

# Doplněk učebnice Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.: Fyzika

( grant FRVŠ MŠMT „Inovace předmětu „Elektřina a magnetismus“,  
č.j.1151/2009.).

## Úvod.

Základní literaturou pro studium předmětu „Elektřina a magnetismus“ je na Pedagogické fakultě Masarykovy University v Brně (PdF MU) renomovaná učebnice autorů Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.: Fyzika (dále jen H.R.W.). Tato kniha vyhovuje po všech stránkách: je velice dobře zpracovaná po didaktické i grafické stránce, je v ní množství příkladů z praktického života a řešené i neřešené příklady.

Cílem naší práce je doplnění uvedené knihy o další kapitoly z elektřiny a magnetismu, které jsou podle našeho mínění rovněž velmi důležité a které v knize H.R.W nejsou uvedeny. Jejich důležitost pro studenty fyziky na PdF MU spatřujeme i v tom, že tito studenti, budoucí učitelé na základních školách a nižších ročnících gymnázií budou přednášet tuto látku na uvedených školách. Jedná se o kapitoly „Vedení elektřiny v kapalinách“ (kap.1.), „Vedení elektřiny v plynech“ (kap.2.), „Vedení elektřiny v polovodičích“ (kap.3.). Rovněž jsme poněkud více rozvedli kapitolu o využití elektrických jevů v technické praxi (kap.4.) a návrh některých demonstračních pokusů (kap.5.).

Knihy H.R.W. vyšla již celkem v 6 vydáních (nepočítaje překlady) a jsme si proto vědomi toho, že na první pokus se nám nemůže podařit pokračovat přesně v duchu tohoto vynikajícího díla, přestože jsme se o to snažili. Zejména obrázky nedosahují zdaleka kvality těch, uvedených v H.R.W. Kvalita obrázků je totiž silně ovlivněna finančními prostředky a rovněž závisí na serióznosti jiných subjektů, které se dají těžko ovlivnit. Proto se budeme v dalším roce snažit upravit nové kapitoly zejména co do jejich grafické úrovně.

# 1. Elektrický proud v elektrolytech

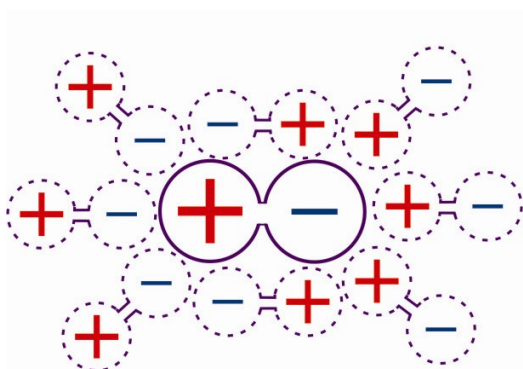
## 1.1. Disociace molekul v roztocích

Experimentálně bylo nade vší pochybnost dokázáno, že průchod elektrického proudu vodiči a polovodiči v nich nezpůsobí žádné charakteristické změny, ani přenos hmoty (příslušný experiment byl sestaven tak, že dvěma vodivě spojenými vodiči (např. Al a Cu) procházel po delší dobu elektrický proud o velké intenzitě. Poté byly vodiče od sebe odděleny a byla provedena chemická analýza obou kovů. V žádném z obou kovů nebyla nalezena ani stopa přítomnosti kovu druhého). Takové látky nazýváme vodiči prvního druhu (třídy).

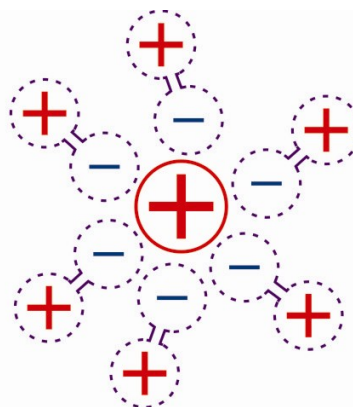
Čisté kapaliny jsou obvykle velmi špatnými vodiči (např. voda, nebo alkohol), neboť neobsahují dostatečný počet volných nosičů náboje. Přesto existují kapaliny, které vedou elektrický proud, jsou to tzv. elektrolyty. Protože v nich dochází k chemickým změnám, nazýváme je vodiči druhého druhu. Patří k nim roztoky solí, hydroxidů a kyselin ve vodě a některých jiných kapalinách a též roztavené soli (iontové krystaly). Silné elektrolyty (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, KOH aj.) zvyšují vodivost značně, slabé elektrolyty mnohem méně (kyselina octová apod.) a některé vůbec (voda + alkohol). Bylo zjištěno, že vodivost roztoků roste s relativní permitivitou rozpouštědla (voda:  $\epsilon_r = 81$ , glycerin:  $\epsilon_r = 41,1$ , petrolej:  $\epsilon_r = 2,1$ ).

Nositeli proudu v elektrolytech jsou ionty, které vznikly disociací (rozštěpením) molekul rozpuštěné látky v roztoku. Abychom objasnili, jak dochází k disociaci, uvažujme polární molekulu, např. NaCl. Při vytvoření molekuly NaCl spojením atomů Na a Cl dochází k přerozdělení elektronů. Jediný valenční elektron Na přejde do valenční sféry atomu Cl, kde chybí právě jeden elektron k jejímu úplnému zaplnění. Výsledkem je skutečnost, že atom Na se stane kladným iontem a atom Cl iontem záporným (oba však mají všechny elektronové sféry zcela zaplněny, podobně jako atomy netečných plynů). Vzájemné působení mezi Na<sup>+</sup> a Cl<sup>-</sup> je dáno Coulombovou silou.

V roztoku je každá molekula rozpuštěné látky obklopena molekulami rozpouštědla. Jsou-li molekuly rozpouštědla polární, potom tyto molekuly vytvoří kolem molekuly rozpuštěné látky obal, takže vznikne tzv. klastr (Obr. 1.1a.). Pole, vytvořené molekulami rozpouštědla způsobí zeslabení vazby mezi oběma ionty rozpuštěné látky a tak může dojít k takovému zeslabení jejich vzájemné (iontové) vazby, že za spolupůsobení tepelných kmitů se oba ionty od sebe oddělí – dojde k tzv. disociaci (Obr. 1.1b).



Obr.1.1a) Vznik klastru



Obr.1.1.b) Disociovaný iont

Intenzita elektrického pole, vytvořená dipólem, je úměrná velikosti jeho elektrického momentu. Proto se vazba mezi ionty v molekule rozpuštěné látky zeslabí tím více, čím větší je

dipólmoment okolních molekul, tj. čím větší je dielektrická konstanta rozpouštědla. Největší relativní dielektrickou konstantu ze všech kapalin má voda ( $\epsilon_r = 81$ ). Proto je disociace molekul ve vodných roztocích nejvyšší.

Takto vytvořené ionty se pohybují v roztoku a pokud se náhodně setkají, může opět dojít k jejich *rekombinaci* na původní molekuly. V roztoku se ustaví jistá rovnováha mezi oběma procesy, disociací a rekombinací. Stav rovnováhy odpovídá určitý stupeň disociace, který charakterizuje *koeficient disociace*  $\alpha$ , který charakterizuje, jaká část molekul rozpuštěné látky se nachází ve stavu disociace. Označme jako  $n$  množství molekul rozpuštěné látky v objemové jednotce rozpouštědla. Potom  $n_1 = \alpha \cdot n$  bude disociováno (ve stavu iontů) a  $n_2 = (1 - \alpha)n$  z nich nebude disociováno.

Každá z molekul dosud nedisociovaných může s jistou pravděpodobností disociovat. Proto množství molekul, které se za 1 s v objemové jednotce roztoku rozpadne na ionty, bude úměrné  $n_2$  (tj. počtu molekul, které dosud nedisociovaly):

$$\Delta n_1 = k_1 n_2 = k_1 (1 - \alpha)n \quad (1.1)$$

Koeficient úměrnosti  $k_1$  závisí na fyzikálních a chemických vlastnostech rozpouštědla i rozpuštěné látky. Pro rozpouštědlo s vysokou permitivitou  $\epsilon_r$  bude i  $k_1$  vyšší. Bude se samozřejmě zvyšovat i s rostoucí teplotou.

Pravděpodobnost setkání dvou iontů různých znamének je úměrná jak počtu kladných, tak i záporných iontů. Obě čísla jsou rovna množství disociovaných molekul  $n_1$ . Proto je množství molekul, vznikajících v objemové jednotce za 1 s v důsledku rekombinace úměrné  $n_1^2$ :

$$\Delta n_2 = k_2 n_1^2 = k_2 \alpha^2 n^2 \quad (1.2)$$

Ve stavu rovnováhy je  $\Delta n_1 = \Delta n_2$  a proto podle (1.1) a (1.2) máme

$$k_1 (1 - \alpha)n = k_2 \alpha^2 n^2$$

Odtud

$$\alpha^2 + \frac{k_1}{k_2 n} \alpha - \frac{k_1}{k_2 n} = 0$$

Řešení této kvadratické rovnice má tvar

$$\alpha = -\frac{k_1}{2k_2 n} \pm \sqrt{\frac{k_1^2}{4k_2^2} + \frac{k_1}{k_2 n}}$$

Kořen se znaménkem (-) nemá fyzikální význam. Reálné řešení má tedy tvar

$$\alpha = \frac{k_1}{2k_2 n} \left( \sqrt{1 + \frac{4k_2 n}{k_1}} - 1 \right) \quad (1.3)$$

Tento výraz je třeba chápat jako přibližný. Koeficienty  $k_1$  a  $k_2$  jsou konstantami pouze v tom případě, má-li každá molekula rozpuštěné látky za své sousedy pouze molekuly rozpouštědla,

což je splněno pouze u málo koncentrovaných roztoků. Při vyšších koncentracích je každá molekula obklopena jak molekulami rozpouštědla, tak i molekulami rozpuštěné látky a tím se mění pravděpodobnost disociace. Rovněž dochází ke změně pravděpodobnosti rekombinace při setkání iontů opačných znamének.

Při malých hodnotách  $n$ , kdy je poměr  $\frac{4k_2n}{k_1} \ll 1$  lze vztah (1.3) přepsat do tvaru

$$\alpha \approx \frac{k_1}{2k_2n} \left( 1 + \frac{2k_2n}{k_1} - 1 \right) = 1 \quad (1.4)$$

Odtud tedy plyne, že v silně zředěných roztocích jsou prakticky všechny molekuly rozpuštěné látky disociovány. To lze objasnit tím, že při malých hodnotách  $n$  se ionty prakticky nesetkávají navzájem a proto nedochází k rekombinaci a v průběhu času se všechny molekuly rozpadají na ionty.

Při vysokých hodnotách  $n$ , kdy lze zanedbat 1 vzhledem k  $\sqrt{\frac{4k_2n}{k_1}}$  a tím spíše vzhledem k  $\frac{4k_2n}{k_1}$  dostává (1.3) tvar

$$\alpha \approx \frac{k_1}{2k_2n} \sqrt{\frac{4k_2n}{k_1}} = \sqrt{\frac{k_1}{k_2n}} \approx \frac{1}{\sqrt{n}}$$

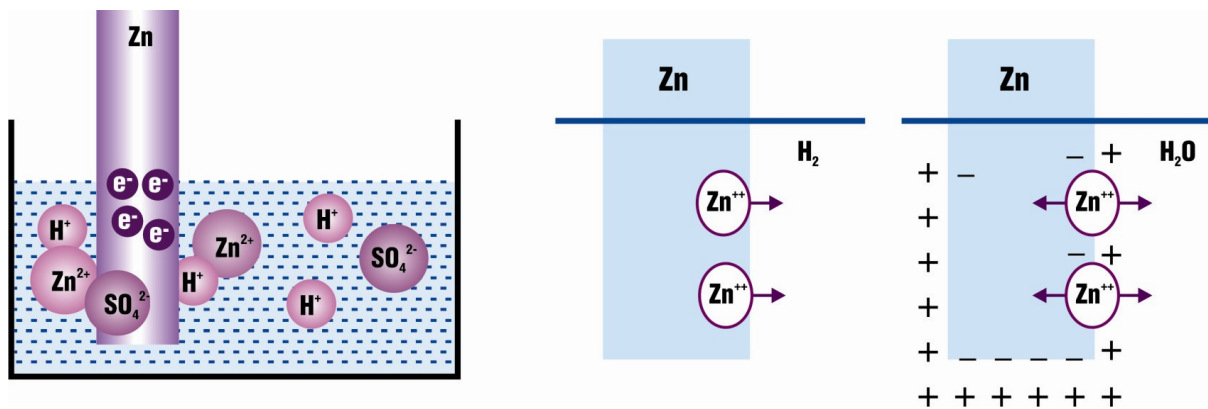
V tomto případě je koeficient disociace  $\alpha$  velmi malý (protože  $\frac{4k_2n}{k_1} \gg 1$  a tedy

$\frac{k_1}{k_2n} \ll 1$ ) a klesá s růstem koncentrace úměrně  $\frac{1}{\sqrt{n}}$ .

Při nižších teplotách jsou, jak jsme již uvedli, ionty obaleny molekulami rozpouštědla. Tento jev se nazývá v případně vodných roztoků hydratací (obecně solvatací) iontů a poměrně složitý útvar, tvořený iontem a obálkou z molekul rozpouštědla klastrem. Intenzivnější tepelný pohyb narušuje vazbu mezi iontem a molekulami rozpouštědla v obalu klastru, takže nakonec může při vysokých teplotách obálka klastru zcela zmizet.

## 1.2. Elektrolýza

Ponoříme-li do elektrolytu kovovou elektrodu, dojde ke vzniku určitého kontaktního rozdílu potenciálů (*elektrodový potenciál*): kov se nabije záporně a elektrolyt kladně. To lze objasnit schopností kovů částečně se rozpouštět – kladné ionty kovu přecházejí do elektrolytu. Elektrony zůstanou v kovu a ten se nabije záporně. Zvláštností daného případu rozpouštění pevné látky v kapalině je, že ionty kovu, které přešly do elektrolytu, se příliš nevzdalují od kovové elektrody, neboť k ní jsou přitahovány jejím záporným nábojem. Podél povrchu kovové elektrody se tak vytvoří dvojrůzstva, tvořená elektrony a ionty (Obr. 1.2a). Výsledkem skutečnosti, že kov se nabije záporně a elektrolyt kladně je vznik tzv. poločlánku (který však sám o sobě nemůže dodávat proud do elektrického obvodu – je navenek neutrální – Obr. 1.2b).

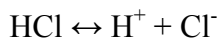


Obr.1.2.a. Rozpouštění kovu v elektrolytu. Obr.1.2.b) Vznik poločlánku.

Ionty přecházejí z kovu do roztoku do té doby, dokud vznikající rozdíl potenciálů nezabrání „rozpouštění“ kovu. Kolik iontů přejde do roztoku a jak velký potenciál mezi kovem a elektrolytem vznikne, závisí na chemických a fyzikálních vlastnostech kovu a elektrolytu a na tom, byly-li ionty kovu již před rozpouštěním v elektrolytu přítomny (např. ve formě soli). Bude-li koncentrace iontů v elektrolytu dosti vysoká, nemusí dvojvrstva vůbec vzniknout (elektrolyt je „nasycen“ ionty kovu). Ponoříme-li kov do elektrolytu s ještě vyšší koncentrací jeho iontů („přesycený“ elektrolyt), dojde k vyloučení jistého množství iontů na kov a ten se nabije kladně (a elektrolyt tedy záporně). Vložíme-li na elektrody, ponořené v elektrolytu elektrické napětí, začnou se ionty (klastry) pohybovat a vznikne elektrický proud. Kladně nabité ionty se pohybují k záporně nabitě elektrodě (katodě) a proto je nazýváme *kationty*. Záporně nabité ionty se pohybují ke kladné elektrodě (anodě) a proto se nazývají *anionty*. Když anionty a kationty dosáhnou elektrod, předají jim své náboje (anionty odevzdávají elektrony, kationty je naopak získají) a tak se stanou neutrálními atomy či molekulami. Podle chemické podstaty elektrolytu a elektrod dochází k chemickým reakcím s elektrodami, nebo rozpouštědlem. Takové chemické reakce nazýváme sekundárními. Produkty chemických reakcí se usazují na elektrodách, nebo přecházejí do roztoku. Lze tedy konstatovat, že průchod elektrického proudu elektrolytem je doprovázen chemickými ději na elektrodách. Tento jev se nazývá *elektrolýzou*.

