

# **Електричен ток в газове**

*Доц. д-р Т. Йовчева*

## Електричен ток в газове.

- Газовете при нормални условия са изолатори и не провеждат електричен ток. Молекулите им са неутрални.
- Газовете стават проводящи, ако се йонизират, т. е. създават се определен брой йони в тях. Източникът на йонизация се нарича **йонизатор**.
- Йонизацията на газа се осъществява по различни начини:
  - Нагриване на газа;
  - Йонизиращи лъчения:
    - ултравиолетови лъчи;
    - рентгенови лъчи;
    - радиоактивни лъчи.
- Електричният ток в газовете се нарича също и **газов разряд**.

## 2. Несамостоятелна проводимост

### а) Определение

- Когато електричният ток в газовете се дължи на действието на външен йонизатор, който създава определен брой йони, се наблюдава несамостоятелна проводимост.
- Под действие на йонизатора от неутралните молекули се получават едновалентни положителни и отрицателни йони.
- Ако някои от електроните или йоните преминат към макроскопични частици (прашинки, капки вода, намиращи се във въздуха) се образуват тежки или Ланжвенови йони.
- Ако на йонизирания въздух се приложи външно електрично поле (ЕП), то ще се започне насочено движение на йони – протича електричен ток.

Аналогично на електролити:

$$(1) \quad j = ne(u_+ + u_-)E$$
$$\vec{j} = ne \cdot \vec{v}$$

$u_+$ ,  $u_-$  - подвижности на положителните и отрицателните йони, много по-големи от тези на електролитите;  
 $n$  – брой молекули, дисоциирани на йони в единица обем, т.е. ( $n$  положителни йони и  $n$  отрицателни йони).

$$n = f(\vec{E}),$$

т.е. концентрацията на йоните ( $n$ ) в газовете е малка и протичането на ел. ток може да наруши баланса в целия обем и да измени концентрацията  $n$ .

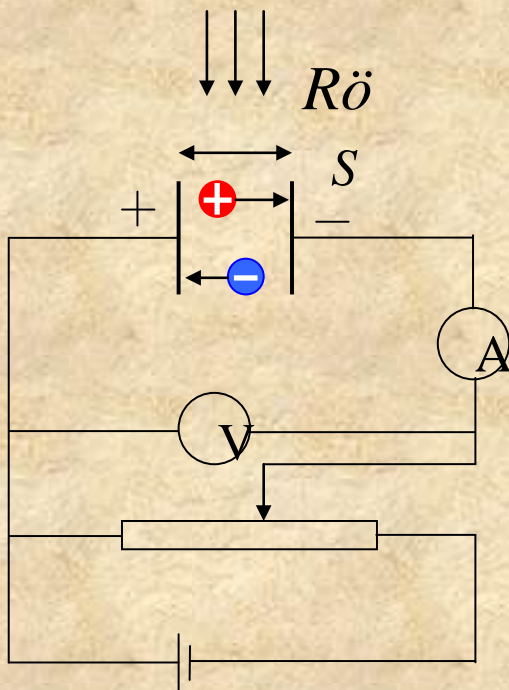
Следователно, ур. (1) само формално е закон на Ом.

В общия случай при газовете зависимостта  $\vec{j} = f(\vec{E})$  не е линейна.

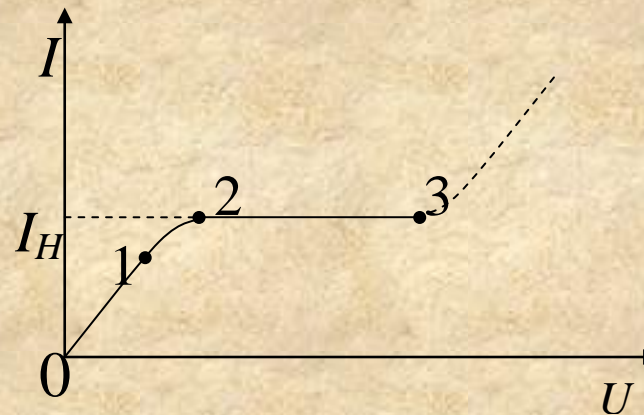
## б) Опитна постановка

За изследване на зависимостта  $j = f(E)$  разглеждаме верига, съдържаща отворена част  $L$ , запълнена с газ, подложен на непрекъснато въздействие на йонизатор с постоянен интензитет (в сл.  $R\ddot{o}$  лъчи).

