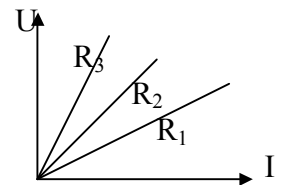


## 13 Elektrický prúd v látkach

- z hľadiska vedenia elektrického prúdu rozdeľujeme látky na **vodiče** (merný elektrický odpor je rádovo  $10^{-7}$  až  $10^{-8}$   $\Omega\cdot\text{m}$ ), **polovodiče** (merný elektrický odpor je rádovo v intervale  $10^{-2}$  až  $10^9$   $\Omega\cdot\text{m}$ ) a **izolanty (dielektriká)** (merný elektrický odpor je rádovo väčší ako  $10^9$   $\Omega\cdot\text{m}$ )

### 13.1 elektrický prúd v kovoch

- kovy sú polykryštalické látky s kovovou väzbou. Kryštalová mriežka je utvorená z kladných iónov, medzi ktorými sa neusporiadane pohybujú valenčné elektróny, ktoré sú spoločné pre všetky atómy kovu ako celku a môžu sa v ňom voľne pohybovať – sú to **voľné elektróny**.
- elektrický prúd v kovoch tvoria iba voľné elektróny – **elektrónová vodivosť kovov**, a tak vznikla **teória elektrónovej vodivosti kovov**
  - o elektrický prúd v kovoch tvoria iba voľné elektróny, ktoré majú dostatočnú energiu – **vodivostné elektróny**
  - o vodivostné elektróny konajú v kove tepelný pohyb (stredná rýchlosť tohto pohybu je rádovo  $10^5$   $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  až  $10^6$   $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; jej zmena s teplotou je zanedbateľná). Energia vodivostných elektrónov môže nadobudnúť iba isté hodnoty, je kvantovaná.
  - o v dôsledku tepelného pohybu vodivostných elektrónov v kove, ktorý nie je v elektrickom poli, sa celkový náboj prenesený týmito elektrónmi ľubovoľným prierezom vodiča rovná nule, takže aj elektrický prúd je nulový
  - o keď kovový vodič zapojíme na zdroj jednosmerného napätia, vznikne v ňom elektrické pole s intenzitou  $\vec{E}$ . Na každý vodivostný elektrón pôsobí sila  $\vec{F}_e = -e\vec{E}$ , kde  $e$  je veľkosť náboje elektrónu. pôsobením tejto sily získavajú vodivostné elektróny okrem okamžitej rýchlosti dodatočnú rýchlosť, ktorá sa volá **unášavá rýchlosť** ( $10^{-6}$   $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  až  $10^{-4}$   $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), preto vodivostné elektróny konajú okrem tepelného pohybu aj usporiadaný pohyb od zápornej svorky ku kladnej svorke zdroja; v kovovom vodiči vznikne tak jednosmerný elektrický prúd
  - o po zapojení na zdroj so stálym elektromotorickým napätím vznikne veľmi rýchlo konštantný prúd. V procese vedenia elektrického prúdu odovzdávajú vodivostné elektróny získanú hybnosť kryštalovej mriežke kovu (príčinou sú poruchy kryštalovej mriežky a tepelný kmitavý pohyb iónov mriežky) – s tým súvisí existencia elektrického odporu
- graf závislosti elektrického napätia od elektrického prúdu (**voltampérová charakteristika**):



### 13.2 elektrický prúd v polovodičoch

- medzi polovodiče patria niektoré chemické prvky (kremík, germánium, uhlík, selén, telúr), niektoré chemické zlúčeniny (sulfid olovnatý, sulfid kademnatý), ale aj niektoré organické látky (hemoglobín)
- typickým znakom polovodičov je, že **merný elektrický odpor polovodičov  $\rho$  so zvyšujúcou teplotou sa rýchlo znižuje** (v kovoch sa naopak  $\rho$  so zvyšujúcou teplotou mierne zväčšuje)
  - o so zvyšujúcou sa teplotou sa zväčšujú rozkmity častíc v mriežke, čo spôsobuje zväčšenie  $\rho$ . Znižovanie hodnoty  $\rho$  v polovodičoch spôsobuje to, že so zvyšujúcou sa teplotou v polovodičoch nastáva prudké zväčšenie hustoty voľných elektrónov, ktoré vedú elektrický prúd, tým sa polovodiče stávajú vodivými
  - o veľká teplotná závislosť odporu polovodiča sa v praxi využíva pri **termistoroch** Termistor je jednoduchá polovodičová súčiastka, ktorá sa skladá z kúska polovodiča a dvoch elektrických prívodov. Meraním odporu termistora môžeme nepriamo merať teplotu danej látky s presnosťou až na  $10^{-3}$  K