Probereme několik případů:

1. Elektrolyt: vodní roztok kyseliny solné HCl. Molekula HCl disociuje na  $H^+$  a  $Cl^-$  :

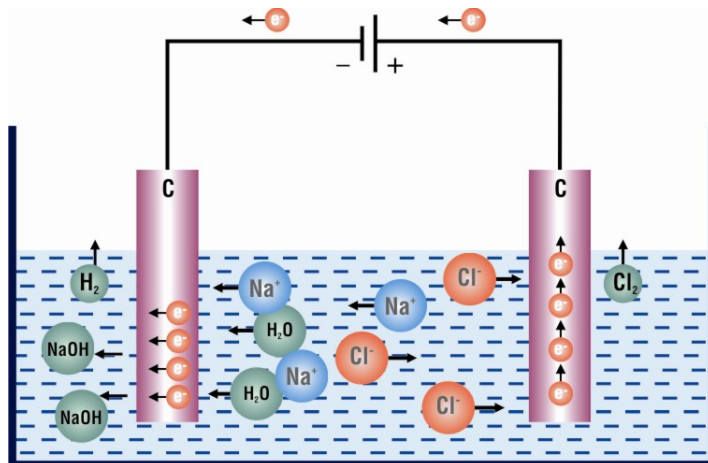


Anoda (nereagující s Cl):  $2Cl^- - 2e^- \rightarrow Cl_2$  (ve formě bublinek plynu)

Na katodě (např. Pt, nebo C):



K sekundárním reakcím v roztoku nedochází.

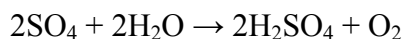


Obr.1.3. Elektrolýza NaCl , uhlíkové elektrody

2. Elektrolyt: vodní roztok kyseliny sírové. Molekula  $\text{H}_2\text{SO}_4$  disociuje na  $2\text{H}^+$  a  $\text{SO}_4^{2-}$   
 Děje na inertních elektrodách (např.Pt, nebo C):



$\text{SO}_4^{2-} - 2\text{e}^- \rightarrow \text{SO}_4$  (neutrální skupina atomů  $\text{SO}_4$  je chemicky velmi aktivní a reaguje s vodou podle rovnice:

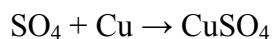


Molekula kyseliny sírové se vrátí zpět do roztoku a kyslík se vyvíjí na anodě ve formě bublinek. Sekundární reakce probíhá v tomto případě v elektrolytu.

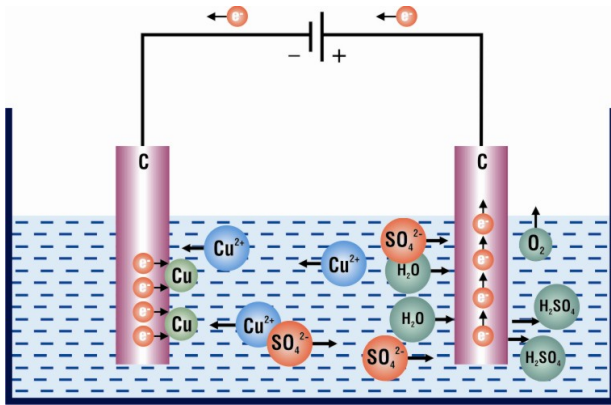
3. Měděné elektrody, umístěné ve vodním roztoku síranu měďnatého. Disociace probíhá podle rovnice:



Atomy mědi, které se staly neutrálními přijetím dvou elektronů, se usazují na katodě ve formě kovového povlaku (čistě mědi). Skupina atomů  $\text{SO}_4^{2-}$  po odevzdání dvou elektronů reaguje s mědí na anodě podle rovnice



Takto vzniklý síran měďnatý je rozpustný a opět disociuje. Výsledkem je rozpouštění anody a nárůst katody, sekundární reakce probíhají na elektrodách.

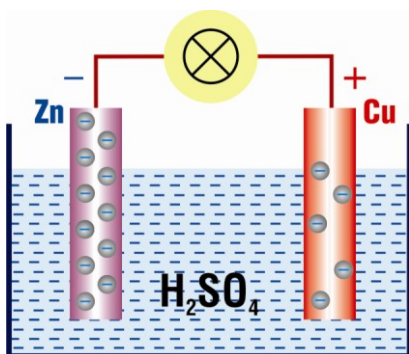


Obr.1.4. Elektrolýza  $\text{CuSO}_4$  – uhlíkové elektrody

Samotná kovová elektroda, obklopená elektrolytem nemůže ještě poskytovat elektrický proud, neboť v jejím okolí je elektrická rovnováha nábojů. Pokud však spojíme sériově dvě chemicky různé elektrody, např. elektrodu měděnou a zinkovou, umístěné ve zředěné kyselině sírové, dostaneme chemický zdroj elektrického proudu, v tomto případě Voltův článek (Obr.1.5a). Elektromotorické napětí Voltova článku je 1,1 V a ve Voltově době byl tak zdokonalen, že byl hlavním zdrojem elektrické energie zejména pro vědecké pokusy (Voltův sloup – Obr.1.5b). Elektromotorické napětí existuje i mezi jinými dvojicemi kovů, jak dokazuje Beketovova řada kovů, v níž kov vlevo má vyšší záporný potenciál, než kov vpravo od něj:

|       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Li    | K     | Na    | Mg    | Al   | Zn    | Cr    | Fe    | Cd    | Tl    |
| -3,05 | -2,92 | -2,71 | -2,4  | -1,7 | -0,76 | -0,52 | -0,44 | -0,40 | -0,32 |
| Co    | Ni    | Sn    | Pb    | H    | Cu    | Ag    | Hg    | Au    | Pt    |
| -0,29 | -0,22 | -0,13 | -0,12 | 0,0  | +0,34 | +0,80 | +0,86 | +1,5  | +1,9  |

(potenciály jsou sestaveny vzhledem k tzv. vodíkové elektrodě, jejíž potenciál volíme roven 0). Zjednodušeně lze říci, že zleva doprava roste „ušlechtilost“ kovů.



Obr.1.5a) Voltův článek



Obr.1.5b) Voltův sloup

### 1.3. Faradayovy zákony.

Kvantitativní zákony elektrolýzy objevil experimentálně M. Faraday v roce 1836. Tyto zákony jsou velmi jednoduché. Podle prvního z nich je *množství látky, vyloučené na elektrodě úměrné náboji, který prošel elektrolytem:*

$$m = Kq = K \int i dt \quad (1.5)$$

Zde  $m$  je hmotnost vyloučené látky,  $K$  je koeficient, závislý na podstatě elektrolytu – tzv. *elektrochemický ekvivalent*. Při  $q=1$  je  $m = K$ . Tedy elektrochemický ekvivalent je roven hmotnosti látky, vyloučené na elektrodě při průchodu elektrického náboje o velikosti 1C.

Druhý Faradayův zákon dává do souvislosti elektrochemický ekvivalent  $K$  látky s jejím chemickým ekvivalentem  $A/z$  ( $A$  je atomová hmotnost a  $z$  je valence dané látky). Tento zákon říká, že *elektrochemické ekvivalenty všech látek jsou úměrné jejich chemickým ekvivalentům*. Koeficient úměrnosti píšeme ve tvaru  $1/F$ , kde  $F$  je *Faradayův náboj*. Druhý Faradayův zákon lze tedy zapsat ve tvaru

$$K = \frac{1}{F} \frac{A}{z} \quad (1.6)$$

Dosadíme-li (1.6) do (1.5), dostáváme spojení obou Faradayových zákonů v jeden ve tvaru

$$m = \frac{Aq}{zF} \quad (1.7)$$

Je-li  $q = F$ , bude  $m = A/z$ . To znamená, že pro vyloučení jednoho kilogramekvivalentu libovolné látky je třeba, aby elektrolytem protekl stejný náboj, číselně rovný  $F$ . Pokusně bylo stanoveno, že

$$F = 96,497 \cdot 10^6 \text{ C/kilogramekvivalent} \quad (1.8)$$

nebo

$$F = 96497 \text{ C/gramekvivalent.}$$

Faradayovy zákony sehrály významnou roli při důkazu atomové (tj. diskrétní) podstaty elektrických jevů. Kilogramekvivalent libovolné látky obsahuje  $N' = N_A/z$  atomů ( $N_A$  je Avogadrovo číslo). Tedy  $N_A/z$  přenáší náboj  $F$ . Na každý iont připadá náboj  $e' = F/N' = (F/N_A)z$ . Tedy náboj iontu je celistvým násobkem náboje

$$e = \frac{F}{N_A} \quad (1.9)$$

který je elementárním nábojem.

Dosadíme-li do (1.9) hodnoty (1.8) pro  $F$  a  $N_A = 6,02 \cdot 10^{26}$  kilomol<sup>-1</sup>, dostaneme velikost elementárního náboje  $e_0 = 1,60 \cdot 10^{-19}$  C.

Vztah (1.9) byl použit pro určení Avogadrova čísla. Veličina  $F$  byla určena experimentálně z elektrochemických pokusů a hodnota  $e_0$  z pokusů, které provedl poprvé Millikan.



#### 1.4. Elektrolytická vodivost.

Oproti poměrně jednoduchému pohybu elektronů ve vodičích, je obraz vedení elektřiny v elektrolytech složitější. Chaotický tepelný pohyb iontů (klastrů) se skládá s uspořádaným pohybem kladných iontů ve směru pole a záporných iontů proti směru pole. Rozměry iontů (klastrů) vedoucích proud, jsou mnohem větší, než rozměry elektronů ve vodičích a proto okolní molekuly a klastry mají na jejich pohyb značný vliv (připomeňme, že pohyb elektronů ve vodičích lze mezi dvěma srážkami pokládat za netlumený). Toto vzájemné působení vede k tomu, že iont (klastr) lze pokládat za kuličku, pohybující se ve vazkém prostředí, brzdícím její pohyb úměrně její rychlosti. Tedy každé hodnotě intenzity elektrického pole  $E$  odpovídá hodnota rychlosti rovnoměrného přímočarého pohybu  $u$ , daná podmínkou

$$q \cdot E = k \cdot u,$$

kde  $e'$  je náboj iontu a  $k$  je koeficient úměrnosti mezi rychlostí iontu a silou odporu prostředí proti pohybu iontu.

Tedy vlivem pole o intenzitě  $E$  se bude iont pohybovat (ve směru pole, nebo proti němu) s konstantní rychlostí

$$u = \frac{q}{k} E \quad (1.10)$$

V této rovnici není poměr  $q/k$  nic jiného, než pohyblivost iontu  $u_0$ . Ionty různých znamének mohou co do velikosti mít různý náboj  $e'$  a kromě toho budou mít i různý koeficient  $k$ . Proto budou mít ionty různých znamének i různou pohyblivost  $u_0$ .

Pohyblivost iontu závisí na jeho podstatě a na vlastnostech rozpouštědla. S růstem teploty pohyblivost roste a to proto, že klesá vazkost prostředí, v němž se ionty pohybují a ještě více proto, že s růstem teploty se zmenšují rozměry klastrů (tj. obálek iontů).

Pohyblivost iontů v elektrolytech je velmi malá. Při pokojové teplotě je pro ionty ve vodném prostředí rovna asi  $10^{-8} - 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} / \text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ .

Pohyb iontů způsobí elektrický proud, jehož hustota je

$$j = (n^+ \cdot e^+ \cdot u_0^+ + n^- \cdot e^- \cdot u_0^-) E,$$

kde  $n^+$  je počet kladných iontů v objemové jednotce,  $e^+$  je náboj a  $u_0^+$  pohyblivost kladných iontů,  $n^-$ ,  $e^-$  a  $u_0^-$  jsou analogické veličiny pro záporné ionty.

Veličina v závorkách nezávisí na  $E$ . Tedy hustota elektrického proudu v elektrolytech je úměrná intenzitě pole. To znamená, že pro elektrolyty platí Ohmův zákon.

Jestliže molekuly disociují na dva ionty, potom je  $e^+ = e^- = e'$  a  $n^+ = n^- = n' = \alpha \cdot n$  (počtu disociovaných molekul). V tom případě je

$$j = \alpha \cdot n \cdot q (u_0^+ + u_0^-) E \quad (1.11)$$

Výraz (1.11) platí v určité vzdálenosti od elektrod. V bezprostřední blízkosti elektrod je proud vytvářen pouze ionty jednoho znaménka: aniony poblíž anody a kationy poblíž katody.

V souladu se vztahem (1.11) je vodivost elektrolytu dána vztahem

$$\sigma = \alpha \cdot n \cdot q (u_0^+ + u_0^-)$$

Tento výraz rozšíříme podílem  $N' = N_A/z$ , což je počet molekul v kilogramekvivalentu rozpuštěné látky:

$$\sigma = \alpha \frac{n}{N'} (qN) (u_0^+ + u_0^-)$$

Součin  $q \cdot N'$  je roven Faradayovu náboji  $F$ . Poměr  $n/N'$  udává počet kilogramekvivalentů rozpuštěné látky v objemové jednotce roztoku a nazýváme jej *ekvivalentní koncentrací* rozpuštěné látky. Tuto koncentraci označíme písmenem  $\eta$ , takže výraz pro vodivost elektrolytu lze přepsat na tvar

$$\sigma = \alpha \cdot \eta \cdot F (u_0^+ + u_0^-) \quad (1.12)$$

Při zvýšení teploty koeficient disociace  $\alpha$  i pohyblivost iontů rostou. Proto vodivost elektrolytů  $\sigma$  roste s teplotou. Závislost vodivosti na koncentraci je velmi složitá. To je způsobeno tím, že  $\sigma$  závisí na  $\eta$  bezprostředně prostřednictvím  $\alpha$ . Při malých koncentracích, kdy  $\alpha \sim 1$ ,  $\sigma$  roste úměrně s  $\eta$ . Dále s růstem  $\eta$  začíná klesat koeficient disociace  $\alpha$ . Proto růst vodivosti se zpomaluje a nakonec vodivost začne klesat.

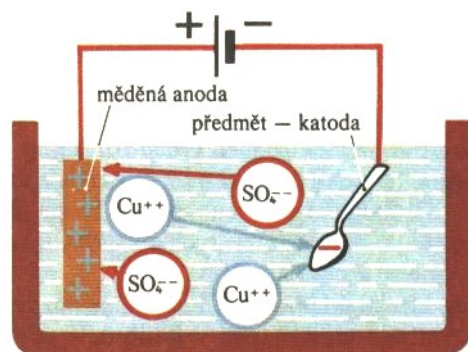
Elektrolýza nachází nejrůznější technická použití. Uvedme krátce některá z nich.

#### 1.4.1. Galvanoplastika.

Postup při výrobě reliéfů pomocí galvanoplastiky je následující: model, zhotovený z vosku, nebo jiného plastického materiálu se pokryje grafitovým práškem (aby byl elektricky vodivý) a poté jej zapojíme jako katodu při elektrolýze. Elektrolytem je roztok soli, obsahující kov, ze kterého chceme získat otisk. Kov se ukládá na katodě ve formě vrstvy, přesně kopírující reliéf modelu. Získaný otisk lze snadno oddělit od modelu.

#### 1.4.2. Elektrolytické pokovování

Pomocí elektrolýzy lze nanášet na povrch kovových součástek tenkou vrstvu jiného kovu. Důvodem jsou dekorativní cíle (zlacení, stříbření, platinování) a také vytváření antikoročních vrstev (niklování, chromování, zinkování, kadmiování, atd.).



Obr.1.6. Elektrolytické pokovování

### 1.4.3. Elektrometalurgie.

Pomocí elektrolýzy roztavených rud lze získat hliník, sodík, hořčík, berylium a další kovy. Například surovinou pro výrobu hliníku jsou bauxity – minerály, obsahující oxid hlinitý  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Jako elektrody používáme uhlíkové desky. Ruda je udržována v roztaveném stavu na úkor tepla, které se vytváří při průchodu elektrického proudu.

