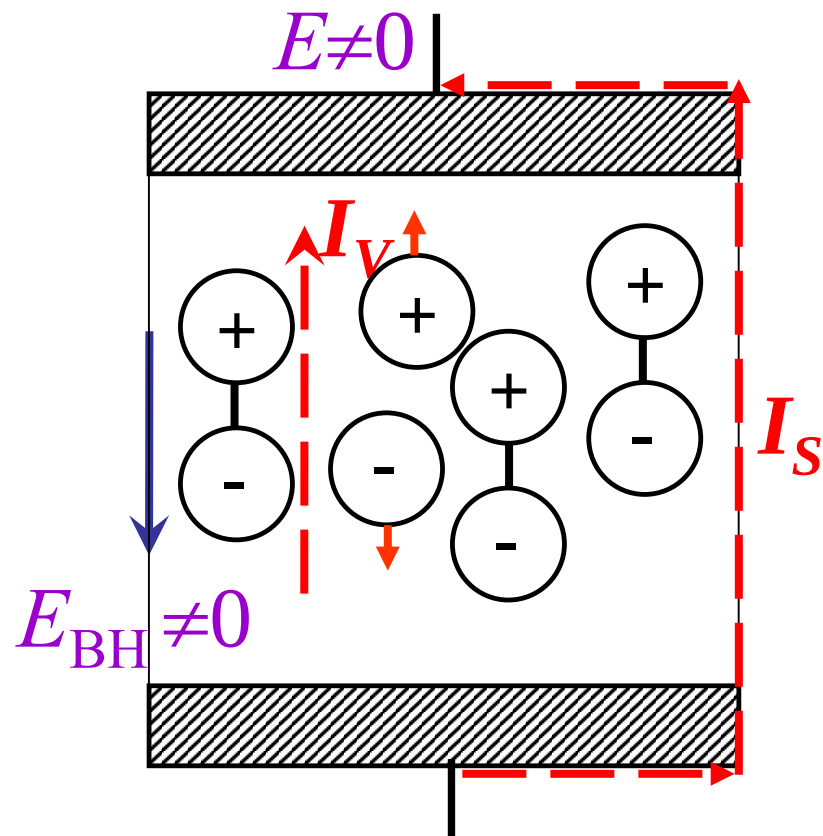
- Постоянный ток в цепи с конденсатором не течет, переменный - протекает. В конденсаторе, обкладки которого разделяет диэлектрик, *ток проводимости*, вызванный перемещением электронов, идти не может.
- Значит, если ток переменный (присутствует переменное электрическое поле), происходит некоторый процесс, 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.



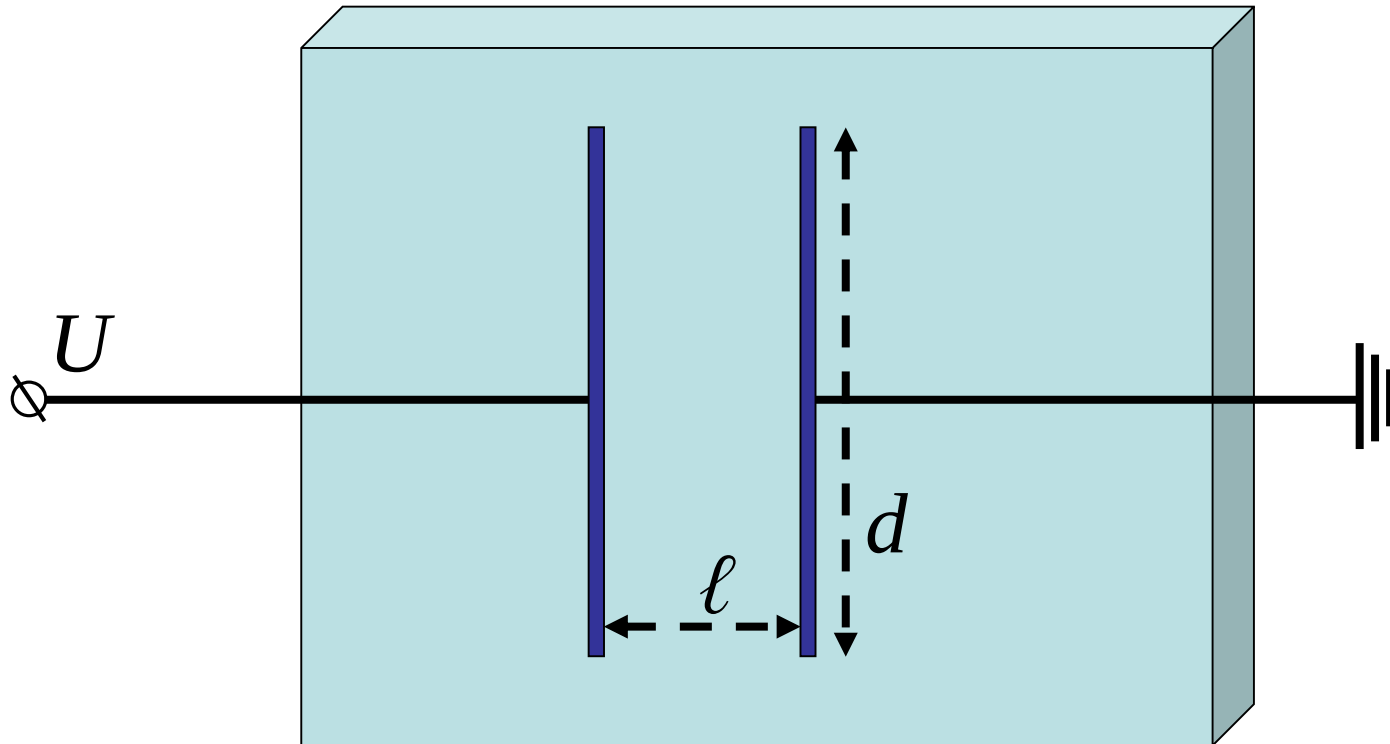
E_{BH} направлено навстречу E . Свободн. носит. заряда будут перемещ. от «-» к «+».