### 13.2.1 vlastné polovodiče

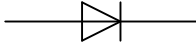
- pri vyšších teplotách kmity atómov mriežky môžu vyvolať porušenie väzieb medzi atómami, a tak zrušením niektorých väzieb vznikajú dva typy voľných častíc s nábojom – **voľné elektróny** a tzv. **dieri** (častice s kladným elektrickým nábojom); hovoríme o vzniku, čiže **generácií** párov elektrón – diera
- pojmom **diera** charakterizujeme situáciu, keď uvoľnený valenčný elektrón chýba vo väzbe medzi atómami. kladný náboj získa diera z prebytku kladných nábojov atómového jadra, ktoré bolo pred uvoľnením valenčného elektrónu v rovnovážnom stave. Diera teda nepredstavuje skutočnú časticu s nábojom, akou je napr. protón
- pri stretnutí voľného elektrónu s dierou obsadí voľný elektrón prázdne miesto v chemickej väzbe, čím nastane zánik páru voľný elektrón – diera. Z voľného elektrónu sa opäť stane valenčný (väzbový) elektrón; zánik týchto párov sa nazýva **rekombinácia**
- bez prítomnosti elektrického poľa v polovodičoch je pohyb voľných elektrónov a dier chaotický (pohyb diery si predstavujeme tak, že niektorý z valenčných elektrónov susedných väzieb (v danom okamihu ešte neporušených) preskočí na miesto väzby porušenej. Tým obnoví pôvodne porušenú väzbu a spôsobí zánik diery. Súčasne sa objaví diera na inom mieste, takže diery „putujú“ po kryštáli vodiča)
- keď je v polovodičoch elektrické pole, potom sa voľné elektróny pohybujú proti smeru a diery v smere vektora intenzity tohto poľa. V polovodiči vznikne elektrický prúd. Keďže oba druhy častíc majú opačné náboje a pohybujú sa v opačných smeroch, tak **výsledný elektrický prúd  $I$  v polovodiči** sa rovná súčtu elektrónového prúdu  $I_e$  a dierového prúdu  $I_d$ :
  - o  $I = I_e + I_d$
  - o tento typ elektrickej vodivosti sa nazýva **vlastná vodivosť**, lebo je umožnená vlastnými elektrónmi atómov polovodičov. Látky s touto vodivosťou tvoria **vlastné polovodiče**
- so zvyšujúcou sa teplotou sa zvyšuje hustota voľných elektrónov a dier, tým sa znižuje elektrický odpor (neplatí Ohmov zákon)

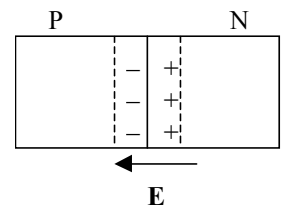
### 13.2.2 nevlastné (prímesové) polovodiče