Фиг. 1.



Фиг. 2.



01 – закон на Ом (линейна зависимост)

23 – област на насищане

## в) Основно уравнение за броя на йоните ( $n$ ) в единица обем

За да съставим йонния баланс в газовете ще разгледаме основните процеси, протичащи при несамостоятелната проводимост:

### 1) Йонизация

Йонизаторът създава за единица време в единица обем  $\alpha$  двойки йони:

$$\Delta n = \alpha - \text{дисоцирала йони}$$

В обем  $V = SL \rightarrow \Delta n = \alpha SL$  - дисоцирала йони

### 2) Рекомбинация

Между йоните съществуват сили на взаимодействие, в резултат на което настъпва рекомбинация (молизация)  $\Rightarrow$  в единица обем за единица време изчезват  $\Delta n'$  двойки йони:

$$\Delta n' = \beta n^2 - \text{рекомбинирали йони}$$

В обем:  $V = S.L \rightarrow \Delta n' = \beta n^2 SL$  - рекомбинирали йони.

### 3) *Електричен ток*

В резултат на протичането на ел. ток, йоните също намаляват.

Положителните йони достигат до катода, приемат електрони и се превръщат в неутрални радикали (атоми, молекули).

Аналог. отрицателните йони достигат до анода, отдават електрони и се превръщат в неутрални радикали (атоми, молекули).

В обем  $V = S \cdot L$  за единица време протича ток:

$$I = \frac{dq}{dt} = e \frac{dn}{dt}$$

Това води до намаляването на йоните с:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{I}{e} \text{ или } \frac{dn}{dt} = \frac{jS}{e}$$

Основното уравнение на йонния баланс в обем  $V = S.L$ , което дава изменението на общия брой йони за 1 време в обем  $V$  е:

$$\boxed{SL \frac{dn}{dt} = \alpha SL - \beta n^2 SL - \frac{jS}{e}}$$

$SL \frac{dn}{dt}$  - изменението на броя йони за 1 време в обем  $V$ .

Или изменението на броя йони в 1 обем за 1 време е:

$$(2) \quad \boxed{\frac{dn}{dt} = \alpha - \beta n^2 - \frac{j}{eL}}$$

При равномерна йонизация ( $\alpha = const$ ) се установява динамично равновесие, т.е.  $n = const \Rightarrow \frac{dn}{dt} = 0$

$$(3) \quad \boxed{\alpha = \beta n^2 + \frac{j}{eL}}$$



## г) Случаи на различни електрични полета

### ▪ Слаби ел. полета

Основният механизъм за намаляване на йоните е

рекомбинацията, т.е.  $\frac{j}{eL} \ll \beta n^2$

$$\text{От (3)} \quad \Rightarrow \alpha = \beta n^2, \quad n = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} = \text{const.}$$

$$\text{От (1)} \quad \Rightarrow \vec{j} = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \cdot e(u_+ + u_-) \cdot \vec{E}$$

$$(4) \quad \sigma = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \cdot e(u_+ + u_-)$$

При слаби ел. полета се изпълнява законът на Ом. Линеината зависимост– ур.(4) отговаря на участък (01) от фиг. 2.

▪ *Силни ел. полета*

Основният механизъм за намаляването на йоните е протичащият ток (т.е. прилагането на  $\vec{E}$ ).

$$\frac{j}{eL} \gg \beta n^2$$

От (3)  $\Rightarrow \alpha = \frac{j}{eL} \Rightarrow j = e \alpha L = const = j_H.$

При силни ел. полета токът достига наситената си стойност:

$$I_H = j_H S = e \alpha L S$$

Тогава йоните и електроните, създадени за единица време от външния йонизатор, успяват за същото време да достигнат електродите без да рекомбинират и протича  $I_H$ .

Зависимостта от ур. (3) отговаря на участък (23) от фиг. 2.

Следователно, ур. (2) правилно обяснява опитните резултати от фиг. 2 -  $I = f(U)$ .

### 3. Самостоятелна проводимост на газове

#### а) Определение

Самостоятелна проводимост е тази, за поддържането на която не е необходим външен източник, който да йонизира газа, т. е. йонизатор. В този случай токът, протичащ между електродите сам йонизира газа.

Без наличие на йонизатор, винаги в газовете има известен брой йони, образувани от излъчването на радиоактивни вещества, намиращи се на Земята или от космическото лъчение.