Удельное поверхностное сопротивление:

$$\rho_s = 1/\gamma_s = R_s d/\ell \quad [\text{Ом}]$$

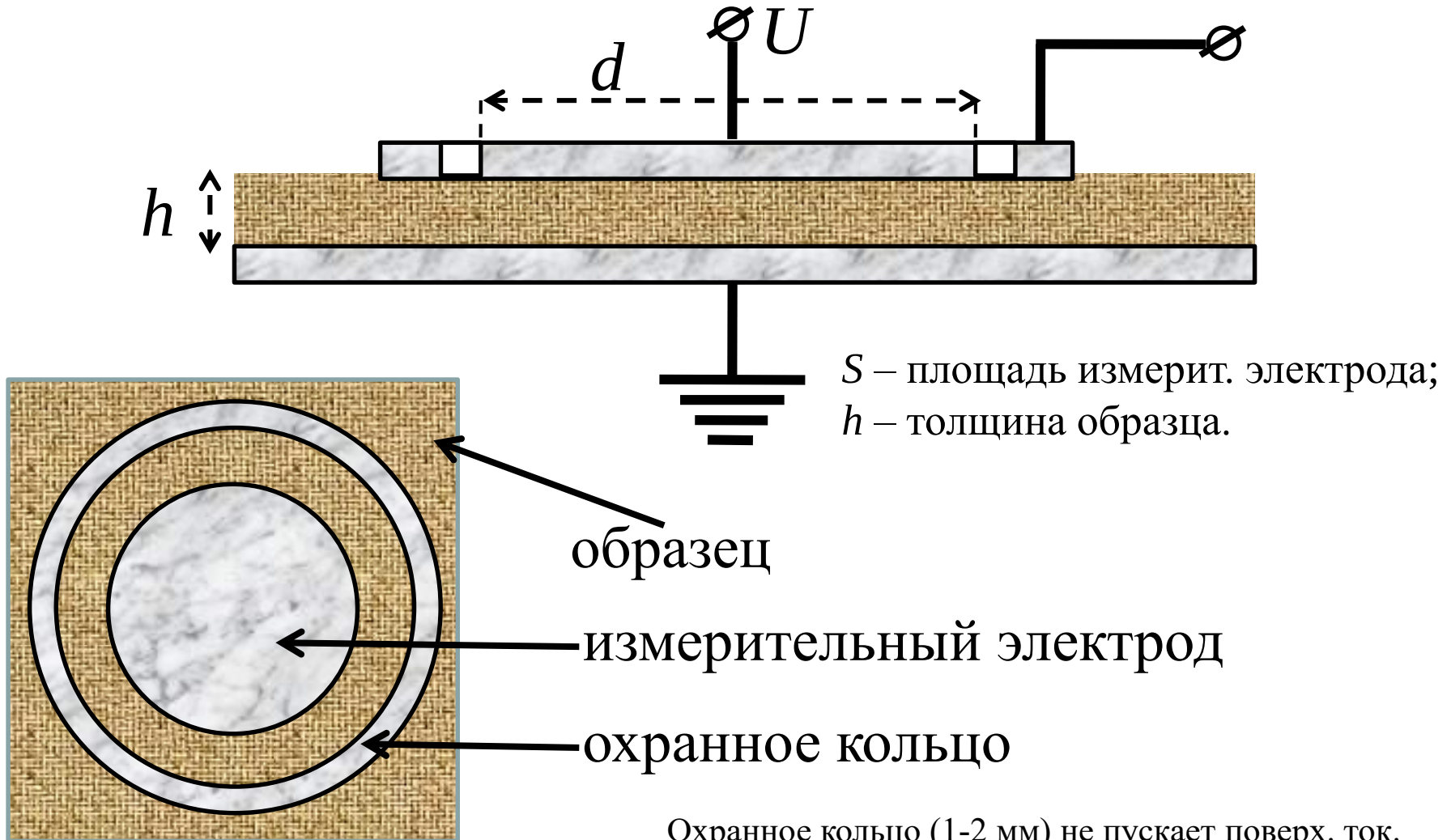
d — длина измерит. электрода;

ℓ — расстояние между электродами.