- pridaním niektorých prímiesi do polovodičov môžeme dosiahnuť, aby v polovodiči prevažovala elektrónová alebo dierová vodivosť
- keď v kryštáli kremíka nahradíme niektorý atóm štvormocného kremíka päťmocným atómom fosforu, tak štyri elektróny sa zúčastnia na kovalentnej väzbe, no piaty elektrón je k fosforu veľmi slabo viazaný, a tak už pri nízkej teplote sa od neho odpúta a stane sa voľným elektrónom (diera nevznikne). V kremíku je nadbytok voľných elektrónov, a tak takýto polovodič sa nazýva **polovodič s elektrónovou vodivosťou (polovodič typu N)**
  - o prímesové atómy, ktoré z polovodičovej látky tvoria polovodič typu N, nazývajú sa **donory** (poskytujú voľné elektróny). Pre kremík a germánium sú donormi napr. fosfor, dusík, arzén, antimón, bizmut
- keď do kryštálu mriežky kremíka zabudujeme atóm trojmocného prvku (napr. indium), chýba mu na plné obsadenie väzby jeden valenčný elektrón. Vznikne diera bez vzniku voľného elektrónu. Vodivosť spôsobená dierami sa volá **dierová vodivosť polovodiča (polovodič typu p)**
  - o prímesové atómy, ktoré spôsobujú vodivosť typu P, nazývajú sa **akceptory** (od svojho okolia sú schopné prijať väzbový elektrón, čím vznikajú diery). Pre kremík a germánium sú akceptormi napr. indium, bór, hliník, gálium
- elektrickú vodivosť tohto druhu nazývame **nevlastná vodivosť**, lebo je spôsobená prítomnosťou cudzích, nie vlastných atómov. Polovodiče s touto vodivosťou sa volajú **nevlastné (prímesové) polovodiče**
- v nevlastných polovodičoch elektrický prúd sprostredkuje jeden typ častíc (väčšinové – majoritné častice); v danom polovodiči sú aj voľné častice s opačným nábojom (menšinové – minoritné častice)

### 13.2.3 diódový jav

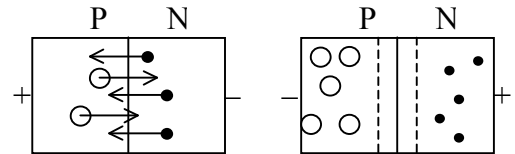
- rozhranie dvoch polovodičov s rozličným typom vodivosti sa volá PN prechod; pričom tento prechod sa vyznačuje tým, že má schopnosť usmerňovať – prepúšťať elektrický prúd iba jedným smerom

- polovodič s prechodom PN nazývame **polovodičová dióda** (značka )
- hustota voľných elektrónov a dier je v oboch častiach polovodiča rozmanitá, takže vzniká difúzia voľných elektrónov z polovodiča typu N do polovodiča typu P a naopak difúzia dier z P do N. Pri difúzii elektrónov z N do P zostanú v časti N v okolí rozhrania nevykompenzované kladné ióny donorov; v časti P voľné elektróny rýchlo rekombinujú s dierami, takže v blízkosti rozhrania sa v tejto časti utvoria nevykompenzované záporné ióny akceptorov. Analogicky prebieha opísaný dej pri difúzii dier z P do N, takže v okolí rozhrania zostávajú v časti P nevykompenzované záporné ióny akceptorov a v časti N nevykompenzované ióny donorov. V dôsledku týchto dejov sa v priestore okolo rozhrania utvára prechod PN ako elektrická dvojvrstva s iónmi opačnej polarizácie.



- vzniknuté elektrické pole v prechode PN zabraňuje ďalšej difúzii väčšinových voľných častíc s nábojom. Pri istej veľkosti intenzity elektrického poľa sa vytvorí rovnovážny stav. Prechod Pn je takmer bez voľných nabitých častíc, a preto má veľký elektrický odpor, ktorý rozhoduje o celkovom elektrickom odpore polovodiča.
- PN prechod spôsobuje prenos menšinových častíc (diery v N, voľné elektróny v P) do susednej oblasti, no v rovnovážnom stave počet dier a počet voľných elektrónov, ktoré prejdú do susednej časti, je rovnaký, takže výsledný elektrický prúd na prechode PN je nulový.
- keď polovodičovú diódu pripojíme k zdroju elektromotorického napätia, tak v polovodiči nastanú zmeny:

- o keď kladnú svorku zdroja pripojíme k P a zápornú k N, potom elektrické pole prechodu PN sa zoslabí elektrickým poľom zdroja napätia. V dôsledku porušenia rovnovážneho stavu