Elektrolýzu využíváme též k rafinování (čištění) kovů. Proto zapojíme jako anodu čišťený kov (např. Cu) a jako elektrolyt potom slouží roztok soli čišťeného kovu (např.  $\text{CuSO}_4$ ). Při vhodném výběru napětí se bude na katodě usazovat pouze daný kov a nečistoty se usadí na dně nádoby. Tak se získává např. velmi čistá měď, kterou nazýváme elektrolytickou.

### 1.4.4. Elektrolytické leštění.

Množství látky, usazující se na elektrodě, nebo přecházející z elektrody do roztoku, je úměrné hustotě proudu. V okolí výstupků na povrchu kovu je intenzita pole  $E$  vyšší a tedy v těchto místech je i vyšší hustota proudu. Naopak v jamkách je hustota proudu nižší. Proto zapojíme - li původně drsný povrch jako anodu v obvodu, potom z výstupků bude odcházet do roztoku více kovu, než z jamek a drsnost povrchu se bude snižovat, což je princip leštění kovů.

### 1.4.5. Výroba těžké vody.

Těžká voda  $\text{D}_2\text{O}$  obsahuje místo vodíku H atomy deuteria D, tj. izotopu vodíku s atomovým číslem 2. Těžká voda je obsažena v malém množství v obyčejné vodě. Ionty  $\text{D}^+$  jsou méně pohyblivé, než ionty  $\text{H}^+$ . Proto ve vodíku, který se vyvíjí při elektrolýze, je obsaženo méně deuteria, než ve výchozí vodě a v elektrolytu se koncentrace těžké vody zvyšuje. Jestliže provádíme elektrolýzu dostatečně dlouho, získáme vodu s vysokým obsahem molekul  $\text{D}_2\text{O}$ .

### 1.4.6. Elektrolytické kondenzátory.

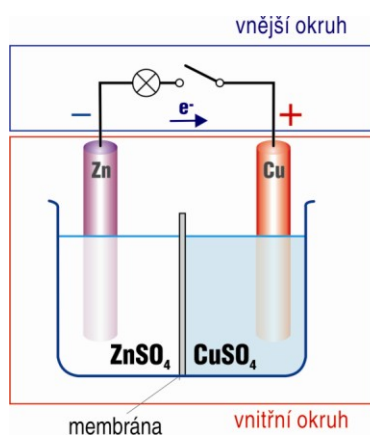
Umístíme-li do roztoku borité kyseliny (přesněji směs borité kyseliny a amoniaku) hliníkové elektrody a přiložíme-li na ně napětí, potom se anoda velmi rychle pokryje velmi tenkou izolační vrstvou oxidu hlinitého  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a proud se přeruší (izolační vrstva vznikla a je udržována na úkor elektrolýzy a při změně polarity zmizí). Anoda a elektrolyt jsou tedy odděleny velmi tenkou vrstvičkou izolátoru a vytvoří tím kondenzátor o velké kapacitě (kapacita kondenzátoru je nepřímo úměrná vzdálenosti mezi jeho deskami).

V „suchých“ elektrolytických kondenzátorech je elektrolyt tvořen hustou pastou, kterou je navlhčen papír, umístěný mezi deskami. Takové kondenzátory, ač malých rozměrů, mohou mít kapacitu řádu set mikrofaraďů. Při jejich zapojení v obvodu však musíme dát pozor na polaritu. Pokud bychom zapojili takový kondenzátor opačně, potom by izolační vrstvička zmizela a silně by vzrostl proud, procházející kondenzátorem, což by vedlo k jeho zničení. Každý takový kondenzátor je určen na určité napětí, po jehož překročení dojde k narušení izolační vrstvy a rovněž ke zničení kondenzátoru.

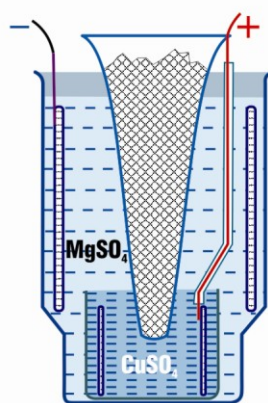
### 1.4.7. Galvanické články.

Ve Voltově článku (Obr.5a) je záporný náboj zinkové elektrody větší, než záporný náboj elektrody měděné. Spojíme-li je vnějším obvodem, přejde část elektronů ze zinkové elektrody na elektrodu měděnou. Tím se naruší rovnováha ve dvojvrstvě poblíž zinkové elektrody a část kladných iontů zinku přejde do elektrolytu. Podobně se naruší i dvojvrstva u elektrody měděné, jejíž záporný náboj se zvýší (došly na ni elektrony ze zinku). Zde se

naopak část iontů mědi, tvořících dvojvrstvu, usadí na elektrodě coby neutrální atomy. Těmito procesy je ale narušena rovnováha v celé soustavě. Zinek se snaží dosáhnout rovnováhy tím, že posílá do roztoku nové ionty, ale nebude je moci udržet ve své blízkosti, neboť jeho elektrony budou stále přecházet na elektrodu měděnou. Ionty  $Zn^{++}$  se budou v roztoku slučovat s disociací vzniklými skupinami  $SO_4^-$ . Na měděné elektrodě se bude usazovat vodík (po získání elektronu neutrální) ve formě bublinek, které přilnou k povrchu elektrody. Elektrody zinkové tedy ubývá a elektroda měděná se pokrývá bublinkami vodíku. Tak vznikne tzv. polarizační článek, který nakonec zastaví činnost Voltova článku. Má-li být eliminován vliv polarizačního článku, musíme měděnou elektrodu vždy po jisté době z elektrolytu vyjmout a očistit, nebo, což je jistě pohodlnější, obklopit měděnou elektrodu okysličovadlem, které vodík chemicky přemění na vodu.



Obr.1.7a) Danielův článek



Obr.1.7b) Meidingerův článek

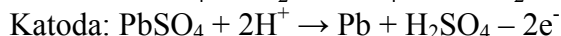
Polarizaci elektrod, velkou nevýhodu Voltova článku odstraňuje tzv. Danielův článek (Obr.1.7a). Dva elektrolyty, zředěnou  $H_2SO_4$  a koncentrovaný roztok  $CuSO_4$  oddělíme porézní přepážkou, umožňující elektrické spojení obou roztoků, ale zabraňující vzájemné smísení obou roztoků. I v tomto článku se bude zinková elektroda rozpouštět, jako tomu bylo u článku Voltova a na měděné elektrodě se bude usazovat čistá měď. Zinková elektroda je v tomto článku nutná, neboť díky jejímu rozpouštění vzniká elektrický proud. Naopak měděnou elektrodu můžeme nahradit elektrodou z jiného materiálu s nízkým elektrodovým potenciálem (platina, uhlík), na nichž se bude ukládat tenká vrstvička mědi. Dokonalejší alternativou Danielova článku je článek Meidingerův (Obr.1.7b), ve kterém se zinková elektroda nachází v roztoku  $MgSO_4$  a měď v nasyceném roztoku  $CuSO_4$ . Aby byla eliminována nevýhoda Danielova článku, tj. postupné vyčerpávání roztoku skalice modré, nachází se v Meidingerově článku nadbytek jejich krystalů. Porézní přepážka zde není nutná, neboť smíchávání obou roztoků brání jejich rozdílné hustoty.

**Suché články:** Sem patří galvanické články, ve kterých je tekutý elektrolyt nahrazen elektrolytem ve formě pasty, nebo dokonce elektrolytem pevným. Klasickým příkladem suchého článku je článek Leclancheův). V něm je anoda tvořena uhlíkem, který je obklopen burelem ( $MnO_2$ ), okysličujícím vodík na vodu (odstranění polarizace elektrody). Katodou je zinek a elektrolytem koncentrovaný roztok salmiaku, napuštěného do zvláštní pasty. Kvalitnější variantou Leclancheova článku je článek alkalický, ve kterém je elektrolytem  $KOH$  (elektrody jsou stejné). Velmi kvalitním suchým článkem je zinko – stříbrný článek (elektrody  $Ag$  a  $Zn$ , elektrolytem je  $KOH$ ). Dlouhou životnost má lithiový článek (elektrody  $Li$  a  $C$ , elektrolyt  $KOH$ , depolarizátor  $MnO_2$ )

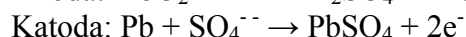
#### 1.4.8. Sekundární galvanické články

V sekundárních galvanických člancích probíhají vratné chemické reakce a lze je tedy nabíjet. K takovým článkům (akumulátorům) patří tzv. olověný akumulátor (dvě olověné elektrody, ponořené do zředěné kyseliny sírové – vznikne na nich  $\text{PbSO}_4$ ). Chemické děje v tomto akumulátoru jsou následující:

Nabíjení:

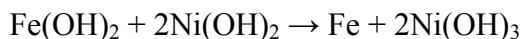


Vybíjení:



Účinnost tohoto akumulátoru je vysoká (85%) a má velmi malý vnitřní odpor. Proto může dodávat krátkodobě velký proud a jsou zatím nenahraditelným zdrojem energie, potřebné pro nastartování automobilu. Jejich nevýhodou je vysoká hmotnost, jedovatost olova a poměrně malá odolnost proti otřesům a neodbornému zacházení (nesmí se např. nechat úplně vybit). Edisonův (NiFe) akumulátor má nižší účinnost, vyšší vnitřní odpor, ale snáší hrubší zacházení. Chemické reakce v něm jsou následující:

Nabíjení:



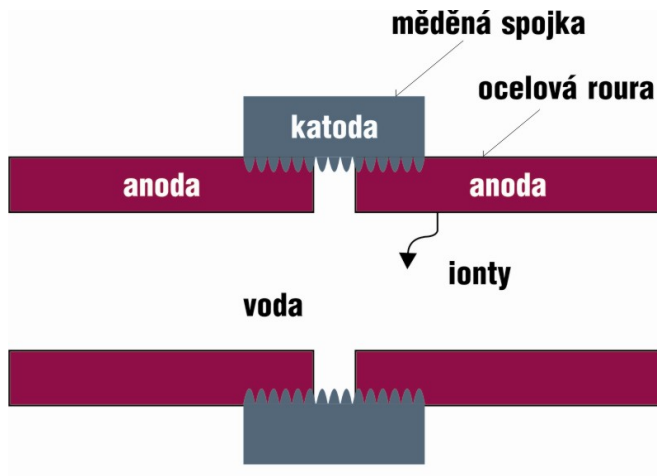
Vybíjení:



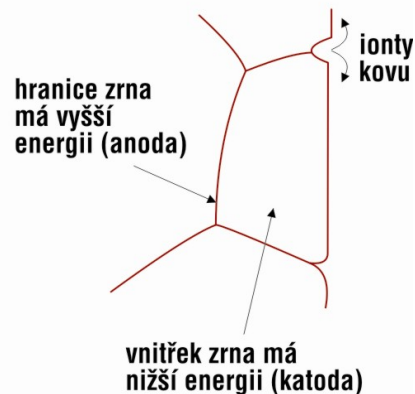
K modernějším akumulátorům patří akumulátor nikl – kadmiový (elektrody Ni a Cd, elektrolyt KOH) a nikl – vodíkový (elektrody Ni a vodík, vázaný v hybridu kovu, elektrolytem je opět KOH).

#### 1.4.9. Koroze kovů

Galvanické články mohou v některých případech hrát i roli zápornou. Je to případ nejrozšířenějšího druhu koroze – koroze elektrochemické. Ta vzniká například v místech, kde se stýkají dva kovy s různými elektrochemickými potenciály. Spojíme-li například dvě ocelové součástky (železo má vysoký elektrodový potenciál) měděnou spojkou (měď má elektrodový potenciál nižší) a bude-li se jejich spoj nacházet v korozním prostředí (např. voda + slabá kyselina či sůl), vznikne typický galvanický článek (Obr.1.8). V něm je ocel anodou, takže se bude postupně rozpouštět (rezivět) a na katodě (mědi) se bude vylučovat vodík. Protože tato chemická reakce probíhá obvykle dosti pomalu, bude zároveň docházet k oxidaci vodíku vzdušným kyslíkem, takže nedojde k polarizaci elektrody a koroze se nezastaví. Zjednodušeně lze říci, že méně ušlechtilý kov je anodou, která koroduje.

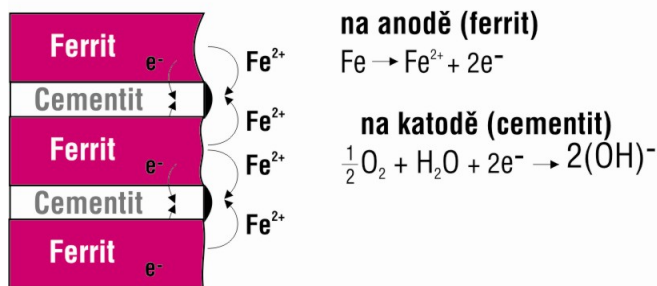


Obr.1.8. Korozí kovů (dvojice ocel – měď)

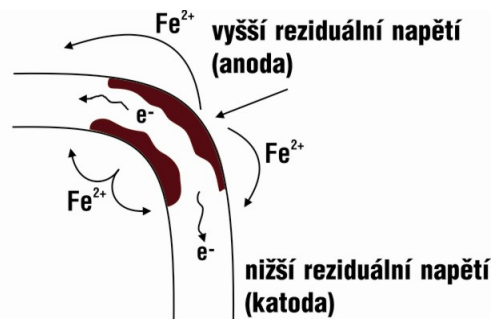


Obr.1.9. Korozní dvojice hranice zrna – vnitřek zrna

Z praxe však víme, že k elektrochemické korozi dochází i v případě, že se jedná o jediný kov, různě technologicky zpracovaný. Pozorujeme, že kovové součástky korodují přednostně v místech svárů, v místech namáhaných, apod. Hovoříme proto o vzniku korozních dvojic (např. hranice zrn – vnitřek zrn (Obr.1.9.), malá zrna – velká zrna, strukturní dvojice ferrit – cementit (Obr.10), deformovaná část – část nedeformovaná (Obr.1.11), atd.). V takovém případě je ta část, v níž je akumulována větší energie (hranice zrn, deformovaná část, svár) vždy anodou a tedy koroduje.

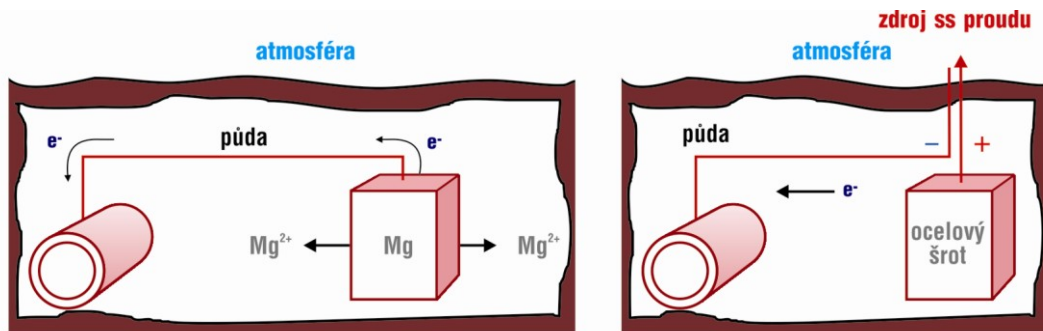


Obr.1.10. Strukturní korozní dvojice ferrit – cementit.



Obr.1.11. Deformační korozní dvojice

**Ochrana proti korozi.** Kovy lze chránit proti korozi dvěma základními způsoby: pasivně a aktivně. Při pasivní ochraně postupujeme tak, že vhodným nátěrem ochráníme anodu před kontaktem s elektrolytem. Při aktivní ochraně učiníme tu součástku, kterou chceme ochránit před korozi katodou – spojíme ji s méně ušlechtilým kovem, nebo kovem zdeformovaným (Obr.1.12).



Obr.1.12. Typický příklad anodové ochrany kovů (dvě možnosti).