Удельное объемное сопротивление:

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



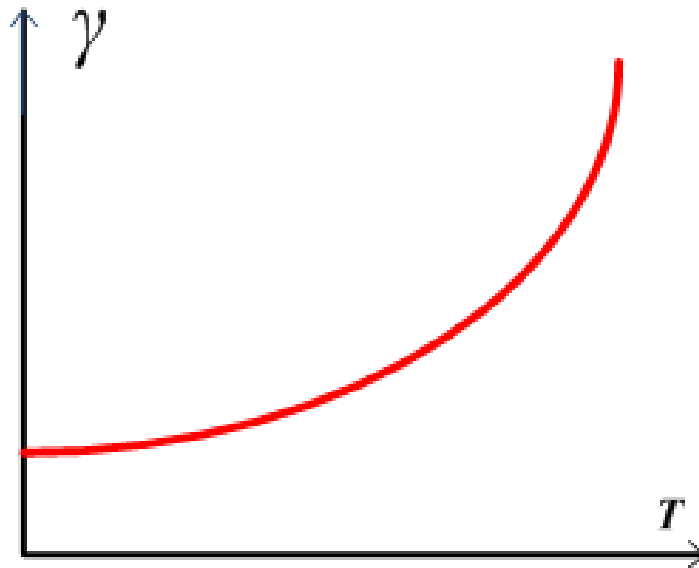
Электропроводность диэлектриков

- 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} — число рекомбинирующих ионов в 1 м^3 ; α — коэффициент рекомбинации.

В слабых полях удельная проводимость:

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

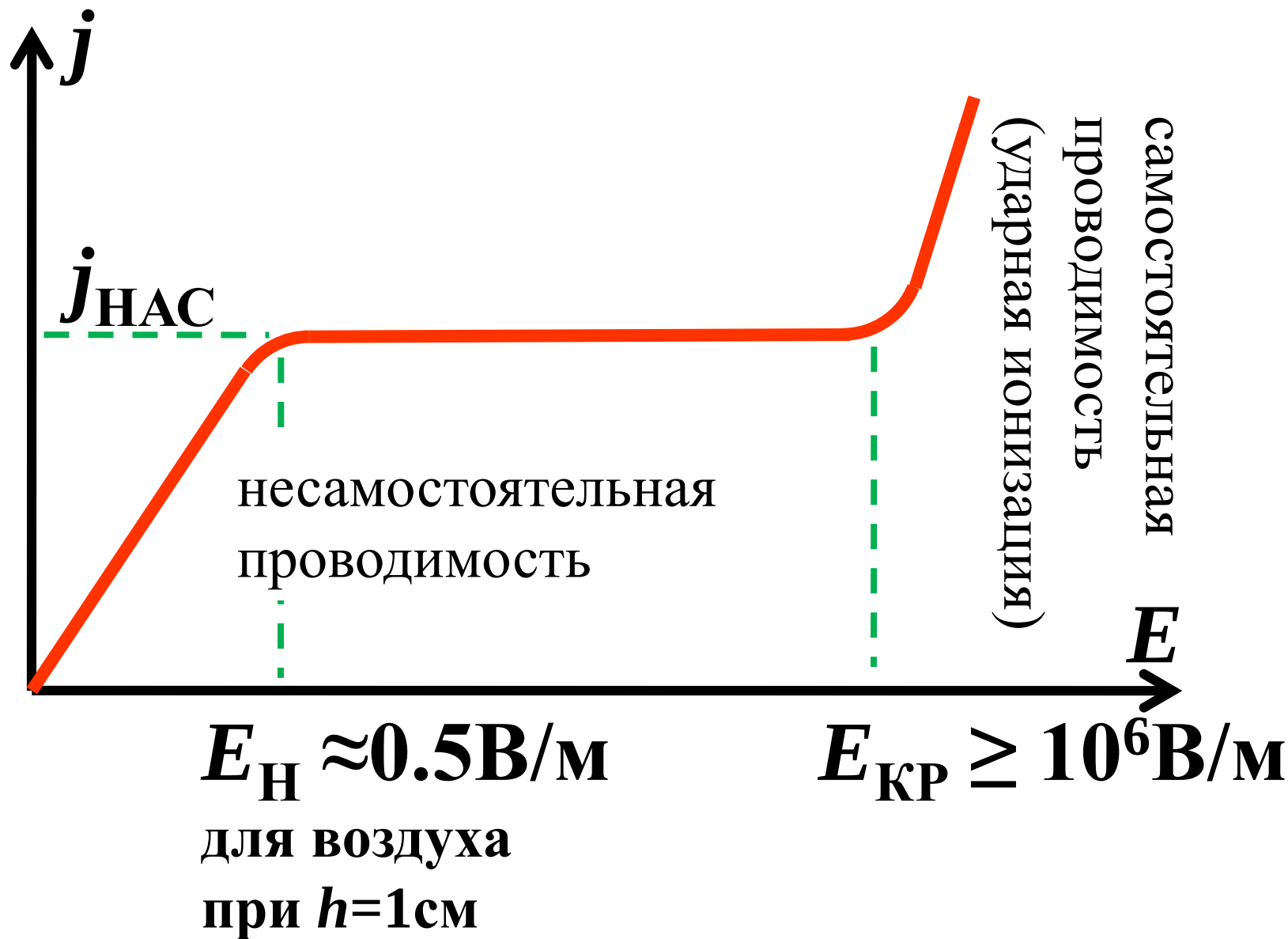
μ_- и μ_+ — подвижность ионов

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 3. 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; λ – длина свободного пробега; E – напряженность.

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ

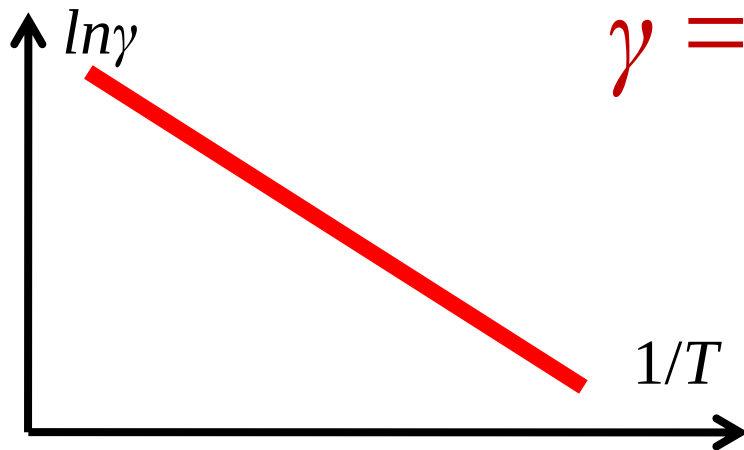
$$\gamma = qn(\mu_- + \mu_+)$$

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

W – энергия диссоциации молекул;

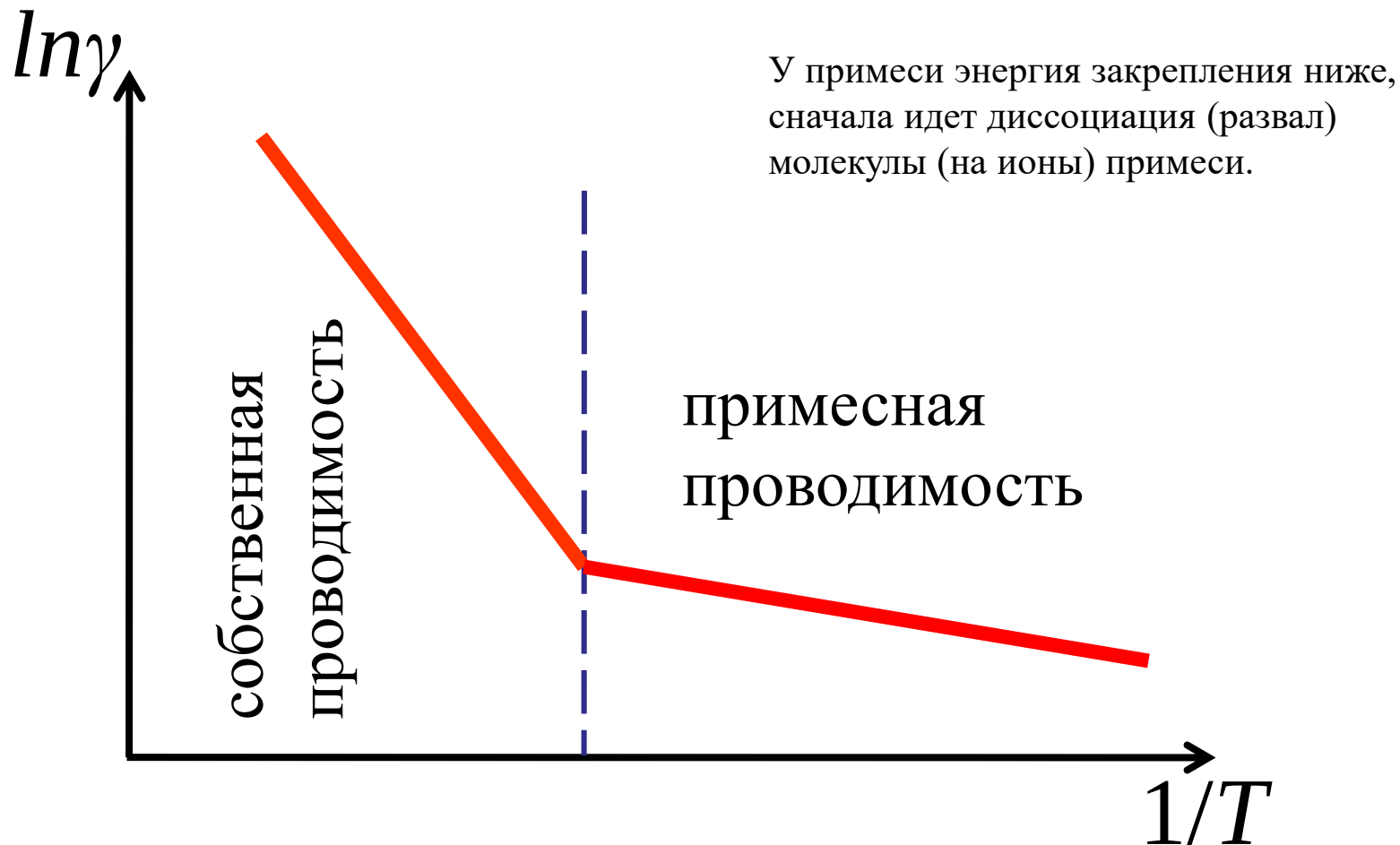
обозначим: $a = W/k, A = n_0(\mu_- + \mu_+);$