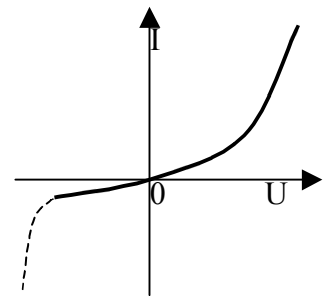


difundujú do oblasti prechodu diery so vzdialenejších miest časti P a voľné elektróny zo vzdialenejších miest časti N; to sa prejaví zmenšením elektrického odporu prechodu PN a elektrickým, obvodom začne pretekať prúd – hovoríme, že prechod PN je zapojený **v priepustnom smere** a že ním prechádza **priepustný prúd**

- o keď zmeníme polaritu vonkajšieho zdroja napätia, zväčší sa intenzita elektrického poľa prechodu PN. To vyvolá pohyb väčšinových voľných častíc smerom od rozhrania, takže sa oblasť prechodu ochudobnená on voľné častice s nábojom ešte viac rozšíri; elektrický odpor PN prechodu sa zväčší, takže diódou bude pretekať len veľmi malý elektrický prúd – hovoríme, že prechod PN je zapojený **v závernom smere** a že ním prechádza **záverný prúd**

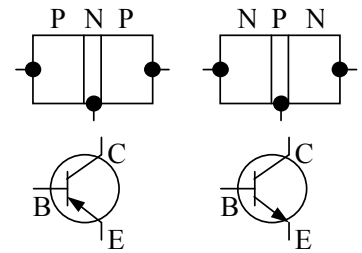
- graf závislosti elektrického prúdu prechádzajúceho polovodičovou diódou od napätia v dióde sa nazýva **voltampérová charakteristika polovodičovej diódy**

- o elektrický prúd v dióde nelineárne závisí od napätia na dióde
- o zvyšovaním napätia na dióde zapojenej v priepustnom smere sa prúd veľmi rýchlo zväčšuje (I. kvadrant)
- o pri zapojení diódy v závernom smere prechádza diódou malá záverný prúd (III. kvadrant, v grafe je znázornený v menšej mierke)



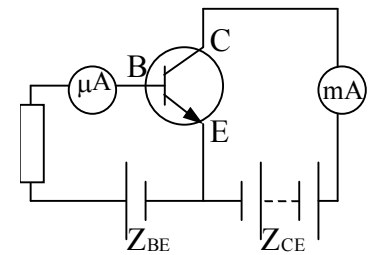
### 13.2.4 tranzistorový jav

- **tranzistor** je polovodičová súčiastka, ktorá obsahuje dva prechody PN. Z fyzikálneho hľadiska je tranzistor tvorený kryštálom polovodiča s tromi oblasťami s vodivosťou typu P, N a P, príp. N, P a N; podľa toho hovoríme o tranzistore PNP alebo NPN
- základná platnička (stredná časť polovodiča) medzi dvoma prechodmi PN sa nazýva **báza B**, ďalšie dve oblasti sú **kolektor C** a **emitor E**. Báza je v oblasti medzi prechodmi PN veľmi tenká (1–10 μm)
- používajú sa tri zapojenia tranzistora (so spoločnou bázou, so spoločným emitorom, so spoločným kolektorom)



- **zapojenie so spoločnou bázou:**

- o zdroje napätia sú zapojené do obvodu tak, že prechod PN medzi E a B je zapojený v priepustnom smere, kým prechod medzi B a C v závernom smere. Pri tomto zapojení prechádza emitorom pomerne veľký prúd (niekoľko mA), kým kolektorom by mal prechádzať iba nepatrný záverný prúd. V skutočnosti je kolektorový prúd takmer rovnako veľký ako emitorový prúd. Je to tak preto, že oba prechody PN sú veľmi blízko pri sebe, takže väčšina diér vstupujúcich z emitora do bázy difunduje až do blízkosti prechodu PN báza – kolektor, kde sú priťahované kolektorom. Takmer všetok emitorový prúd sa dostane tenkou bázou do kolektora. Zmena emitorového prúdu vyvoláva podobnú zmenu kolektorového prúdu. Kolektorový prúd je ovládaný emitorovým prúdom.
- o kolektorový prúd býva o niečo menší ako emitorový, lebo niektoré diery, ktoré, prechádzajú z emitora do bázy, sa do kolektora nedostanú. V báze rekombinujú, čím prispievajú k prúdu prechádzajúceho prívodom bázy. Prúd bázy je pritom oveľa menší ako kolektorový a emitorový prúd.