### Řešené příklady

1. Kolik mědi se vyloučí za 24 hodin z roztoku  $\text{CuSO}_4$  proudem 100 A?  
 Elektrochemický ekvivalent mědi je  $A=0,328 \text{ mg}\cdot\text{A}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ .  
 Řešení: Dosazením do 1. Faradayova zákona dostaneme:  
 $M = A \cdot I \cdot t = 0,328 \text{ mg}\cdot\text{A}^{-1}\cdot\text{s}^{-1} \cdot 100 \text{ A} \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s} = 2,834 \text{ kg}$ .
2. Poniklování kovového předmětu, který má povrch  $120 \text{ cm}^2$ , trvalo 5 hodin. Proud, který obvodem protékal, byl 0,3 A. Určete tloušťku niklové vrstvičky, víte-li, že nikl je dvojnásobný.  
 Řešení: Na základě obou Faradayových zákonů lze psát, že

$$m = \frac{M}{vF} It = \frac{58,9}{2 \cdot 96510} \cdot 0,3 \cdot 5 \cdot 3600 = 1,64 \text{ g}$$

( $M$  je hmotnost molu niklu a  $v$  je jeho vaznost).

Protože hmotnost  $m$  můžeme vyjádřit jako součin plochy  $S$  hustoty  $\rho$  a tloušťky vrstvičky  $d$ , platí

$$M = S \cdot d \cdot \rho,$$

Takže pro tloušťku  $d$  vrstvičky dostaneme

$$d = \frac{m}{S \cdot \rho} = \frac{1,64 \text{ g}}{120 \text{ cm}^2 \cdot 8,8 \text{ g/cm}^3} = 1,55 \cdot 10^{-3} \text{ cm} = 15,5 \mu\text{m}$$

3. Určete koeficient disociace vodního roztoku KCl s koncentrací  $0,1 \text{ g.cm}^{-3}$ , jestliže měrný odpor tohoto roztoku je při  $18^\circ\text{C}$  roven  $7,36 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \text{m}$ . Pohyblivost iontů draslíku resp. chlóru je  $6,7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$  resp.  $6,8 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ .

Řešení:

Elektrická vodivost elektrolytu je  $\gamma = q \cdot n(b_+ + b_-) = \alpha \cdot q \cdot n_0(b_+ + b_-)$ , kde  $\alpha$  je koeficient disociace. Náboj jednovazného iontu je  $q = e$ . Koncentrace roztoku  $c =$

$m_0 \cdot n_0 = \frac{Mn_0}{N_A}$ , kde  $M$  je molární hmotnost rozpuštěné látky. Po dosazení dostaneme

$$\alpha = \frac{\gamma M}{ecN_A(b_+ + b_-)}$$

4. Určete tloušťku vrstvičky niklu, který se vyloučí při elektrolýze na předmětu o ploše  $1200 \text{ cm}^2$  za 6 hodin. Intenzita proudu, protékajícího roztokem je  $10,5 \text{ A}$ .

Řešení: Hmotnost niklu, vyloučeného na katodě je

$$\rho S d = \frac{At}{eN_A z}$$

Mocnoství niklu je  $z = 2$ . Ostatní konstanty nalezneme v tabulkách.

5. Kondenzátor o kapacitě  $10 \mu\text{F}$  je nabit na rozdíl potenciálů  $600 \text{ V}$ . Vybijeme ho přes elektrolytickou vanu s kyselou vodou. Kolik vodíku se vyloučí? Kolik energie můžeme získat, spálíme – li jej? Jak to souvisí se zákonem zachování energie?

Řešení: Náboj kondenzátoru je  $q = C \cdot \Delta\phi$  a v něm akumulovaná energie

$$W_{kon} = \frac{1}{2} C (\Delta\phi)^2 = 1,8 \text{ J}$$

Vyloučí se  $m = \frac{AC\Delta\phi}{eN_A z}$  vodíku. Při jeho spálení získáme

teplo  $Q = m \cdot \lambda = 9,1 \cdot 10^{-3} \text{ J}$ , což je mnohem méně, než energie kondenzátoru. Z toho vidíme, že část energie se přemění na teplo a pouze malá část na chemickou reakci.

6. Kolik energie spotřebujeme, abychom za normálních podmínek naplnili vodíkem balón kulového tvaru, aby měl vztlakovou sílu  $3000 \text{ N}$ ?

Řešení: Vztlaková síla je  $F = (\rho_0 - \rho_H)V \cdot g$ , kde  $\rho_0$  je hustota vzduchu a  $\rho_H$  je hustota

vodíku. Hmotnost vodíku je  $m = \rho_H V = \rho_H \frac{F}{g} (\rho_0 - \rho_H)$ . Podle Faradayova zákona

určíme náboj  $q$ , protékající elektrolytem. Energie, potřebná pro vyloučení vodíku je

$W = q \cdot E_{pol} + Q$ , kde  $Q$  jsou ztráty ve formě Jouleova tepla.  $E_{pol}$  (polarizační energii) jsme určili v předcházející úloze.

### Neřešené příklady

1. Za jak dlouho by se naplnil meteorologický balón o poloměru  $r = 0,5 \text{ m}$  vodíkem tak, aby tlak vodíku v něm byl  $p = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ , kdyby se vodík vyráběl elektrolýzou zředěné kyseliny sírové při proudu  $I = 10 \text{ A}$ ? Teplota vodíku necht' je  $\tau = 27^\circ\text{C}$ .

$$\left[ t = \frac{8\pi^3 \rho_H V F}{3IrT} = 48600 = 13500 \text{ min} \right]$$



2. Vypočítejte hmotnost kyslíku a vodíku, které se vyloučí při elektrolýze z roztoku  $\text{H}_2\text{SO}_4$  proudem 1 A za dobu 5 minut.

$$[m_{\text{H}_2} = 31 \text{ mg} \quad m_{\text{O}_2} = 25 \text{ mg}]$$

3. Jak velká elektrická energie rozloží při napětí 12 V vodu o hmotnosti 1 kg na kyslík a vodík?

$$[W = 357 \text{ kJ}]$$

4. K výrobě 1 kg hliníku o hmotnosti 1 kg v technickém provozu je třeba 25 kWh elektrické energie. Rozkladné napětí  $\text{Al}_2\text{O}_3$  je 2,79 V. Vypočítejte účinnost tohoto technického zařízení.

$$[\eta = 33\%]$$

5. Jaký proud zvolíme k poniklování drátu délky 100 m a průměru 2 mm, je – li dovolená proudová hustota  $0,03 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ? Určete hmotnost niklu, který se vyloučí za 3 hodiny?

$$[I = 188 \text{ A}, m = 0,6 \text{ kg}]$$

7. Jaké je rozkladné napětí  $U$  sirníku zinečnatého, jestliže k výrobě 1 kg zinku spotřebujeme 4 kWh elektrické energie? Účinnost technického zařízení je 54 %.

$$[U = 264 \text{ V}]$$

8. Při zinkování součástek bylo spotřebováno 10 kWh elektrické energie. Určete hmotnost zinku, který byl vyloučen, jestliže napětí na elektrodách bylo 4V

$$[m = 306 \text{ g}]$$

9. Určete hmotnost hliníku, který se vyloučil z elektrolytu za 3é minut, jestliže elektrolytem procházel proud  $I = 2\text{A}$ .

$$[m = 0,33 \text{ g}]$$

10. Na které elektrodě elektrolytického kondenzátoru se vytvoří velmi tenká vrstva oxidu hlinitého? Proč se potom u něho nesmí měnit polarita?

$$[naně]$$

11.  $\text{NaCl}$  taje při teplotě  $770^\circ\text{C}$  a stává se elektrolytem. Vysvětlete, jak bychom této skutečnosti mohli využít k měření teploty v peci?

$$[Na \text{ stává vodič}]$$

12. Při průchodu proudu o intenzitě  $I = 5\text{A}$  elektrolytickou vanou, se v ní za čas  $t = 10$  min. vyloučilo  $m = 1,02$  g dvojjazného kovu. Určete relativní atomovou hmotnost tohoto kovu.

$$[63,4]$$

13. Dvě elektrolytické vany jsou spojeny sériově. V první z nich se vyloučilo  $m_1 = 3,9$  g zinku a ve druhé za stejnou dobu  $m_2 = 2,24$  g železa. Zinek je dvojjazný. Určete valenci železa.

$$[3]$$

14. Určete tloušťku  $d$  vrstvičky mědi, která se vyloučila za  $t = 5$  hod. při elektrolýze síranu měďnatého. Hustota proudu byla  $j = 80 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ .

$$[d=54\mu\text{m}]$$

15. Intenzita proudu, procházejícího elektrolytickou vanou s roztokem síranu měďnatého, roste rovnoměrně v průběhu času  $\Delta t = 20$  s z hodnoty  $I_0 = 0$  na  $I = 2\text{ A}$ . Určete hmotnost mědi, která se za tento čas vyloučí na katodě.

$$[m=66\text{mg}]$$

16. V elektrolytické vaně prošel elektrolytem náboj  $Q = 193 \text{ kC}$ . Na katodě se přitom vyloučil  $\nu = 1$  kmol kovu. Určete jeho valenci  $z$ .

$$\left[ z = \frac{Q}{\nu F} = 2 \right]$$

17. Kolik atomů dvojjazvého kovu se vyloučí na  $1 \text{ cm}^2$  povrchu elektrody za čas  $t = 5$  min. při hustotě proudu  $j = 10 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$  ?

$$[9,310^7]$$

18. Kolik mědi se vyloučí z roztoku síranu měďnatého za 3 minuty, mění – li se proud s časem podle vztahu  $i = 6 - 0,03t$  ?

Návod k řešení: náboj, procházející roztokem určíme integrací, nebo graficky.

Hmotnost určíme potom z Faradayova zákona.

19. Určete nejmenší elektromotorické napětí zdroje, při kterém dojde k elektrolýze okyselené vody, víme – li, že při shoření 1 g vodíku se vyvine energie  $1,45 \cdot 10^2 \text{ kJ}$ .  
Návod k řešení: Emn zdroje proudu musí překonat polarizační emn, které lze určit,

známe – li měrnou energii chemické reakce:  $E_{pol} = \lambda K = \frac{\lambda A}{e N_A z}$

## Literatura:

- [1] Fuka, J, Havelka, B.: *Elektřina a magnetismus*. SPN Praha 1965
- [2] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.: *Fyzika*. VUTIUM Brno, PROMETHEUS Praha, 2000.
- [3] Savel
- [4] Putilov, K.A.: *Kurs fiziki II*, Fizmatgiz 1959
- [5] Horák, Z., Krupka, F., Šindelář, V.: *Technická fyzika*, SNTL Praha 1960
- [6] [www.dbme.feec.vutbr.cz/ubmi/courses/MKZS](http://www.dbme.feec.vutbr.cz/ubmi/courses/MKZS)
- [7] Sedlák, B., Štoll, I.: *Elektřina a magnetismus*. UK Praha, Academia Praha 1992.
- [8] Čičmanec, P.: *Elektřina a magnetismus*, Bratislava 2001
- [9] Tirpák, A.: *Elektromagnetismus*. Polygrafia SAV, 1999.
- [10] Serway, R.A.: *Physics*. Sanders College Publ. 1996.

## 2. Elektrický proud v plynech a ve vakuu

### 2.1. Výboje v plynech

Průchod elektrického proudu plyny nazýváme výbojem v plynech. V kovech, polovodičích a též v elektrolytech existují nosiče náboje vždy, nezávisle na procesech, souvisejících s průchodem proudu. Elektrické pole pouze ovlivňuje uspořádaný pohyb existujících nábojů. Plyny v normálním stavu jsou izolátory, neboť nosiče nábojů v nich chybí. Pouze za speciálních podmínek se v plynech mohou objevit nosiče nábojů (ionty, elektrony) a vzniká v nich elektrický proud.

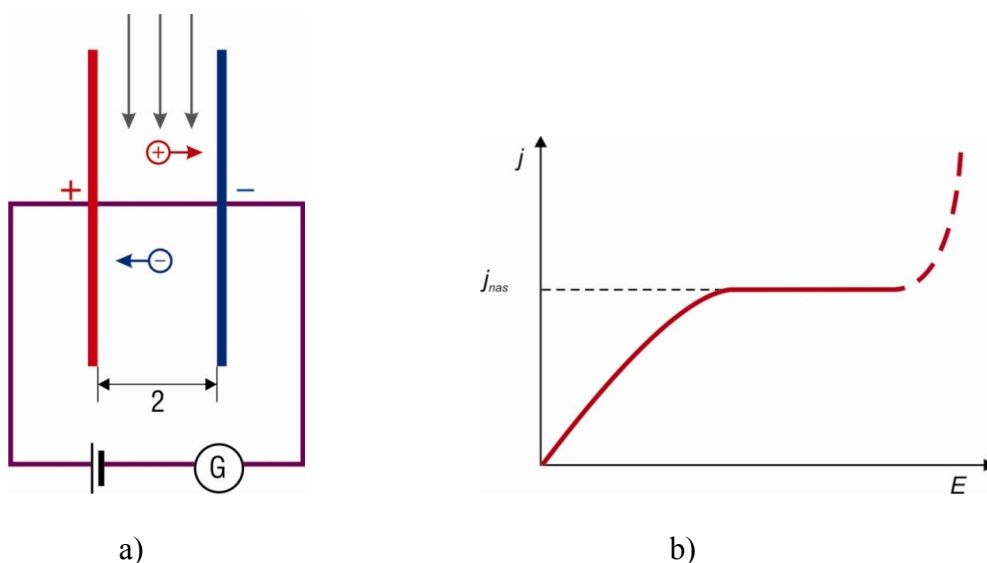
Nosiče nábojů v plynech mohou vznikat jako důsledek vnějšího působení, nesouvisejícího s působením elektrického pole. V tom případě hovoříme o *nesamostatném výboji* v plynech. Nesamostatný výboj může být způsoben ohřevem plynu na vysokou teplotu (termická ionizace), působením ultrafialových nebo rentgenových paprsků a také působením záření radioaktivních prvků.

Jestliže vznikají nosiče proudu jako výsledek těch procesů plynu, vyvolaných působením elektrického pole na plyn, hovoříme o *samostatném výboji*.

Charakter výboje v plynech závisí na mnoha faktorech: na chemické podstatě plynu a elektrod, na teplotě a tlaku plynu, na tvaru, rozměrech a vzájemné poloze elektrod, na intenzitě, hustotě a výkonu proudu, atd. Proto má výboj v plynech velmi různorodé formy. Může být doprovázen zářením a dokonce i zvukovými efekty – syčením, praskotem a hromem.

#### 2.1.1 Nesamostatný výboj v plynech.

Mějme plyn, nacházející se mezi rovinnými paralelními elektrodami (Obr.2.1 a), na který působí neustále s konstantní intenzitou nějaké ionizační činidlo (například rentgenové paprsky). Působení činidla vede k tomu, že dojde k oddělení elektronů od některých molekul, čímž se z nich stanou kladně nabitě ionty (atomy můžeme pokládat za jednoatomové molekuly). Za nepříliš nízkých tlaků se odštěpené elektrony usadí zpravidla na neutrálních molekulách a tím se z nich stanou záporně nabitě ionty. Označme jako  $\Delta n_i$  počet iontů, vznikajících vlivem ionizačního činidla za jednu sekundu v jednotce objemu.



Obr.2.1 a) Schematické znázornění experimentálního uspořádání pro studium vedení elektriny v plynech.  
b) Voltmapérová charakteristika nesamostatného výboje v plynech.

Spolu s procesem ionizace dochází v plynu i k procesu opačnému – k rekombinaci (tj. k neutralizaci iontů opačného znaménka při jejich vzájemném setkání, nebo při setkání kladného iontu s elektronem a tím ke vzniku neutrálních molekul). Počet dvojic iontů, rekombinujících za jednu sekundu v objemové jednotce označme, stejně jako tomu bylo i v případě elektrolytů, jako  $\Delta n_r$ . Tento počet je úměrný čtverci počtu dvojic iontů  $n$ , nacházejících se v objemové jednotce:

$$\Delta n_r = r n^2 \quad (2.1)$$

( $r$  je koeficient úměrnosti).