Тези йони под действието на приложено ЕП започват да се движат насочено.

Разстоянието между два последователни удара, се нарича *свободен пробег* ( $\lambda$ ).

Осъществяват се удари йон – йон или йон – молекула.

Интензитетът на приложеното ЕП е:  $E = \frac{U}{L}$ ,

$U$  – приложено напрежение;  $L$  – разстоянието между плочите.

Ако  $\Delta\varphi$  е потенциалната разлика между две точки на разстояние  $\lambda$ :  $\Delta\varphi = E\lambda = \frac{U}{L}\lambda$ .

ЕП ще извърши работа  $A$ , за да премести йон със заряд  $q_0$  на разстояние  $\lambda$ :  $A = q_0\Delta\varphi$ .

В резултат на това йонът (или електронът) преди удара ще получи кинетична енергия:

$$(5) \quad E_k = A = q_0 \frac{U}{L} \lambda.$$

Уравнение (5) изразява кинетичната енергия, която йонът (или електронът) придобива по време на свободния си пробег  $\lambda$  в ЕП с интензитет  $\vec{E}$ .

## б) Случаи на различни електрични полета

В зависимост от интензитета  $\vec{E}$  на ЕП (т. е.  $\Delta\varphi$ ) са възможни няколко случая:

1) *Слаби ел. полета:  $\Delta\varphi \leq 1V$*

Ударът на йоните с молекулите е пъргав (еластичен). Поради това, че масите им са приблизително еднакви, те разменят скоростите си, т.е. йонът отдава кинетичната си енергия на молекулата, следователно газът се загрява.

$$\text{От ЗЗИ: } m_{\text{йон}} v_{\text{йон}} = m_{\text{молекула}} v_{\text{молекула}};$$

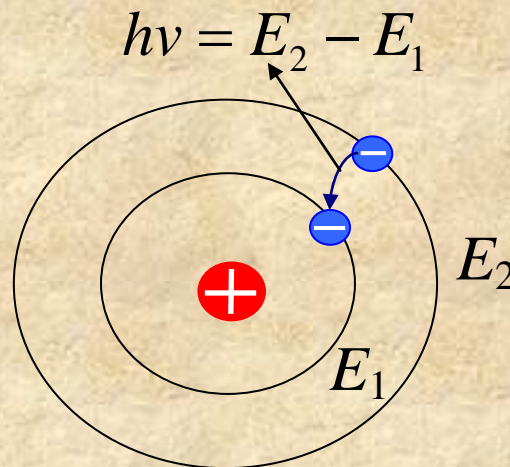
$$m_{\text{йон}} \approx m_{\text{молекула}} \Rightarrow v_{\text{йон}} = v_{\text{молекула}}$$

$$E_{\text{молекула}} = \frac{m v_{\text{йон}}^2}{2} = E_{\text{йон}}$$

Наблюдава се загряване на газа.

2) По-силни ел. полета:  $\Delta\phi > 1V$

В резултат на удара на йона с молекулата, молекулата се „възбужда“, т. е. електронът от по-вътрешна орбита преминава на по-външна. „Възбуденото“ състояние е нестабилно и молекулата се връща в нормално състояние, с излъчване на светлина с определена честота, следователно имаме светене на газа.



Фиг. 3.

Наблюдава се светене на газа.

### 3) Силни ел. полета: $\Delta\varphi \approx 10 \div 30V$

Енергията на йона става достатъчно голяма, за да избие на един или няколко електрона от молекулата, т. е. за да йонизира молекулата. Получените йони от своя страна също се ускоряват и могат да предизвикат йонизация.

Този процес на йонизиране на газа се нарича **ударна йонизация**.

От (5)  $\Rightarrow E_k = q_0 \frac{U}{L} \lambda \Rightarrow E_k \sim U\lambda$ , но  $\lambda \sim \frac{1}{p}$ ,  $p$  – налягане на газа.