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



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.



В жидкостях рост γ (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 η* 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 γ 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

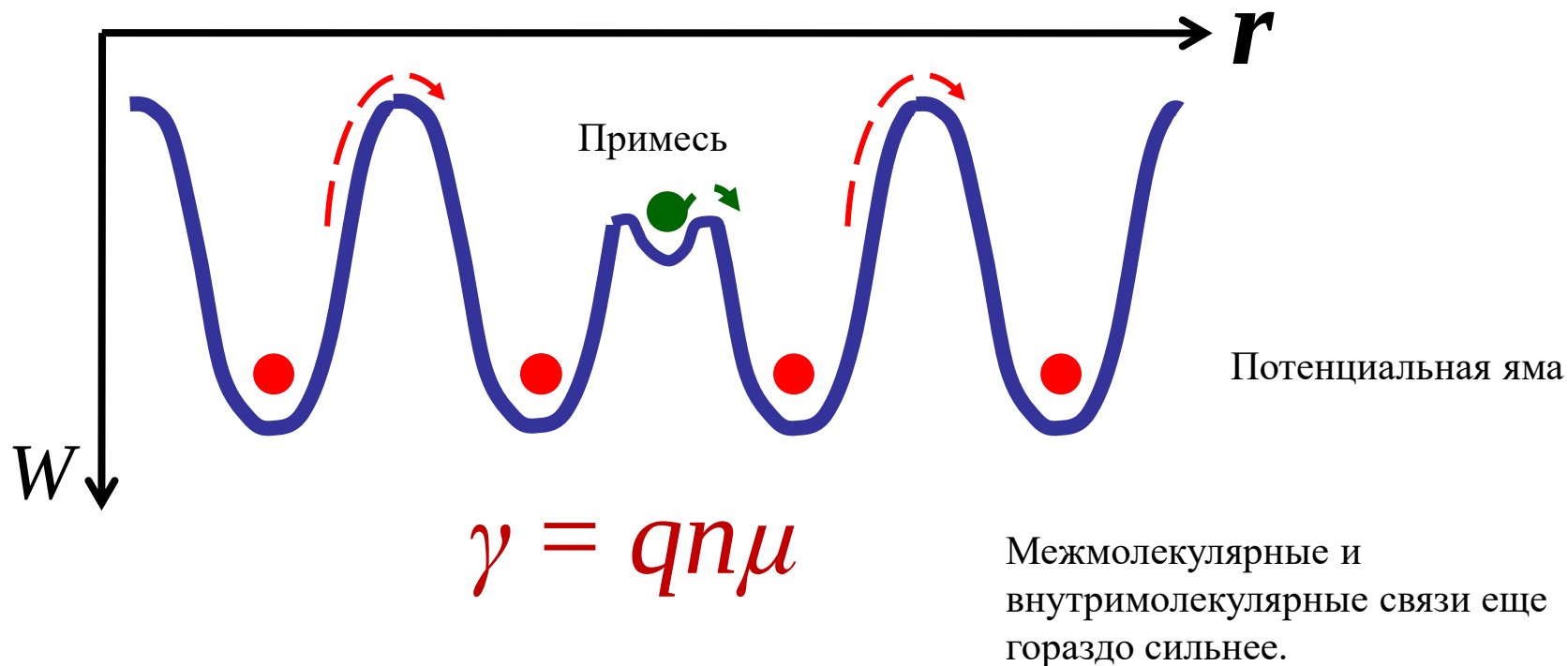
- *Диссоциация молекул легче* происходит в *полярных жидкостях*, чем в неполярных.
- В *неполярных жидкостях* молекулы основного вещества практически *не диссоциируют* на ионы. Их электропроводность обусловлена *примесями*, особенно *примесями полярных веществ*.
- *Стабильность эмульсий и суспензий*, 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:

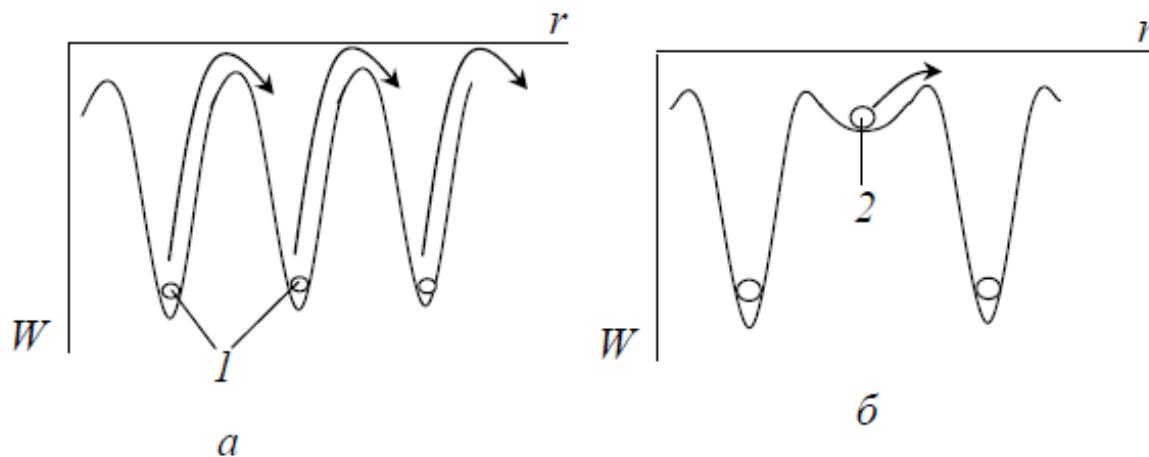


Электропроводность тв. диэл-в

- 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):
$$n_{\text{ион}} q \mu_{\text{ион}} \gg n_{\text{эл}} e \mu_{\text{эл}}.$$

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 μ с.н.з.:

$$n = n_0 \exp(-W_{\text{д}}/kT)$$

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

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

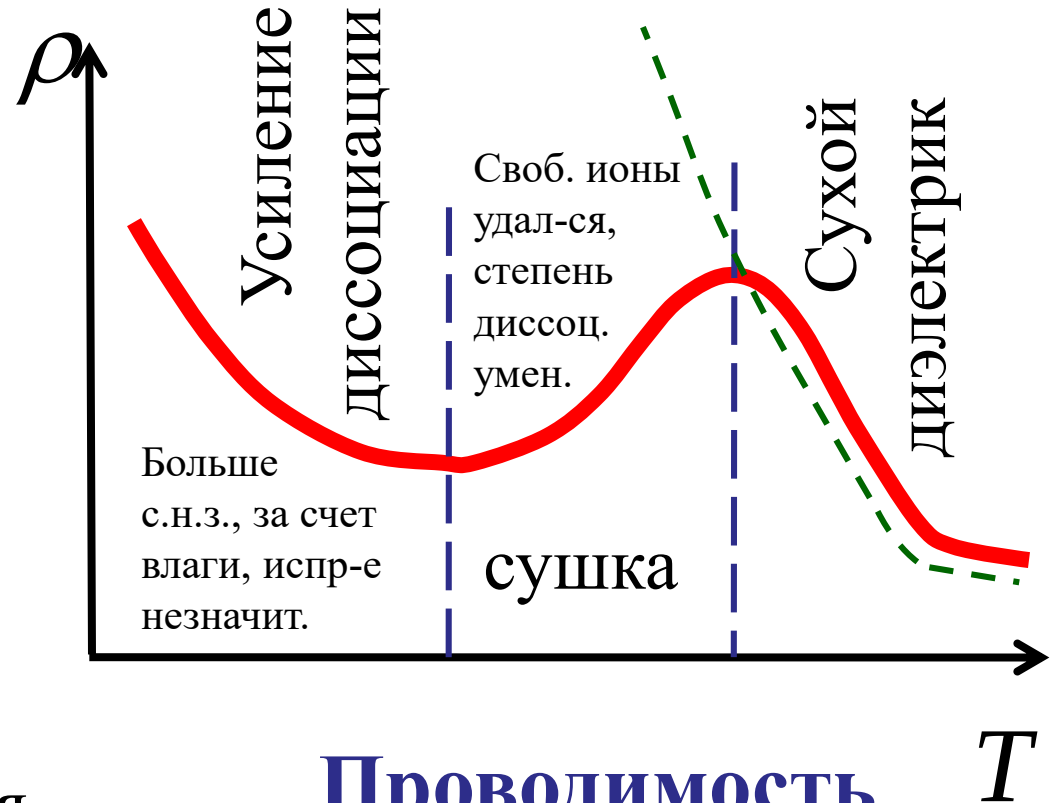
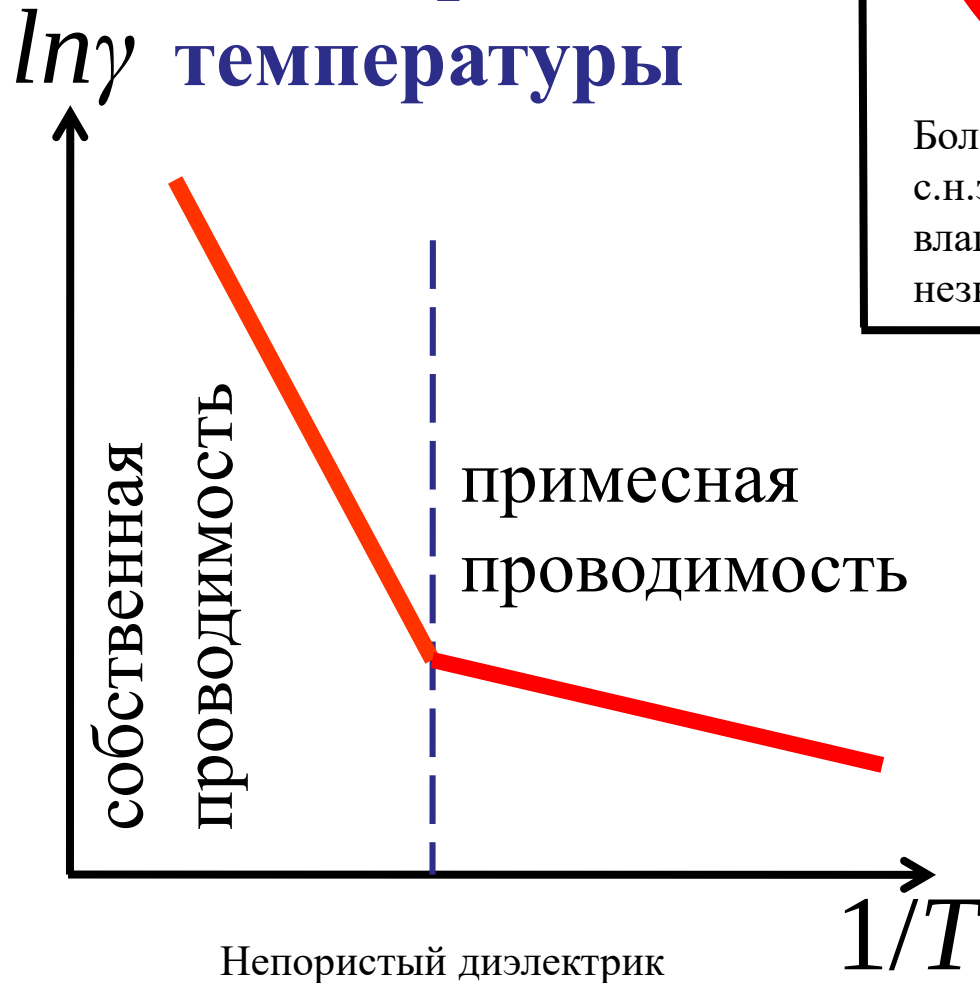
$W_{\text{п}}$ – энергия «перескока», необходимая для перехода иона из одного узла кристаллической решётки в другой