Ve stavu rovnováhy je  $\Delta n_i$  rovno  $\Delta n_r$ , tj.

$$\Delta n_i = r n^2 \quad (2.2)$$

Odtud dostaneme pro rovnovážnou koncentraci iontů (počet dvojic iontů v objemové jednotce) následující výraz

$$n = \sqrt{\frac{\Delta n_i}{r}} \quad (2.3)$$

Vlivem kosmického záření i v důsledku radioaktivního záření, způsobeného radioaktivními prvky, přítomnými v zemské kůře, vzniká každou sekundu v průměru několik dvojic iontů v  $\text{cm}^3$ . Pro vzduch je koeficient  $r = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$  a rovnovážná koncentrace iontů činí  $10^3 \text{cm}^{-3}$ . Tato koncentrace není dostatečná pro to, aby zajistila pozorovatelnou vodivost. Čistý, suchý vzduch je, jak známo, dobrým izolátorem.

Vložíme-li na elektrody napětí, potom k úbytku iontů bude docházet nejen v důsledku rekombinace, ale i v důsledku odsávání iontů elektrickým polem k elektrodám. Necht' je z objemové jednotky odsáno za každou sekundu  $\Delta n_j$  dvojic iontů. Je-li náboj každého iontu  $q$ , potom je neutralizace každého páru iontů na elektrodách doprovázena přenosem náboje  $q$  do obvodu. Každou sekundu dopadne na elektrody  $\Delta n_j \cdot S \cdot l$  dvojic iontů ( $S$  je plocha elektrod,  $l$  je vzdálenost mezi nimi. Potom  $S \cdot l$  je rovno objemu mezi elektrodami). Tedy intenzita proudu v obvodu bude rovna  $I = q \cdot \Delta n_j \cdot S \cdot l$  a odtud

$$\Delta n_j = \frac{I}{q l S} = \frac{j}{q l} \quad (2.4)$$

kde  $j$  je hustota proudu.

Při průtoku proudu je splněna následující podmínka rovnováhy:

$$\Delta n_i = \Delta n_r + \Delta n_j$$

Dosadíme – li sem výrazy (2.1) a (2.4), dostaneme

$$\Delta n_i = r n^2 + \frac{j}{q l} \quad (2.5)$$

Zároveň s tím lze pro hustotu proudu psát výraz, analogický výrazu pro celkový proud v elektrolytech:

$$j = qn(u_+ + u_-)E \quad (2.6)$$

kde  $u_+$  a  $u_-$  jsou pohyblivosti kladných a záporných iontů. V tomto výrazu je  $n$ , jak to plyne z (2.5) funkcí  $j$ , tj. v konečném součtu je funkcí  $E$ .

Vypočteme – li  $n$  z výrazů (2.5) a (2.6) a řešíme – li získanou kvadratickou rovnici, můžeme určit  $j$  z následujícího výrazu:

$$j = \frac{q(u_+ + u_-)^2}{2rl} E^2 \left( \sqrt{1 + \frac{4\Delta n r^2}{(u_+ + u_-)^2 E^2}} - 1 \right) \quad (2.7)$$

(druhé řešení je záporné a nemá fyzikální význam)

Diskuzi provedeme pro případ slabých a silných polí:

1. V případě slabých polí bude hustota proudu velmi malá a člen  $\frac{j}{ql}$  lze ve vztahu (2.5)

zanedbat ve srovnání s  $r \cdot n^2$  (to znamená, že úbytek iontů z prostoru mezi elektrodami probíhá zejména na úkor rekombinace. Stejný vztah mezi množstvím rekombinujících iontů a iontů, odsávaných polem platí i pro elektrolyty). Potom (2.5) přejde na (2.2) a pro rovnovážnou koncentraci iontů dostaneme

$$j = q \sqrt{\frac{\Delta n}{r}} (u_+ + u_-) E \quad (2.8)$$

(tento vztah získáme z (2.7), jestliže zanedbáme jednotku ve srovnání s

$$\left( \frac{4\Delta n r^2}{(u_+ + u_-)^2 E^2} \right)$$

Činitel při  $E$  ve vztahu (2.8) nezávisí na intenzitě pole. Tedy v případě slabých polí splňuje nesamostatný výboj Ohmův zákon.

Pohyblivost iontů v plynech je mnohem větší, než v elektrolytech – je řádu  $10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} / \text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ . Některé ionty, které nazýváme *Langevinovy ionty* mají 100 – 1000x menší pohyblivost. Tvoří je obyčejné ionty, spojené se zrnkem prachu, nebo kapičkou aerosolu, atd.

Při rovnovážné koncentraci  $n = 10^9 \text{ m}^{-3}$  a intenzitě pole  $E = 1 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  je hustota proudu podle vztahu (2.6) rovna  $j = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^9 (10^{-4} + 10^{-4}) \cdot 1 \sim 10^{-14} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ . (předpokládáme, že ionty byly jednou ionizované).

2. V případě silných polí lze činitel  $r \cdot n^2$  ve vztahu (2.5) zanedbat ve srovnání s  $\frac{j}{ql}$ . To

znamená, že prakticky všechny vznikající ionty dosáhnou elektrod, aniž stačí nekombinovat. Za této podmínky vztah (2.5) dostane tvar

$$\Delta n = \frac{j}{ql}, \text{ odkud}$$

$$j = q \Delta n_i l \quad (2.9)$$

(stejný výraz můžeme dostat z (2.7), použijeme – li transformačního vztahu

$$\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{1}{2}x, \text{ který platí pro malá } x).$$

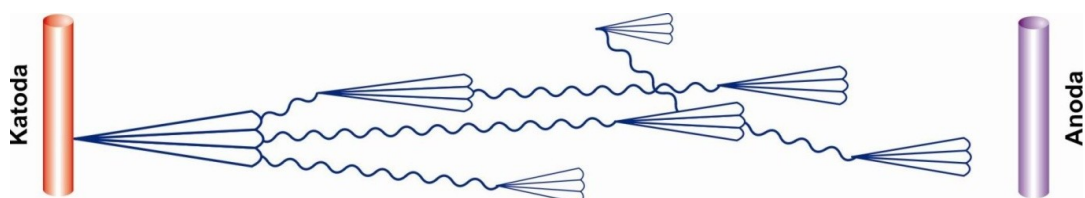
Hustota proudu (2.9) je tvořena všemi ionty, vytvořenými ionizačním činidlem ve sloupci plynu, nacházejícím se mezi elektrodami s jednotkovou plochou průřezu. Tedy tato hustota proudu je největší při dané intenzitě ionizačního činidla a velikosti a vzdálenosti mezi elektrodami, rovné  $l$ . Nazýváme ji *hustotou nasyceného proudu*  $j_{\max}$ .

Vypočteme  $j_{\max}$  pro následující hodnoty:  $\Delta n_i = 10^7 \text{ m}^{-3}$  (připomeňme, že ve vzduchu za atmosférického tlaku vzniká za každou sekundu v kubickém centimetru několik dvojic iontů),  $l = 0,1 \text{ m}$ . Podle vztahu (85.9) je tedy

$$j_{\max} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^7 \cdot 10^{-1} \sim 10^{-13} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}.$$

Tento výpočet ukazuje, že vodivost vzduchu je za normálních podmínek zanedbatelně malá.

Graf funkce (2.7) je uveden na Obr. 1b (spojitá křivka). Při dostatečně velkých hodnotách intenzity pole začíná proud prudce vzrůstat (čárkovaná část křivky). To lze objasnit tím, že elektrony, vytvořené vnějším ionizačním činidlem stačí v průběhu své volné dráhy získat energii, dostatečnou pro to, aby po srážce s molekulou způsobily její ionizaci (nárazová ionizace). Takto vzniklé volné elektrony jsou urychleny polem a opět způsobují další ionizaci. Tak dochází k tzv. lavinovitému zvyšování počtu iontů, původně vytvořených ionizačním činidlem, čímž dojde k zesílení proudu výboje (Obr.2.2). Tento proces však neztrácí charakter nesamostatného výboje, neboť přestane – li pracovat vnější ionizační činidlo, trvá výboj jenom tak dlouho, dokud všechny elektrony (primární i sekundární) nedosáhnou anody (zadní oblast prostoru, ve které se nacházející ionizující částice – elektrony, se posouvají k anodě). K tomu, aby se výboj stal samostatným, je nutné působení dvou vstříčných lavin iontů, což je možné pouze v tom případě, kdy nárazovou ionizaci jsou schopny vytvářet nosiče obou znamének.



Obr.2.2. Schéma, znázorňující vznik lavinového výboje v plynech.

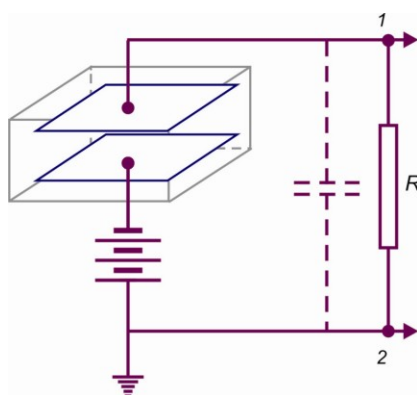
Je velmi důležité, že nesamostatné výbojové proudy, zesílené na úkor rozmnožení nosičů, jsou úměrné počtu primárních iontů, vytvořených vnějším ionizačním činidlem. Tato vlastnost výboje je využívána v tzv. proporcionálních násobičích (počítačích).

### 2.1.2. Ionizační komory a počítače částic.

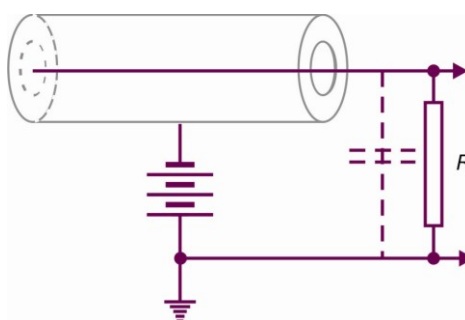
Činnost ionizačních komor a počítačů – přístrojů, používaných pro měření intenzity rentgenového a gama záření, je založena na využití nesamostatného výboje v plynech.

Principiální schéma ionizační komory a počítače je stejné (Obr. 3a,b). Liší se pouze režimem práce a konstrukčními detaily. Počítač (Obr. 3b) se skládá z válcového tělíska, v jehož ose je upevněna od pláště izolací oddělená elektroda ve tvaru tenkého vlákna (anoda). Jako druhá elektroda (katoda) slouží obal počítače. Někdy je počítač uzavřen do skleněného obalu. Vstupní otvor pro vstup ionizujícího záření je v čele počítače tvořen okénkem,

překrytým hliníkovou fólií, nebo fólií, vyrobenou ze slídy. Některé částice, stejně jako rentgenové a gama záření, pronikají do počítače, nebo ionizační komory přímo přes jejich stěny. Ionizační komora (Obr.2.3a) může mít elektrody různého tvaru. Například mohou být stejné, jako u počítače, nebo mohou mít tvar rovnoběžných destiček, apod.

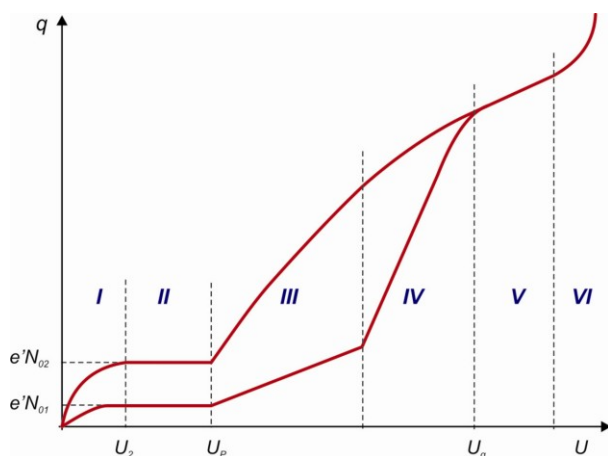


Obr.2.3 a) Ionizační komora

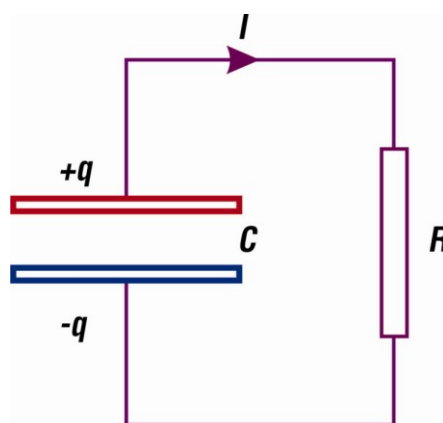


b) Počítač

Předpokládejme, že do prostoru mezi elektrodami vletí urychlená částice (např.  $\alpha$ , nebo  $\beta$  částice), která vytvoří  $N_0$  dvojic primárních iontů (elektronů a kladných iontů). Vzniklé ionty jsou usměřovány elektrickým polem k elektrodám a v důsledku toho projde zatěžovacím odporem  $R$  náboj  $q$ , který nazveme impulzem proudu. Na Obr.2.4a je zobrazena závislost pulzního proudu  $q$  na napětí  $U$  mezi elektrodami pro dvě různá množství primárních iontů  $N_0$ , lišících se od sebe třikrát ( $N_{02} = 3N_{01}$ ). V grafu lze pozorovat šest oblastí, značených římskými číslicemi. Oblasti I a II jsme podrobně diskutovali v předcházejícím paragrafu. Konkrétně oblast II je oblastí nasyceného proudu – všechny ionizačním činidlem vytvořené ionty dopadnou na elektrody, aniž stačí nekombinovat. Je jasné, že v tomto případě proudový impulz nezávisí na napětí.



Obr.2.4a) Závislost pulzního proudu na napětí pro počítač a ionizační komoru.



b) K vysvětlení činnosti počítače a ionizační komory.

Po dosažení napětí  $U_0$  dosáhne pole takové hodnoty, že elektrony získají možnost ionizovat molekuly nárazem. Proto množství elektronů a kladných iontů roste lavinovitě. Výsledkem je, že na každou z elektrod dopadne  $A \cdot N_0$  iontů. Veličina  $A$  je tzv. *plynový koeficient zesílení*. V oblasti III tento koeficient nezávisí na množství primárních iontů  $N_0$  (ale závisí na napětí). Proto udržujeme – li napětí konstantní, bude proudový impulz úměrný

množství primárních iontů, vytvořených ionizačním činidlem. Oblast III se nazývá *oblastí proporcionality* a napětí  $U_0$  *prahem proporcionality*. Koeficient plynového zesílení se mění v této oblasti z hodnoty 1 na začátku, až na  $10^3 - 10^4$  na konci (na Obr.2.4a není uvedeno měřítko a na ose  $q$  je dodržen pouze poměr 1:3 mezi souřadnicemi křivek na ose  $y$  v oblastech II a III).

V oblasti IV, která se nazývá *oblastí částečné proporcionality* koeficient  $A$  stále silněji závisí na  $N_0$ , v důsledku čehož rozdíl v impulzech proudu, vytvořených různým množstvím primárních iontů, se stále více zmenšuje.

Při napětích, odpovídajících oblasti V (nazývá se Geigerova oblast a napětí  $U_g$  – *prahem* této oblasti), získává proces charakter samostatného výboje. Primární ionty vytvoří pouze počáteční popud pro jeho vznik. Velikost proudového pulzu v této oblasti vůbec nezávisí na počtu primárních iontů.

V oblasti VI je napětí natolik vysoké, že vzniklý výboj má trvalý ráz, neukončí se. Proto se nazývá *oblastí spojitého výboje*.

**Ionizační komora.** V tomto případě se jedná o přístroj, pracující v oblasti II, kdy nedochází k zesílení vlivem napětí. Existují dva druhy ionizačních komor. Komory prvního druhu se používají pro registraci impulzů, vytvořených jednotlivými částicemi (impulsní komory). Částice, která vnikne do komory, v ní vytvoří určitý počet iontů a v důsledku toho začne odporem  $R$  téci proud  $i$ . To vede k tomu, že potenciál bodu 1 (viz Obr.2.3a) se zvýší a bude roven  $i \cdot R$  (původně byl potenciál tohoto bodu stejný, jako je potenciál uzemněného bodu 2). Tento potenciál jde na zesilovač a po zesílení uvede v činnost počítačící zařízení. Potom, jakmile všechny náboje, které dopadly na vnitřní elektrodu, projdou přes odpor  $R$ , proud přestane téci a potenciál bodu 1 bude opět nulový. Charakter práce komory závisí na délce trvání impulzu proudu, způsobeného jednou částicí.