- dôležitým parametrom tranzistora je **prúdový zosilňovací činiteľ β** definovaný vzťahom:

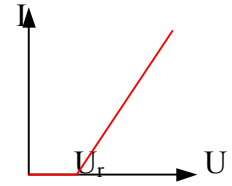
- o  $\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$  pri konštantnom napätí  $U_{CE}$ , kde  $\Delta I_C$  je zmena kolektorového prúdu a  $\Delta I_B$  zmena bázo­vého prúdu (ktorý vyvolal zmenu kolektorového prúdu) pri konštantnom napätí  $U_{CE}$  medzi kolektorom a emitorom. parameter  $\beta$  dosahuje v praxi hodnotu okolo 100.

### 13.3 elektrický prúd v elektrolytoch

- v kvapalinách sprostredkujú elektrický prúd voľné pohyblivé kladné a záporné ióny (katióny a anióny). Vznik voľných iónov rozpadom rozpustenej látky v rozpúšťadle nazývame **elektrolytická disociácia**
- vodivé roztoky nazývame **elektrolyty**; všeobecne vznikajú rozpúšťaním iónovej zlúčeniny v nejakom rozpúšťadle. Elektrolytmí sú napr. vodné roztoky solí (NaCl, KCl), kyselín (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>) a zásad (KOH, NaOH).
- ióny spolu s molekulami rozpúšťadla vykonávajú ustavičný neusporiadaný pohyb, no keď do elektrolytu vložíme dve elektródy a zapojíme ich na zdroj jednosmerného napätia, vznikne medzi elektródami vnútri elektrolytu elektrické pole, ktoré vyvolá usmerný pohyb iónov v roztoku. Katióny sa začnú pohybovať ku **katóde** (elektróde zapojenej na zápornú svorku zdroja) a anióny ku **anóde** (elektróde zapojenej na kladnú svorku zdroja). Usporiadaný pohyb iónov v elektrickom poli medzi elektródami tvorí elektrický prúd v elektrolyte. Podľa dohody je smer prúdu určený pohybom kladných iónov.

### 13.3.1 závislosť prúdu v elektrolyte od napätia

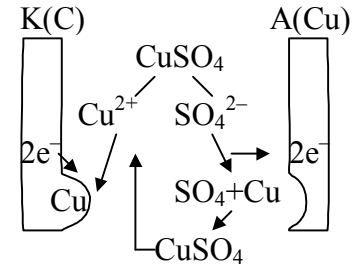
- keď elektródy v elektrolyte zapojíme na malé napätie, miliampérmeter zaznamená malý prúd, ktorý rýchlo zanikne. Pri pomalom zvyšovaní napätia sa tento jav opakuje. Trvalý prúd vzniká, keď prekročíme isté medzné napätie – **rozkladové napätie**  $U_r$ , potom sa prúd lineárne zvyšuje. Pre napätie väčšie ako je rozkladové napätie je prúd lineárnou funkciou napätia:



- o  $I = \frac{U - U_r}{R}$ , kde  $R$  je **odpor elektrolytu**
- o so zvyšovaním teploty klesá viskozita elektrolytu, čím sa znižujú sily, ktoré brzdia pohyb iónov, a preto je pri vyššej teplote elektrický prúd (pri rovnakom napätí) väčší

### 13.3.2 Faradayove zákony elektrolýzy

- elektrické pole, ktoré vznikne v elektrolyte medzi anódou a katódou, vyvolá usporiadaný pohyb iónov a obvodom prechádza elektrický prúd. Ióny na elektródach odovzdávajú svoj náboj, menia sa na atómy alebo molekuly, ktoré sa vylučujú na povrchu elektród alebo chemicky reagujú a materiálom elektród, alebo s elektrolytom. Pri elektrolýze sa na katóde vždy vylučuje vodík alebo kov.