Следователно:  $E_k \sim \frac{U}{p}$

Условието за осъществяване на газов разряд се определя от закон на Пашен  $U_{np} = f(pL)$ :

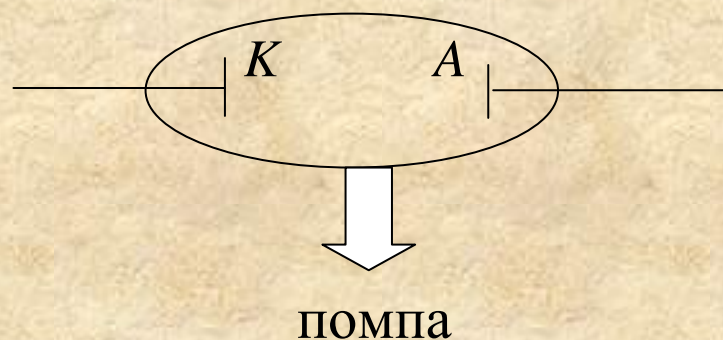
$$U_{np} = \frac{pL}{\ln(pL) + \delta}, \quad \delta = const$$

$U_{np}$  - пробивно напрежение, при което се наблюдава ударна йонизация, т. е. самостоятелен газов разряд.

## 4. Видове самостоятелна проводимост

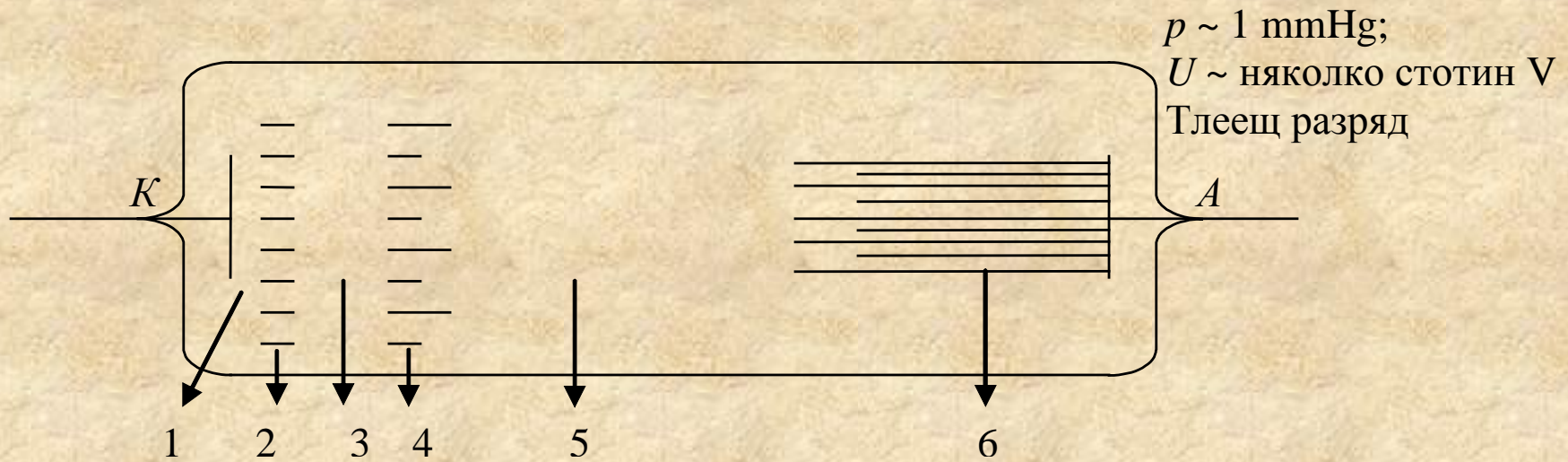
### а) Тлеещ разряд

Наблюдава се при ниски налягания ( $p \sim 1 \text{ mmHg}$ )



Най-напред между двата електрода от К към А възниква разряд във вид на светещ, извиващ се шнур с червеникав цвят. При по-нататъшно намаляване на налягането, шнурът постепенно се разширява и запълва цялото сечение на тръбата. Установява се тлеещ разряд.