Vysvětlení, na čem závisí délka trvání impulzu, provedeme pomocí obvodu, skládajícího se z kondenzátoru  $C$  a odporu  $R$  (Obr.2.4b). Dodáme – li na desky kondenzátoru opačné náboje  $q_0$ , proteče přes odpor  $R$  proud a velikost náboje na deskách bude klesat.

Okamžitá hodnota napětí na odporu bude rovna  $U = \frac{q}{C}$ . Tedy intenzita proudu bude

$$i = \frac{U}{R} = \frac{q}{RC} \quad (2.10)$$

Úbytek náboje na deskách  $-dq$  je roven  $i \cdot dt$ . Tedy  $i$  ve vztahu (2.10) lze nahradit výrazem  $-\frac{dq}{dt}$ , nakonec dostaneme následující diferenciální rovnici:

$$-\frac{dq}{dt} = \frac{q}{RC}$$

Separací proměnných dostaneme

$$\frac{dq}{q} = -\frac{1}{RC} dt$$

Podle (2.10) je  $\frac{dq}{q} = \frac{di}{i}$ .



Proto lze psát, že  $\frac{di}{i} = -\frac{1}{RC} dt$ .

Integrujeme – li tento výraz, dostaneme

$$\ln i = -\frac{1}{RC} t + \ln i_0 \quad (2.11)$$

kde  $\ln i_0$  je integrační konstanta.

Nakonec dostaneme

$$i = i_0 e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (2.12)$$

Pro  $t = 0$  je  $i = i_0$ , takže  $i_0$  je počáteční hodnota proudu.

Z výrazu (2.12) plyne, že za čas

$$\tau = RC \quad (2.13)$$

klesne intenzita proudu  $e$  – krát. Podle toho nazýváme veličinu (2.13) *časovou konstantou* obvodu. Čím větší je tato veličina, tím pomaleji klesá proud v obvodu.

Schéma ionizační komory (Obr.2.3a) je totožné se schématem, zobrazeným na Obr.2.4b. Roli kapacity  $C$  hraje mezielektrodová kapacita, vyznačená na obrázku čárkovaně. Čím větší je odpor  $R$ , tím silněji se bude zvyšovat napětí bodu 1 při dané intenzitě proudu a tím tedy snadněji zaznamenáme impulz. Proto se snažíme o co největší odpor  $R$ . Spolu s tím, aby mohla komora registrovat pulzy proudu odděleně, musí být časová konstanta malá. Proto při výběru velikosti  $R$  pro pulzní komory musíme nalézt kompromis. Obvykle vybíráme  $R$  řádu  $10^8 \Omega$ . Potom při  $C = 10^{-11} \text{ F}$  bude časová konstanta rovna  $10^{-3} \text{ s}$ .

Jiným typem ionizačních komor jsou tzv. integrující komory. U nich vybíráme  $R$  řádu  $10^{15} \Omega$ . Při  $C = 10^{-11} \text{ F}$  bude časová konstanta rovna  $10^4 \text{ s}$ . V tom případě impulzy proudu, způsobené jednotlivými ionizujícími částicemi se spojují a odporem protéká stejnosměrný proud, jehož velikost charakterizuje celkový náboj iontů, které vznikly v komoře za jednotku času.

Tedy ionizační komory obou typů se liší pouze velikostí časové konstanty  $R \cdot C$ .

**Proporciální počítače.** Impulzy, způsobené jednotlivými částicemi, mohou být značně zesíleny ( $10^3 - 10^4$  krát), jestliže se napětí mezi elektrodami bude nacházet v oblasti III (Obr.2.4a). Přístroj, pracující v takovém režimu, se nazývá *proporciálním počítačem*. Vnitřní elektroda počítače je zhotovena ve tvaru vlákna o průměru několika setin milimetru. Tato elektroda je anodou. Intenzita pole mezi elektrodami klesá se vzdáleností podle vztahu  $1/r$  a proto je její hodnota v oblasti blízko vlákna velmi vysoká. Při dostatečně velkém napětí mezi elektrodami elektrony, vzniklé poblíž vlákna získávají vlivem pole energii, dostatečnou k tomu, aby způsobily ionizaci nárazem. Výsledkem je „rozmnožení“ iontů. Rozměry objemu, v němž dochází k tomuto rozmnožování rostou s růstem napětí. V souladu s tím roste i koeficient zesílení plynu.

Množství primárních iontů závisí na podstatě a energii částice, která způsobila impulz. Proto podle velikosti impulzů na výstupu proporciálního počítače lze rozlišovat částice různé podstaty a také provést rozdělování částic jedné a téže podstaty podle jejich energie.

Proporciální počítače mohou registrovat i neutrony. V tomto případě je počítač naplněn plynem  $\text{BF}_3$  (fluorid bóru). Neutrony způsobí jadernou reakci s izotopem bóru s hmotovým číslem 10 ( $^{10}\text{B}$ ), přičemž vznikají  $\alpha$  částice, které způsobí primární ionizaci.

**Geigerovy Millerovy počítače.** Ještě většího zesílení impulzu (až  $10^8$  krát) lze dosáhnout, necháme – li pracovat počítač v Geigerově oblasti (oblast V na Obr. 2.4a). Počítač, pracující v tomto režimu, nazýváme *Geigerovým – Millerovým* (zkráceně *Geigerovým*). Jak jsme již poznamenali, výboj v této oblasti přechází ve výboj samostatný. Primární ionty, vytvořené ionizující částicí pouze „spustí“ výboj, takže velikost impulzu nezávisí na počáteční ionizaci. Proto, abychom získali od jednotlivých částic různé pulzy, je nutné vzniklý výboj rychle zhasnout. Toho se dosahuje buď s pomocí vnějšího odporu R (v *nesamozhášecích* počítačích), nebo na úkor procesů, vznikajících v samotném počítači. V posledním případě se počítač nazývá *samozhášecí*.

Zhasinání výboje s pomocí vnějšího odporu se objasňuje tak, že při průtoku výbojového proudu odporem na něm vzniká velký spád napětí. Výsledkem je, že na mezielektrodivý interval (vzdálenost) připadá pouze část přiloženého napětí, která je nedostatečná pro udržování výboje.

Ukončení výboje v samozhášecích počítačích je podmíněno následujícími příčinami. Elektrony mají mnohem větší (asi 1000 krát) pohyblivost, než kladné ionty. Proto za dobu, za kterou dosáhnou elektrony vlákna, se nestačí kladné ionty téměř ani pohnout ze svých poloh. Tyto ionty vytvoří kladný prostorový náboj, zeslabující pole poblíž vlákna a výboj se ukončí. Zhášení výboje v tomto případě brání doplňující procesy, které zde pro jejich složitost nebudeme dále rozvádět. Kvůli jejich potlačení se k plynu, vyplňujícímu počítač (obvykle argon) přidává směs víceatomového plynu (např. páry etanolu). Takový počítač rozlišuje pulzy od částic, které po sobě následují v časovém intervalu řádu  $10^{-4}$  s.

### 2.1.3. Procesy, vedoucí ke vzniku nosičů proudu při samostatném výboji.

Nosiče proudu, elektrony a ionty, mohou vznikat při samostatném výboji na úkor různých procesů, z nichž některé uvedeme, než přejdeme k popisu jednotlivých druhů výboje.

**Srážky elektronů s molekulami.** Srážky elektronů (a též iontů) s molekulami mohou mít pružný i nepružný charakter. Molekula, stejně jako i atom, se může nacházet v diskrétních elektrických stavech. Stav s nejmenší energií se nazývá základním. K tomu, abychom převedli molekulu ze základního stavu do libovolného vyššího (nabudili ji), je třeba dodat určitou energii  $W_1$ ,  $W_2$ , atd. Dodáme – li molekule dostatečně vysokou energii  $W_i$ , můžeme ji ionizovat.

Molekula v nabuzeném stavu setrvává zpravidla pouze po dobu asi  $10^{-8}$  s a poté přejde znovu do základního stavu a vyzáří nadbytek energie ve formě kvanta světla – fotonu. V některých takzvaných *metastabilních* stavech se molekula může nacházet značně déle – asi  $10^{-3}$  s.

Při srážce částic musí být splněny zákony zachování energie a hybnosti. Proto při předání energie při rázu musí být splněna určitá omezení – ne všechna energie, kterou má narážející částice, může být předána druhé částici.

Jestliže při srážce nemůže být molekule předána energie, dostačující k jejímu nabuzení, zůstane celková kinetická energie částic beze změny a ráz bude *pružný*. Necht' částice o hmotnosti  $m_1$  má rychlost  $v_{01}$  a narazí do částice  $m_2$  ( $v_{20} = 0$ ). Při středovém rázu musí být splněny tato podmínky:

$$\frac{m_1 v_{01}^2}{2} = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2}, \quad \text{a} \quad m_1 v_{10} = m_1 v_1 + m_2 v_2,$$

kde  $v_1$  a  $v_2$  jsou rychlosti částic po srážce.

Řešíme – li tuto soustavu rovnic vzhledem k neznámým  $v_1$  a  $v_2$ , dostaneme

$$v_2 = \frac{2v_0 m_1}{m_1 + m_2}$$

Tedy pro energii, která se předá při pružném rázu druhé částici, dostaneme výraz

$$\Delta W_{pruž} = \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1^2 v_0^2}{2} \left( \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \right)$$

Je-li  $m_1 \ll m_2$ , lze tento výraz napsat následovně

$$\Delta W_{pruž} = \frac{m_1^2 v_0^2}{2} \frac{4m_1}{m_2} = W_{01} \frac{4m_1}{m_2} \quad (2.14)$$

kde  $W_{01}$  je energie narážející částice před rázem.

Ze vztahu (2.14) plyne, že lehká částice (elektron), narážející na těžkou částici (molekulu), předá jí pouze malou část své zásoby energie ( $m_1/m_2 \ll 1$ ). Lehká částice „odskočí“ od těžké, stejně jako odskočí míč od stěny a prakticky se nemění velikost její rychlosti. Jak ukazuje odpovídající výpočet, při nestředovém rázu je předávaná energie ještě menší.

Má-li dopadající částice (elektron či iont) dostatečně velkou energii, může dojít k nabuzení či ionizaci molekuly, na kterou částice dopadá. V tom případě se celková kinetická energie obou částic nezachovává – část energie se přemění na nabuzení či ionizaci, tj. na zvýšení vnitřní energie obou srážejících se částic. Takové rázy se nazývají *nepružnými rázy prvního druhu*.

Molekula, nacházející se v nabuzeném stavu při srážce s jinou částicí (elektronem, iontem, nebo neutrální molekulou) se může vrátit do základního stavu, a aniž vyzáří nadbytek energie, předá ji elektronu. V tom případě bude celková kinetická energie částic po rázu vyšší, nežli před ním. Takové srážky se nazývají *nepružnými srážkami druhého druhu*. Přechod molekul z metastabilního stavu do stavu základního je možný pouze na úkor nepružných srážek druhého druhu.

Při nepružné srážce prvního druhu mají vztahy pro zachování energie a hybnosti následující tvar:

$$\frac{m_1 v_0^2}{2} = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} + \Delta W_{in} \quad (2.15)$$

$$m_1 v_0 = m_1 v_1 + m_2 v_2$$

kde  $\Delta W_{in}$  je veličina, charakterizující zvýšení vnitřní energie molekuly, odpovídající jejímu přechodu do nabuzeného stavu.

Vyloučíme – li  $v_1$  z rovnice (2.15), dostaneme

$$\Delta W_{in} = m_2 v_0 v_2 - \frac{m_1 + m_2}{m_1} \frac{m_2 v_2^2}{2} \quad (2.16)$$

Při jedné a téže rychlosti narážející částice ( $v_{01}$ ), závisí přírůstek vnitřní energie  $W_{in}$  na rychlosti  $v_2$ , se kterou se molekula pohybuje po rázu. Abychom našli největší možnou hodnotu  $\Delta W_{in}$ , budeme derivovat funkci (2.16) podle  $v_2$  a získaný výraz položíme roven nule:

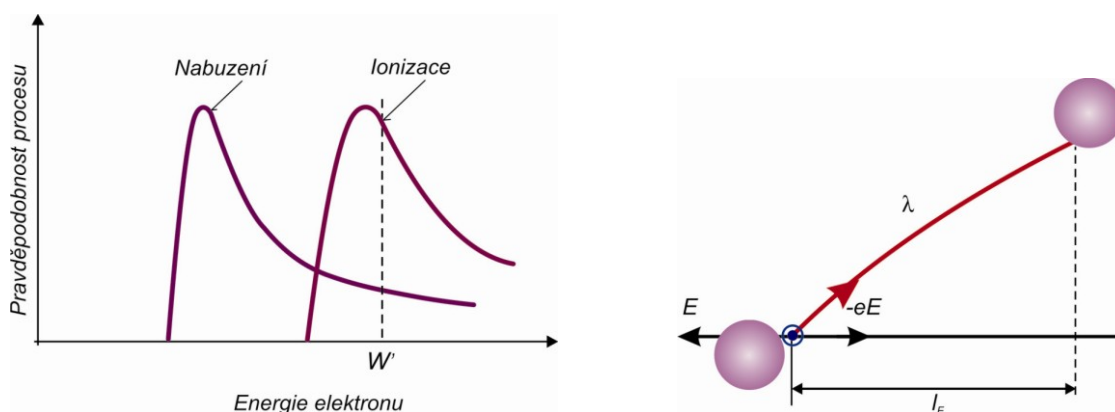
$$\frac{d(\Delta W_{in})}{dv_2} = m_2 v_{01} - \frac{m_1 + m_2}{m_1} m_2 v_2 = 0$$

Odtud  $v_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_{01}$ . Dosadíme - li tento výraz za  $v_2$  do (2.16), dostaneme

$$\Delta W_{inmax} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \frac{m_1 v_{01}^2}{2} \quad (2.17)$$

Je-li dopadající částice značně lehčí, než ta, na niž dopadne ( $m_1/m_2 \ll 1$ ), bude koeficient při  $\frac{m_1 v_{01}^2}{2}$  ve vztahu (2.17) blízký k 1. Tedy při srážce lehké částice (elektronu) s částicí těžkou (molekulou), může být téměř veškerá energie narážející částice spotřebována na nabuzení, nebo ionizaci molekuly (v případě ionizace bude výraz (2.15) složitější, neboť po srážce nebudou dvě částice, ale tři. Avšak závěr o možnosti spotřebování téměř veškeré energie elektronu na ionizaci zůstane oprávněný).

Někdy, i když je energie dopadající částice (elektronu) dostatečně velká, nemusí nárůst nutně vést k nabuzení, nebo ionizaci molekuly. Existuje určitá pravděpodobnost obou těchto procesů, která závisí na rychlosti, tj. i na energii elektronu. Na Obr.2.5a je ukázán schematicky průběh těchto pravděpodobností. Čím rychleji letí elektron, tím po kratší časový interval vzájemně působí na molekulu, okolo které prolétá. Proto dosahují obě pravděpodobnosti rychle maxima a potom se zvyšováním energie elektronu klesají. Jak je vidět z obrázku, elektron, mající například energii  $W'$  bude s vyšší pravděpodobností způsobovat ionizaci molekul, než jejich nabuzení.



Obr.2.5a) Průběh pravděpodobnosti při nárazu molekul. b) Skutečná dráha částice v plazmatu

**Sekundární elektronová emise při výboji v plynech.** Sekundární elektronovou emisí rozumíme emisi elektronů z povrchu pevného tělesa, nebo z kapaliny při jejich bombardování elektrony, nebo ionty. Poměr počtu sekundárních elektronů  $N_2$  k počtu  $N_1$  částic, způsobujících emisi, nazýváme *koeficientem sekundární emise*:

$$\delta = \frac{N_2}{N_1}$$

(2.18)

Koeficient sekundární emise závisí na kvalitě povrchu a na částicích, které ho bombardují a také na jejich energii. Rychlost sekundárních elektronů není velká a na energii primárních částic nezávisí.