- **1. Faradayov zákon:**
  - o hmotnosti látok vylúčených na elektródach sú priamo úmerné celkovému elektrickému náboju, ktorý preniesli pri elektrolýze ióny
    - $m = AQ = AI \cdot \Delta t$ , kde  $A$  je **elektrochemický ekvivalent látky** (pre danú látku je to charakteristická konštanta; jej jednotkou je  $\text{kg} \cdot \text{C}^{-1}$ ),  $\Delta t$  je doba, za ktorú elektrolytom prechádzal prúd  $I$
  - o keď  $N_V$  je hustota príslušného druhu iónov v elektrolyte,  $v_p$  ich priemerná unášavá rýchlosť a  $m_0$  hmotnosť každého iónu, potom plochou s obsahom  $S$  prejde za dobu  $\Delta t$  celkom  $N$  iónov, pričom:
    - $N = N_V V = N_V S v_p \cdot \Delta t$
  - o celková hmotnosť iónov je:
    - $m = m_0 N = m_0 N_V S v_p \Delta t \rightarrow (1)$
  - o jeden ión má náboj  $Q_1 = ze$ , kde  $z$  je nábojové číslo elementárneho náboja; potom celový prenesený náboj má hodnotu:
    - $Q = N Q_1 = N z e = N_V S v_p e z \cdot \Delta t \rightarrow (2)$
  - o delením rovníc (1) a (2) dostaneme:
    - $\frac{m}{Q} = \frac{m_0}{ze} = \text{konšt.} = A$
  - o rozšírením vzťahu Avogadrovou konštantou dostaneme:
    - $A = \frac{m_0 N_A}{ze N_A} = \frac{M_m}{zF}$ , kde  $M_m$  je mólová hmotnosť a  $F = e N_A$  je **Faradayova konštanta**,  $F = 9,65 \cdot 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$
  - o dosadením do 1. Faradayovho zákona dostaneme:
    - $m = \frac{M_m}{Fz} Q$
- **2. Faradayov zákon:**
  - o hmotnosti rozličných prvkov (alebo radikálov) vylúčených pri elektrolýze tým istým nábojom sú chemický ekvivalentné

### 13.3.3 galvanické články

- galvanický článok je zdroj jednosmerného napätia, ktorý sa skladá z elektrolytu a dvoch chemicky odlišných elektród
  - o keď kovovú elektródu ponoríme do vodného roztoku soli toho istého kovu, prebehne redoxný dej, pri ktorom buď do roztoku vstupujú z kovu ďalšie ióny, alebo sa z neho na kov vylučujú. Roztok aj kov sa nabijú a na rozhraní roztoku a kovu vznikne tenká dvojvrstva kladných a záporných iónov – **elektrická dvojvrstva**. V nej utvorené elektrické pole bráni prechodu ďalších iónov z kovu do roztoku alebo naopak, a preto sa utvorí rovnovážny stav. Elektrickej dvojvrstve prislúcha napätie, ktorého hodnota je rozličná pre rôzne kovy a ich vodné roztoky. Keď elektródy ponoríme do elektrolytu, je medzi nimi nenulové napätie, ktoré sa elektromotorické napätie.
- na vzniku elektrickej dvojvrstvy sú založené **galvanické články** a **akumulátory**