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

$$A = qn_0\mu_0$$

$$b = (W_{\text{д}} + W_{\text{п}})/k$$

Зависимость проводимости диэлектрика от температуры



Проводимость увлажнённого диэлектрика

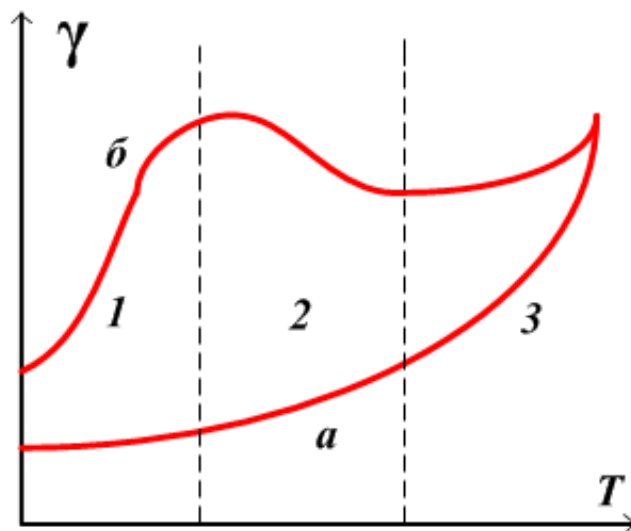
Пористый диэлектрик при наличии в нем влаги, даже в ничтожных количествах, резко увелич. свою эл-ть.

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 γ от температуры T для сухого (кривая a) и увлажненного (кривая b) диэлектриков.

Зависимость проводимости γ диэлектрика от напряжённости электрического поля E

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

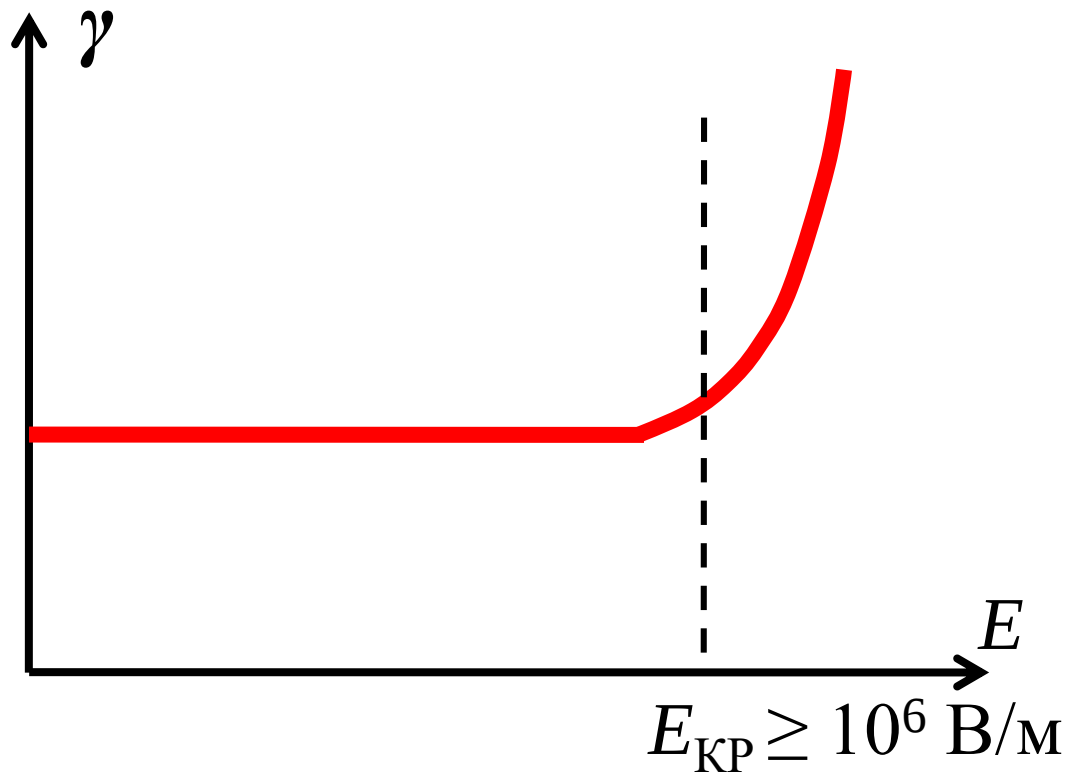
закон Пуля:

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

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

закон Френкеля:

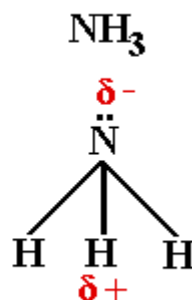
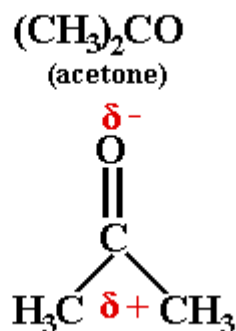
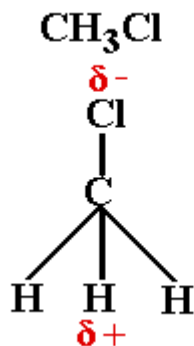
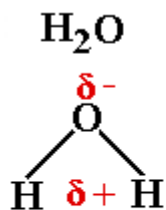
$$\gamma = \gamma_0 \exp(\beta_2 \sqrt{E})$$



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.