V případě bombardování povrchu kovů elektrony dosahuje koeficient sekundární emise maxima při energii primárních elektronů rovné řádově několika stům elektronvoltů (od 200 do 800 eV pro různé kovy). Nejvyšší hodnoty koeficientu  $\delta_{max}$  se nacházejí v mezích od 0,5 (pro Be) do 1,8 (pro Pt). Pro polovodiče může  $\delta_{max}$  dosahovat mnohem vyšších hodnot (řádu 10). Tedy sekundární emisi od vybraného povrchu lze použít k „rozmnožení“ množství elektronů v paprsku. V *elektronových násobičích* (Obr.2.11) jsou sekundární elektrony, vyražené každým z dopadajících elektronů urychlovány elektrickým polem a poté bombardují následující elektrodu. S pomocí takových přístrojů lze dosáhnout zesílení elektronových paprsků řádu  $10^5 - 10^6$ .

**Autoelektronová emise při výboji v plynech.** Vytvoříme – li poblíž povrchu kovu elektrické pole o velmi vysoké intenzitě ( $\sim 10^6$  V/cm), pozorujeme jev, zvaný *autoelektronová*, nebo *studená* emise. Tento jev někdy vysvětlujeme jako vytrhávání elektronů elektrickým polem. Autoelektronová emise byla objasněna pomocí kvantové teorie (jako tzv. tunelový jev) a její podrobnější objasnění bude provedeno později.

**Fotoemise při výboji v plynech.** Elektromagnetické záření (včetně viditelného světla) má kromě vlnové ještě korpuskulární povahu, vyjádřenou elementárními částicemi – *fotony*. Energie potom je rovna  $h \cdot \nu$ , kde  $h$  je Planckova konstanta a  $\nu$  je frekvence záření. Foton může být pohlcen molekulou a jeho energie se spotřebuje na nabuzení molekuly, nebo na její ionizaci. V tom případě hovoříme o *fotoionizaci*. Přímá fotoionizace může být způsobena ultrafialovým zářením. Viditelné záření (které má nižší frekvenci) může vyvolat tzv. stupňovitou fotoionizaci. Energie fotonu viditelného záření nestačí na odštěpení elektronu od molekuly. Avšak stačí k tomu, aby převedla molekulu do jednoho z nabuzených stavů. Pro ionizaci molekuly, která se nachází v nabuzeném stavu, je potřeba menší energie, než je potřebné k ionizaci molekuly v základním stavu. Proto je možné ionizace molekuly, nabuzené fotonem, dosáhnout na úkor její srážky s jinou molekulou.

Při výboji v plynu může vzniknout krátkovlnné záření, které může způsobit přímou fotoionizaci. Dostatečně rychlý elektron může při srážce nejen ionizovat molekulu, ale může i převést vzniklý iont do nabuzeného stavu. Přejít iontu do základního stavu je doprovázen vyzářením fotonu o kratší vlnové délce (tj. s vyšší frekvencí), než záření neutrální molekuly. Energie fotonů takového záření stačí vyvolat bezprostřední fotoionizaci.

Kromě probraných procesů hraje v některých druzích samostatného výboje v plynech velkou roli jev termoemise, nebo fotoemise (vnější fotoefekt), spočívající v emisi elektronu z povrchu kovu nebo polovodiče při ozáření světlem s dostatečně krátkou vlnovou délkou. Avšak role fotoelektronové emise v různých druzích samostatného výboje si dále všimát nebudeme.

#### 2.1.4. Plazma výbojů v plynech.

Při některých druzích samostatného výboje bývá stupeň ionizace plynu poměrně vysoký. Plyn, který se nachází v silně ionizovaném stavu za podmínky, že celkový náboj elektronů a iontů je v každém elementárním objemu roven (nebo velmi blízký) nule, nazýváme plazmatem. Jinými slovy *plazma je silně ionizované kvazineutrální prostředí, ve kterém chaotický pohyb částic převládá nad jejich usměrněným pohybem, způsobeným vnějším elektrickým polem.*

Plazma je speciálním tzv. čtvrtým skupenstvím hmoty. V takovém skupenství se nachází látka, tvořící Slunce a hvězdy a mající teplotu až několik desítek milionů kelvinů. Plazma, vznikající v důsledku vysoké teploty látky se nazývá *vysokoteplotním plazmatem*. Plazma, vznikající při výbojích v plynech se nazývá *výbojovým*.

K tomu, aby se plazma nacházelo ve stacionárním stavu, je nutná činnost procesů, kompenzujících úbytek iontů v důsledku rekombinace. Ve vysokoteplotním plazmatu se to děje na úkor termické ionizace a ve výbojovém plazmatu – na úkor nárazové ionizace, uskutečňované elektrony, urychlenými elektrickým polem. Zvláštním druhem plazmatu je ionosféra (jedna z vrstev atmosféry). Vysoký stupeň ionizace molekul ( $\sim 1\%$ ) je v tomto případě udržován pomocí fotoionizace, uskutečňované krátkovlnným zářením Slunce.

Elektrony ve výbojovém plazmatu se účastní dvou pohybů – chaotického pohybu s určitou střední rychlostí  $\bar{V}$  a uspořádaného pohybu ve směru opačném, než je směr  $\vec{E}$ , se střední rychlostí  $\bar{u}$  (o několik řádů nižší, než je  $\bar{V}$ ). Podmínky v plazmatu jsou takové, že elektrické pole způsobuje nejen uspořádaný pohyb elektronů, ale též zvyšuje rychlost  $\bar{V}$  jejich chaotického pohybu.

Nechť v okamžiku zapojení pole v plynu existuje jistý počet elektronů, u nichž střední hodnota rychlosti odpovídá teplotě plynu  $T_p$   $\left(\frac{m\bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2}kT_p\right)$ . Za dobu mezi dvěma po sobě následujícími nárazy s molekulou plynu elektron prochází průměrnou dráhu  $\lambda$  (Obr.5b) trajektorie elektronu je lehce zakřivená v důsledku síly  $-e\vec{E}$ . Přitom pole vykoná práci

$$W = eEl_f \quad (2.19)$$

kde  $l_f$  je průmět posunutí elektronu do směru síly.

V důsledku srážek s molekulami se směr pohybu elektronu po celou dobu mění náhodným způsobem. Proto práce (2.19) pro jednotlivé úseky trajektorie má různou velikost i různé znaménko. Na některých úsecích pole zvyšuje energii elektronu a na jiných ji zmenšuje. Jestliže by uspořádaný pohyb elektronů chyběl, střední hodnota  $l_f$  a tedy i práce (2.19) by byla rovna nule. Avšak existence uspořádaného pohybu vede k tomu, že střední hodnota práce  $W$  je různá od nuly a přitom kladná. Je rovna

$$W = eE\bar{u}\tau = eE\bar{u}\frac{\lambda}{v} \quad (2.20)$$

Kde  $\tau$  je střední doba volné dráhy elektronu  $(\bar{u} \ll \bar{v})$ .

Tedy pole v průměru zvyšuje energii elektronu. Je jisté, že elektron, který se srazil s molekulou, jí předal část své energie. A jak jsme objasnili v předcházejícím paragrafu, část  $\delta$  při tomto rázu předané energie je velmi malá – je ve střední hodnotě rovna  $\delta = 2\frac{m}{M}$ , kde  $m$  je hmotnost elektronu a  $M$  je hmotnost molekuly (v souladu se vztahem (2.19) je při středovém rázu  $\delta = 4\frac{m}{M}$ . V případě, kdy elektron a molekula se lehce „dotknou“, je  $\delta = 0$ ).

Ve zředěném plynu ( $\lambda$  je nepřímo úměrná tlaku) a při dostatečně velké intenzitě pole  $E$  může práce (2.20) převýšit energii  $\frac{\delta m \bar{v}^2}{2}$ , která je v průměru předána molekule při každé srážce. Proto energie chaotického pohybu elektronu bude růst. Nakonec dosáhne hodnoty,

dostatečné k tomu, aby nabudila, nebo ionizovala molekulu. Počínaje tímto okamžikem, část srážek přestane být pružnými a je doprovázena velkou ztrátou energie. Proto se střední podíl předávané energie  $\bar{\delta}$  zvyšuje.

Tedy energii, potřebnou pro ionizaci, získají elektrony nikoliv během jedné volné dráhy, ale postupně po dobu řady průběhů na střední volné dráze. Ionizace vede ke vzniku velkého množství elektronů a kladných iontů – vznikne plazma.

Energie elektronů v plazmatu je dána podmínkou, že průměrná velikost práce, vykonané polem na elektronech za dobu, potřebnou pro průběh střední volné dráhy, je rovna střední velikosti energie, kterou odevzdá elektron při srážce s molekulou:

$$eE\bar{t} = \bar{\delta} \frac{m\bar{v}^2}{2}$$

(v tomto vztahu je  $\bar{\delta}$  složitou funkcí  $\bar{v}$ ).

Pokus ukazuje, že pro elektrony ve výbojovém plazmatu platí maxwellovské rozdělení částic podle rychlostí. V důsledku slabého vzájemného působení elektronů s molekulami ( $\delta$  při pružném rázu je velmi malé a relativní množství nepružných srážek je zanedbatelné) se střední rychlost chaotického pohybu elektronů ukazuje být mnohokrát větší, než rychlost, odpovídající teplotě plynu  $T_p$ . Jestliže zavedeme pojem elektronové teploty  $T_e$ , můžeme ji určit ze vztahu

$$\frac{m\bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2}kT_e,$$

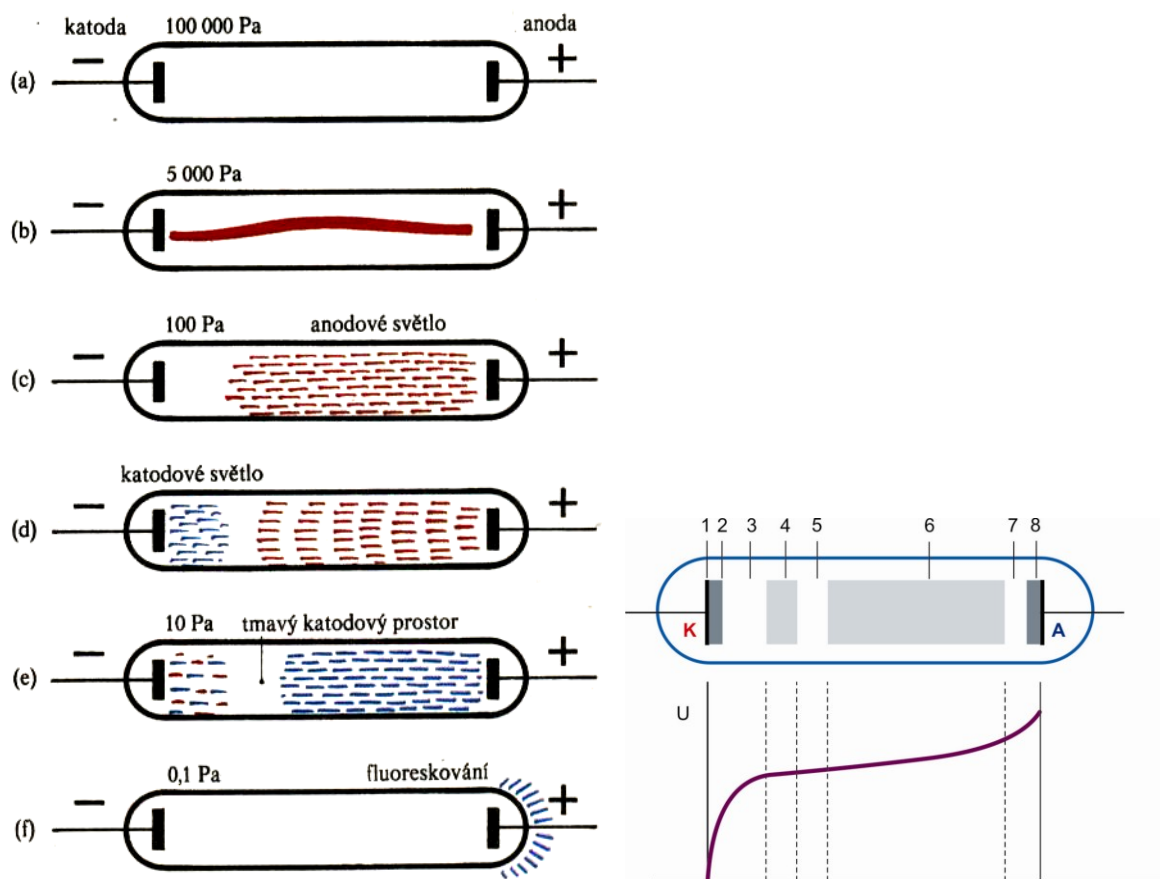
potom pro  $T_e$  dostaneme hodnotu řádu několika desítek tisíc stupňů. Rozdíl  $T_p$  a  $T_e$  svědčí o tom, že mezi elektrony a molekulami ve výbojovém plazmatu není termodynamická rovnováha (ve vysokoteplotním plazmatu je střední energie molekul, elektronů a iontů stejná. Tím se vysvětluje druhý název tohoto plazmatu – izotermické).

Koncentrace nosičů nábojů v plazmatu je velmi vysoká. Proto má plazma dobrou elektrickou vodivost. Pohyblivost elektronů, jak jsme již uvedli, je asi o tři řády vyšší, než pohyblivost iontů. V důsledku toho je elektrický proud v plazmatu tvořen zejména elektrony.

### 2.1.5. Doutnavý výboj.

Samostatný výboj má různé formy v závislosti na tlaku plynu, konfiguraci elektrod a parametrech vnějšího obvodu. Fyzikální jevy, kterými je výboj doprovázen, jsou velmi složité. Krátce uvedeme ty nejzákladnější z nich.

Doutnavý výboj vzniká při nízkém tlaku. Můžeme ho např. pozorovat ve skleněné trubici délky 0,5 m, do jejíž konců jsou zataveny kovové elektrody (Obr.2.6). Na elektrody přivedeme napětí řádu  $10^3$  V. Pozorujeme, že při atmosférickém tlaku trubicí proud nepoteče. Pokud snížíme tlak vzduchu uvnitř trubice asi na  $5 \cdot 10^3$  Pa, vznikne výboj ve tvaru křivolakého tenkého vlákna mezi anodou a katodou. Budeme – li dále snižovat tlak, bude tloušťka vlákna narůstat a asi při tlaku  $6,6 \cdot 10^2$  Pa vyplní celý průměr trubice – vznikne *doutnavý výboj*. Jeho základní části jsou ukázány na Obr.2.6. Poblíž katody se nachází tenká svítící vrstva, tzv. *katodová svítící vrstva* (2). Mezi katodou a svítící vrstvou se nachází *Astonův temný prostor* (1). Na druhé straně svítící vrstvy se nachází slabě svítící *Crookesův temný prostor* (3) a ten přechází ve svítící oblast – *doutnavé světlo* (4). Všechny tyto vrstvy tvoří *katodovou část doutnavého výboje*.



Obr.2.6. Výboj v plynu za nízkého tlaku

S doutnavým výbojem hraničí temný interval – *Faradayův temný prostor* (5). Hranice mezi nimi je neostrá. Všechny ostatní části trubice jsou vyplněny svítícím plynem a nazývá se *kladným sloupcem* (6). Při snížení tlaku se katodová část výboje a Faradayův temný prostor rozšiřují a kladný sloupec se zkracuje. Při tlaku řádu  $10^2$  Pa se kladný sloupec rozpadá na řadu střídajících se temných a svítících prohnutých vrstev – *stratů*.

Měření pomocí sond (tenkých drátů, umístěných v jednotlivých místech trubice) a také pomocí jiných metod (např. spektroskopických) ukázala, že potenciál se podél trubice mění nerovnoměrně (Obr.2.6). Téměř celý spád napětí připadá na první tři části výboje až po Crookesův temný prostor včetně (*katodový spád napětí*). V oblasti doutnavého výboje se potenciál nemění – zde je intenzita pole rovna nule. Nakonec, ve Faradayově temném prostoru a kladném sloupci potenciál pomalu roste. Takové rozdělení potenciálu je způsobeno vznikem kladného prostorového náboje v oblasti Crookesova temného prostoru.