### 13.4 elektrický prúd v plynoch a vákuu

- plyny sú zložené z elektricky neutrálnych atómov a molekúl a za normálnych podmienok sú takmer nevodivé. Elektricky vodivými sa stanú **ionizáciou**. Je to dej, pri ktorom sa vonkajším zásahom odtrhávajú z atómov molekúl **elektróny**. Zvyšky molekúl sú **kladné ióny**. Okrem dvojice **elektrón – kladný ión** sa môžu vytvoriť aj **záporné ióny** pripojením uvoľnených elektrónov k iným neutrálnym molekulám (túto schopnosť majú elektronegatívne prvky)
- prostriedky, ktorými sa vyvoláva ionizácia, nazývajú sa **ionizátory**. Ionizátorom je každý zdroj energie, ktorý poskytuje elektrónom v atómoch (molekulách) energiu potrebnú na ich uvoľnenie. (Ionizácia môže nastať vzájomnými zrážkami molekúl plynu – **ionizácia nárazom**)
- pri ionizácii atómu plynu (molekuly) konajú vonkajšie sily ionizačnú prácu proti silám vzájomného pôsobenia medzi uvoľneným elektrónom a ostatnými časticami atómu (molekuly). Najmenšia energia potrebná na uvoľnenie elektrónu sa nazýva **ionizačná energia**
- ionizujú elektróny, resp. ióny získajú potrebnú energiu najmä v elektrickom poli, ktoré je medzi elektródami výbojovej trubice. Tieto častice sú medzi zrážkami neustále urýchľované a pri zrážkach odovzdávajú časť svojej energie na ionizáciu molekúl.
  - o kinetická energia nabitej častice s nábojom  $e$ , hmotnosťou  $m$  a rýchlosťou  $v$  sa meria prácou síl homogénneho elektrického poľa s intenzitou veľkosti  $E$  potrebnou na jej urýchlenie z pokoja po dráhe  $l$ . Platí:
    - $\frac{1}{2}mv^2 = eEl$
  - o za predpokladu, že častica sa pohybuje v smere siločiar a pri zrážke odovzdá molekule všetku kinetickú energiu rovnajúcu sa ionizačnej energii  $E_i$ , bude  $l = \lambda$  (stredná voľná dráha častice). Potom pre najmenšiu rýchlosť, ktorú musí mať častica, aby pri zrážke s molekulou nastala ionizácia, vypočítame podľa vzťahu:
    - $\frac{1}{2}mv^2 = eE\lambda = E_i \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2E_i}{m}}$
- ionizáciou utvorené voľné elektróny a ióny majú obmedzenú dobu trvania, lebo sa navzájom priťahujú a ich počet sa rýchlo znižuje – **rekombinácia**
- pôsobením elektrického poľa na ionizovaný plyn sa ióny a elektróny začnú usporiadať pohybovať, a tak obvodom začne tiecť elektrický prúd; tento dej v plyne sa volá **výboj**
- prúd v ionizovanom plyne sa udržiava iba počas pôsobenia ionizátora, preto hovoríme o **nesamostatnom výboji**
- pri prekročení určitej intenzity elektrického poľa utvorené ióny a elektróny majú dostatočnú energiu na ionizáciu nárazom ďalších molekúl; plyn sa ionizuje vlastnými iónmi, ale najmä elektrónmi – hovoríme o **samostatnom výboji**. Elektrické napätie, pri ktorom vzniká samostatný výboj, nazýva sa **zápalné napätie**
- graf závislosti prúdu  $I$  elektrického výboja od napätia  $U$  medzi elektródami sa nazýva **voltampérová charakteristika výboja**

- uvažujeme o ionizovanom plyne medzi platňami kondenzátora:
- pri zväčšovaní napätia na platniach zväčšuje sa aj prúd. Pri malých napätíach prevláda rekombinácia a iba malé percento iónov sa dostane na platne kondenzátora. Keď sa napätie zväčšuje, elektrické pole urýchli ióny a elektróny tak, že nestačia rekombinovať, ale čoraz vo väčšom počte zanikajú zachytením sa na platničkách. Prúd sa stáva nasýteným pri napätí  $U_n$ , keď sú všetky ióny zachytené platňami. Prúd dosiahne hodnotu  $I_n$ , čo je tzv. **nasýtený prúd**.
- ďalšie zvyšovanie napätia naspôsobuje zvyšovanie prúdu. Samostatný výboj nastáva pri oveľa vyššom napätí, t.j. pri **zápalnom napätí**  $U_z$ . Prechod z nesamostatného na samostatný výboj nazývame **elektrický prieraz plynu**. Pri pokračujúcom zvyšovaní napätia sa prúd veľmi rýchlo zväčšuje.