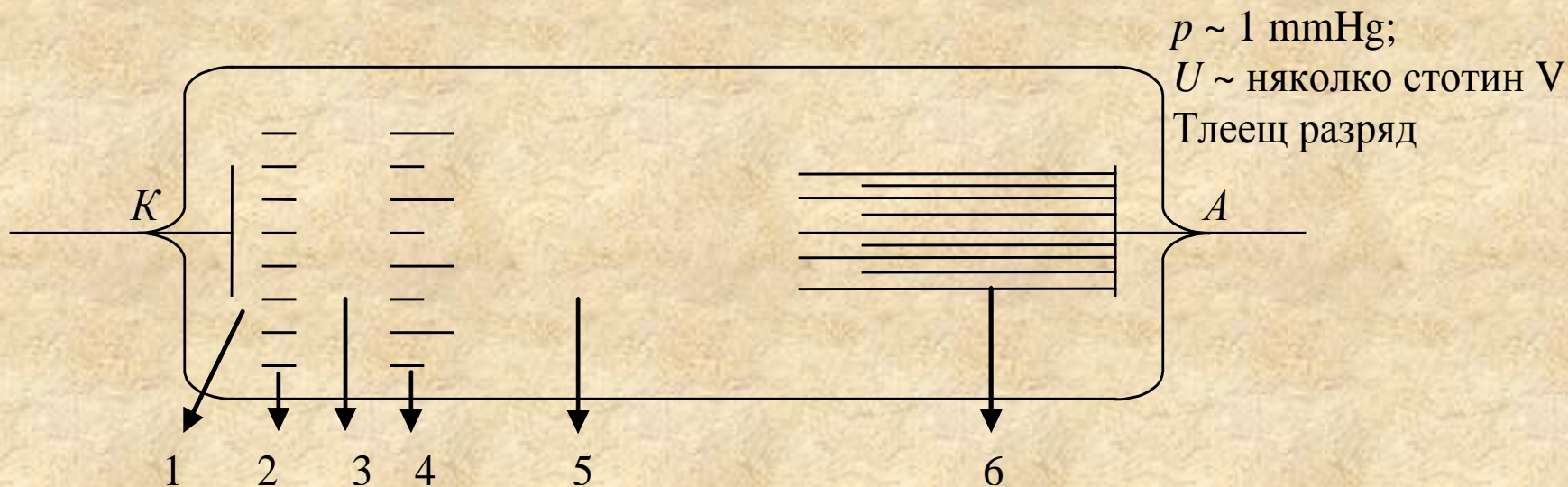




1 – *Астоново тъмно пространство* – Избитите от катода електрони (вторична емисия на електрони от катода) се ускоряват от полето.

2 – *Катодно светене* - Ускорените електрони възбуждат молекулите на газа, които се връщат в нормално състояние с изпускане на кванти светлина. Така възниква *катодното светене*.

3 – *Катодно (Круксово) тъмно пространство* – Електроните по-често йонизират, отколкото възбужда. Образуват се много йони и вторични електрони.



4 – *Област на тлеещо светене* – Поради високата концентрация на електрони и йони настъпва интензивен процес на рекомбинация между електрони и йони – наблюдава се светене – **рекомбинационно светене**;

5 – *Фарадеево тъмно пространство* – в резултат на по-малката концентрация, вероятността за рекомбинация пада – тъмно. В края на това поле електроните се ускоряват.

6 – *Област на положително (анодно) светене* – светещ йонизиран газ или газоразрядна плазма. Светенето е следствие на прехода от възбудено в основно състояние на молекулите. За различните газове, молекулите излъчват при различни дължини на вълните – различен цвят на светене

- Основните процеси, които поддържат разряда, протичат на катода - вторична емисия на електрони от катода, получени при бомбандирането му с йоните и ударна йонизация на молекулите на газа от излезлите от катода електрони. Образувалите се при ударната йонизация положителни йони се ускоряват към катода и избиват от него нови електрони, които на свой ред отново йонизират газа и т.н.
- Ако налягането се понижи до  $p \sim 0.001 \text{ mmHg}$ :
  - Електроните избити от  $K$  преминават през газа, почти без да се удрят с газовите молекули, ускоряват се от полето и удряйки се в стъклото предизвикват неговото светене, наречено катодолуминисценция. Този поток от праволинейно движещи се електрони се нарича *катодни лъчи*.
  - Ако в  $K$  се пробие малък отвор, положителните йони, бомбандиращи  $K$ , преминават през отвора и образуват рязко ограничен сноп праволинейно движещи се положителни йони, наречен *канални лъчи*.

## Приложение на тлеещ разряд при източниците на светлина:

- *Светлинни рекламни тръби* – Използват се различни газонапълнени тръби, които светят различно поради характерния цвят на областта на положително светене за всеки газ:
- неон – червено, аргон – синьо-зелено, въздух – розово.
- *Луминисцентни лампи* – Имат осветление, близко до дневното и са по-икономични от нагревателните лампи. Излъчването на тлеещия разряд, което се осъществява в живачни пари, се поглъща от нанесеното на вътрешната страна на тръбата флуорисциращо вещество (люминофор). Луминофорът свети под въздействието на погълнатото излъчване.
- *Глимлампи*
- *Катодно разпрашване на метали* – При бомбандиране на К с положителни йони, веществото на К се нагрива силно и преминава в прахообразно състояние. Ако около К се поставят различни предмети, те се покриват с равномерен слой метал.

## б) Искров разряд

- ✚ Наблюдава се между студени електроди при атмосферно налягане и силно ЕП:  $E \sim 3 \cdot 10^5 \frac{V}{cm}$ .
- ✚ Искрата има сложен трептелив характер - наблюдават се непрекъснато изменящи се, ярко светещи, зигзакообразни разклонени канали, които пронизват пространството между електродите.
- ✚ Началото на разряда е пробив на диелектрика (газа), т. е. ударна йонизация. Тя става не в целия обем между електродите (така би било при еднородно ЕП), а в отделни канали, в които концентрацията на йоните случайно се е оказала по-висока (зигзагообразни канали).
- ✚ Искрата се съпровожда с отделяне на голямо количество топлина, силно светене на газа и гръм.
- ✚ Характерен пример за искра е светкавицата.

## в) Дъгов разряд

✚ Ако след запалването на искров разряд от мощен източник, постепенно се намалява разстоянието между електродите, разрядът става непрекъснат – възниква дъгов разряд. При това токът рязко нараства, а напрежението в газоразрядната междина намалява.

✚  $\left. \begin{array}{l} p - \text{атмосферно} \\ U \approx 30 \div 40V \end{array} \right\} \Rightarrow \text{голям ток} \sim 10^3 \text{ A}$

✚ Дъгов разряд може да се получи от източник на ниско напрежение, като електродите (напр. въглеродни) се допират, нагряват се силно от протичащия ел. ток и се разделят.

✚ Основна причина за поддържането на дъгата е термоелектронна емисия от катода.

✚ Двата електрода се нагряват до висока температура, в резултат на бомбандирането – анодът от електрони, а катодът – от положителни йони.

✚ При  $p_{atm}, T_k \sim 4000^\circ C$ .

✚ При повишено налягане, температурата достига до  $6000^\circ C$  и затова се наблюдава интензивна *термоионизация*.

✚ Приложение:

- източник на светлина – прожектори, проекционни апарати и др.;
- дъгови лещи – поради нарастване на температурата;
- рязане и заварка на метали

## г) Коронен разряд

- ✚ Възниква във високоволтово силно нееднородно ЕП – около остриета или тънки проводници под високо напрежение.
- ✚ Ударната йонизация и светенето на газа става близо до електрода - острие.
- ✚ Приложение:
  - при далекопроводи – причинява загуба на електрична енергия;
  - Гайгер-Мюлерови броячи на йонизиращи частици



## д) Плазма

1) Йонизиран квазинеутрален газ (сумарният заряд във всеки електронен обем е равен на нула, т. е. броят на положителните йони е равен на броя на отрицателните йони и електрони).

2) Значителна част от молекулите на газа са йонизирани и той се превръща в система от бързодвижещи се йони и електрони.

3) Това е т. нар. четвърто състояние на веществото – плазмено.

4) Получава се при:

- много силни ЕП при газов разряд – *газоразрядна плазма*;
- при много високи температури – *високотемпературна плазма*

5) При  $T > 10^4 \text{ K}$  всяко вещество е плазма.

## *Характерни физични свойства на плазмата:*

- Електропроводимостта на плазмата е голяма. Всички частици са електрически заредени и имат голяма подвижност.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}:$$

- ❖ При слаби полета  $\sigma$  не зависи от  $\vec{E}$ ;
- ❖ При силни полета  $\sigma \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$ .

- Температурата на газа е от 15000 до 80000K.
- Плазмата представлява смес от два газа – йонен и електронен, всеки от които се характеризира със своя температура. Обмен на енергия между двата газа почти не става и те си запазват температурата.

- Върху плазмата влияе и магнитното поле.
- Когато имаме движение на плазма в даден цилиндър, собственото МП на плазмата предизвиква свиване на плазмата в посока перпендикулярна на посоката на движение. Това явление – „пинч ефект” (пинч-шнур) води до откъсване на плазмата от стените на съда, в който става газовият разряд и образуване на тънък плазмен шнур.

Пример за плазмен шнур – мълнията.

- Управляем термоядрен синтез:
  - Основен проблем: създаване на устойчива високотемпературна плазма ( $10^2 keV$ ), в която да се осъществи реакцията на синтез на деутерий и тритий.