Základní procesy, potřebné k udržování doutnavého výboje probíhají v jeho katodové oblasti. Ostatní části výboje nejsou podstatné, mohou dokonce chybět (při malé vzdálenosti mezi elektrodami, nebo při nízkém tlaku). Základní procesy jsou pouze dva – sekundární elektronová emise z katody, způsobená jejím bombardováním kladnými ionty a nárazová ionizace molekul plynu elektrony.

Kladné ionty, urychlené katodovým spádem napětí, bombardují katodu a vyrážejí z ní elektrony. Sekundární elektrony vylétají z katody s nevelkou rychlostí. V Ashtonově temném prostoru jsou urychlovány elektrickým polem. Když získají dostatečnou energii, začnou elektrony budit molekuly plynu a v důsledku toho vznikne katodová svítící vrstva. Elektrony, které proletěly beze srážek do oblasti Crookesova temného prostoru mají velkou



energii a proto spíše ionizují molekuly, než by je budily. Tedy, intenzita záření plynu klesá, ale zato se v Crookesově prostoru vytváří mnoho elektronů a kladných iontů. Vzniklé ionty mají na začátku velmi malou rychlost. Proto se v Crookesově temném prostoru vytváří kladný prostorový náboj, což vede k přerozdělení potenciálu podél trubice a ke vzniku katodového spádu potenciálu.

Elektrony, které vznikly při ionizaci v Crookesově temném prostoru, pronikají spolu s primárními elektrony do oblasti doutnavého výboje, která je charakterizována vysokou koncentrací elektronů a kladných iontů a celkovým prostorovým nábojem, blízkým nule (plazma). Proto je zde intenzita pole velmi malá – pole neurychluje elektrony, ani ionty. Díky vysoké koncentraci elektronů a iontů v oblasti doutnavého světla, dochází zde ke značné rekombinaci a tím ke vzniku záření (vyzářená energie). Tedy doutnavé světlo je zejména světlem rekombinačním.

Z oblasti doutnavého světla pronikají do Faradayova temného prostoru elektrony a kladné ionty na úkor difúze (na hranici mezi těmito oblastmi je pole nulové, ale zato je zde vysoký gradient koncentrace elektronů a iontů). V důsledku nižší koncentrace nabitých částic pravděpodobnost rekombinace ve Faradayově prostoru silně klesá. Proto je tento prostor temný.

Ve Faradayově temném prostoru již existuje elektrické pole. Tímto polem urychlené elektrony postupně získávají energii, takže nakonec vzniknou podmínky, potřebné pro existenci plazmatu. Kladný sloupec představuje výbojové plazma a hraje roli vodiče, spojujícího anodu s katodovými částmi výboje. Světlo kladného sloupce je tvořeno přechodem nabuzených molekul do základního stavu. Molekuly různých plynů přitom vydávají záření o různé vlnové délce. Proto má světlo kladného sloupce pro každý plyn charakteristickou barvu. Tato skutečnost je využita při konstrukci různých výbojových trubec pro vytváření reklam. Tyto svítící trubice nejsou nic jiného, než kladný sloupec doutnavého výboje. Neonové výbojky dávají červené světlo, argonové zase modrozelené, atd.

Jestliže nyní postupně zkracujeme vzdálenost mezi elektrodami, zůstane katodová oblast výboje beze změny a délka kladného bude klesat, dokud zcela nezmizí. Dále zmizí Faradayův temný prostor a začne se zkracovat délka doutnavého světla, přičemž poloha hranice mezi tímto světlem a Crookesovým temným prostorem zůstane nezměněná. Když vzdálenost mezi anodou a touto hranicí bude velmi malá, výboj skončí.

V doutnavkách je vzdálenost elektrod taková, že kladný sloupec chybí a záření je dáno doutnavým světlem. Speciálním tvarem a opracováním povrchu elektrod dosáhneme toho, že k zažehnutí výboje postačí napětí  $\sim 50$  V. Doutnavky slouží k signalizaci napětí v obvodu.

Při snížení tlaku katodová část výboje zaujímá stále větší část mezielektrodového prostoru. Při dostatečně nízkém tlaku se Crookesův temný prostor rozšíří téměř na celou trubici. Záření plynu v tomto případě přestane být pozorovatelným. Většina elektronů, vyražených z katody a urychlených katodovým spádem potenciálu doletí beze srážek s molekulami plynu na stěny trubice, a když na ně dopadnou, vyvolají záření. Z historických příčin dostal proud elektronů z katody ve výbojové trubici za velmi nízkého tlaku název *katodové paprsky*. Záření, vyvolané bombardováním rychlými elektrony se nazývá katodoluminiscencí.

Jestliže uděláme ve výbojové trubici úzký kanál, část kladných iontů projde do prostoru za katodou a vytvoří ostře ohraničený paprsek iontů, který dostal název *kanálové* (nebo *kladné*) paprsky. Tento způsob získání paprsku kladných iontů neztratil do dnešních dnů svůj praktický význam.

### 2.1.6. Obloukový výboj.

V roce 1802 V.V.Petrov zpozoroval, že při malém oddálení původně se dotýkajících uhlíkových elektrod, připojených k velké galvanické baterii, vzplane mezi nimi oslepující výboj. Při horizontální poloze elektrod se ohřátý zářící plyn ohýbá ve tvaru oblouku a podle toho byl tento jev nazván *elektrickým obloukem*.

Intenzita proudu v oblouku může dosáhnout velkých hodnot (tisíce až desítky tisíc A) při napětí několika desítek voltů.

Obloukový výboj může probíhat jak při nízkém (řádu několika  $10^2$  Pa), tak i při vysokém (až  $10^8$  Pa) tlaku. Základními procesy jsou termoelektrická emise z rozžhaveného povrchu katody a termická ionizace molekul plynu, způsobená jejich vysokou teplotou. Téměř celý prostor mezi elektrodami je vyplněn vysokoteplotním plazmatem. To se stává vodičem, který vede elektrony, emitované z katody, až na anodu.

Teplota plazmatu obloukového výboje za normálního tlaku je asi 6000 K. V elektrickém oblouku za velmi vysokého tlaku může teplota plazmatu dosáhnout až 10 000 K (připomeňme, že teplota povrchu Slunce je asi 5800 K). V důsledku bombardování katody kladnými ionty se katoda rozžhává na teplotu 3500 K. Anoda, bombardovaná mohutným proudem elektronů, se ohřeje ještě více. To vede k tomu, že anoda se intenzivně vypařuje a na jejím povrchu se vytvoří malý kráter (ten je nejjasnějším místem oblouku).

Obloukový výboj má klesající voltampérovou charakteristiku. To lze objasnit tím, že při růstu intenzity proudu roste termoelektrická emise z katody a stupeň ionizace výbojového plazmatu.

Kromě výše popsaného *termoelektrického oblouku* (tj. výboje, způsobeného termoemisí z rozžhavené katody), existuje ještě *oblouk se studenou katodou*. Za katodu v tomto případě slouží např. obyčejná kapalná rtuť, nacházející se v baňce, ze které byl vyčerpán vzduch. Výboj probíhá ve rtuťových parách. Elektrony vylétají z katody v důsledku autoelektronové emise. K tomu je potřeba vytvořit vysoké napětí u povrchu katody. To se vytvoří pomocí kladného prostorového náboje, způsobeného kladnými ionty. Elektrony nejsou emitovány celým povrchem katody, ale nevelkou jasně svítící a neustále se přemísťující *katodovou skvrnou*. Teplota plynu není v tomto případě příliš vysoká. Ionizace molekul v plazmatu probíhá stejně jako v doutnavém výboji, na úkor nárazu elektronů.

Obloukový výboj má různé využití. V roce 1888 byla zdokonalena metoda elektrického svařování, využívající elektrického oblouku tak, že uhlíkové elektrody byly nahrazeny kovovými.

Elektrický oblouk se používá též jako výkonný zdroj světla. V obloukových *vysokotlakých výbojkách* dochází k výboji mezi wolframovými elektrodami v atmosféře par rtuti při tlaku do  $10^7$  Pa, nebo v inertním plynu (neon, argon, krypton, xenon) při tlaku do  $2 \cdot 10^6$  Pa. Tato výbojka má kromě základních dvou elektrod ještě elektrodu boční, která slouží k zapálení pomocí zdroje vysokého napětí. Protože se tím výbojka silně ohřeje, je zhotovena z křemenného skla, které má vyšší bod tání, než běžné sklo. Rtuťová výbojka v případě, že je studená, obsahuje argon při nevelkém tlaku (řádu  $10^2$  Pa) a kapičku rtuti. Nejdříve vznikne obloukový výboj v argonu. Když se výbojka ohřeje, rtuť se vypaří a další výboj probíhá ve rtuťových parách.

Oblouk, hořící ve rtuťových parách, vydává mohutný proud ultrafialového záření. Rtuťové výbojky s křemennou baňkou (křemenné sklo propouští ultrafialové paprsky, běžné sklo je pohlcuje) se používají jako zdroje ultrafialových paprsků v medicíně, kosmetice a pro vědecké účely. Ve *výbojkách denního světla* se pokrývají stěny výbojky speciální látkou (luminoforem), která po ozáření ultrafialovým zářením par rtuti začínají svítit světlem, které je co do spektrálního složení velmi blízké světlu dennímu. Takové zdroje světla jsou několikrát ekonomičtější, než klasické žárovky.

Obloukový výboj ve rtuťových parách při nízkém tlaku se rtuťovou katodou, se využíval donedávna ve *rtuťových usměrňovačích*. Na principu obloukového výboje je

založena činnost přístrojů, které nazýváme gazotrony a tyratrony. *Gazotron* je dioda se žhavenou katodou, vyplněná rtuťovými parami, nebo argonem za nepříliš vysokého tlaku. Elektrony, emitované z katody termoelektrickou emisí ionizují molekuly plynu, což vede k vytvoření výbojového plazmatu (tyto procesy jsou typické pro obloukový výboj). Dobrá vodivost plazmatu znemožňuje vytváření elektronového mraku poblíž katody (jak je tomu ve vakuové diodě). Proto při nevysokém napětí mezi elektrodami (15 – 20 V) prochází gazotronem silný proud (řádu 10 A). Protože proud teče gazotronem pouze při kladném napětí na anodě (vzhledem ke katodě), používal se pro usměrňování proudu.

*Tyratron* se liší od gazotronu tím, že obsahuje třetí elektrodu – mřížku. Tento přístroj se používá jako rychlý spínač proudu. V normálním stavu má mřížka vzhledem ke katodě záporný potenciál. Proto elektrony, které vyletěly z katody, se vrací zpět a proud tyratronem neprotéká. Zapojíme – li na mřížku třeba jenom krátkodobý kladný impuls, vznikne v tyratronu obloukový výboj a začne jím protékat silný elektrický proud. Vzniklé plazma, které má vysokou vodivost, odstíní mřížku, neboť poblíž ní se nashromáždí ionty. V důsledku toho nemohou změny potenciálu mřížky dále ovlivňovat výboj. K zapojení proudu pomocí tyratronu dojde velmi rychle (za čas řádu  $10^{-7}$  s). Tedy tyratron funguje jako spínač, bez jakékoliv setrvačnosti a proto je používán v telemechanice a automatizaci. Abychom vypnuli proud, musíme za krátký čas ( $\sim 10^{-5}$  s) vypnout anodové napětí. Za tuto dobu vzniklé plazma zmizí v důsledku rekombinace a znovu se ustálí stav, který existoval na začátku před zapnutím.

### 2.1.7. Jiskrový a korónový výboj.

Jiskrový výboj vzniká tehdy, když intenzita elektrického pole dosáhne pro každý plyn jisté kritické hodnoty  $E_{kr}$ . Tato veličina závisí na tlaku plynu a pro vzduch při atmosférickém tlaku činí zhruba  $3 \cdot 10^4$  V.cm<sup>-1</sup>. S růstem tlaku  $E_{kr}$  vrůstá. Podle *Paschenova zákona* je vztah mezi  $E_{kr}$  a tlakem dán vztahem

$$\frac{E_{kr}}{p} \approx kon \quad (2.21)$$

Jiskrový výboj je doprovázen vznikem jasně svítícího, křivolakého a rozvětveného kanálu, kterým protéká krátkodobý proudový pulz o vysoké intenzitě. Jako příklad může sloužit blesk. Jeho délka bývá zhruba 10 km, průměr kanálu asi 40 cm. Intenzita proudu dosahuje  $10^5$  A a doba trvání blesku bývá asi  $10^{-4}$  s. Každý blesk se skládá z několika (až 50) pulzů, probíhajících tímtež kanálem rychle po sobě. Jejich celková doba trvání může být i několik sekund. Teplota plynu v jiskrovém kanále bývá velmi vysoká, až  $10^4$  K. Rychlý ohřev plynu na vysokou teplotu vede k prudkému zvýšení tlaku a ke vzniku rázových a zvukových vln. Proto je jiskrový výboj doprovázen zvukovými jevy – od slabého praskání v případě jiskry o malém výkonu, až po hrom v případě blesku.

Vzniku jiskry předchází v plynu vznik silně ionizovaného kanálu, který se nazývá *streamer*. Tento kanál je výsledkem překrytí jednotlivých elektronových lavin, které vznikly na cestě, kterou prošla jiskra. Schéma vývoje streameru je ukázáno na Obr.2.2. Rozdíl potenciálů pole je takový, že elektron, který vylétl z nějakých příčin z katody, získá na délce své volné dráhy energii, dostatečnou pro ionizaci. Proto dochází k rozmnožování elektronů – vzniká lavina (přitom vznikající kladné ionty nehrají podstatnou roli, neboť mají mnohem menší pohyblivost – vytvářejí pouze prostorový náboj, způsobující přerozdělení potenciálu). Záření, které vydává atom, u kterého byl při ionizaci vytržen jeden z vnitřních elektronů (na obrázku znázorněno vlnovkami), způsobí fotoionizaci molekul, přičemž vznikající elektrony vytvářejí stále nové laviny. Po vzájemném překrytí se lavin vzniká dobře vodivý kanál – streamer, kterým proudí od katody k anodě velmi silný proud elektronů – vzniká výboj.

Vybereme – li elektrody takového tvaru, že pole v prostoru mezi nimi bude přibližně homogenní (například ve tvaru koulí o dostatečně velkém poloměru), potom bude jiskra vznikat při zcela dobře definovaném napětí  $U_{kr}$ , jehož velikost závisí na vzdálenosti mezi koulemi  $l$  ( $E_{kr} = U_{kr} / l$ ). Na tom je založen *jiskrový voltmetr*, s jehož pomocí se obvykle měří vysoké napětí (řádu  $10^3$  V –  $10^5$  V). Při měřeních se určuje největší vzdálenost  $l_{max}$ , při které vzniká jiskra. Vynásobením  $E_{kr} \cdot l_{max}$  získáme hodnotu měřeného napětí.

Jestli jedna z elektrod (nebo obě) má velmi malý poloměr křivosti (například to může být tenký drát, nebo hrot), vzniká zpočátku tzv. *korónový výboj*. Při dalším zvyšování napětí přejde tento výboj v jiskrový, nebo obloukový.

Při korónovém výboji nedochází k ionizaci a nabuzení molekul v celém prostoru mezi elektrodami, ale pouze poblíž elektrody s malým poloměrem křivosti, kde intenzita pole dosahuje hodnot, rovných nebo větších, než  $E_{kr}$ . V této části výboj v plynu svítí. Světlo má tvar koruny (aury), nacházející se kolem elektrody a tím je dán název tohoto druhu výboje. Korónový výboj z ostří má tvar štětce. V závislosti na znaménku „korónující“ elektrody, hovoříme o kladné, nebo záporné koróně. Mezi korónující vrstvou a nekorónující elektrodou se nachází *vnější oblast koróny*. Režim probití ( $E > E_{kr}$ ) existuje pouze v mezích korónující vrstvy. Proto lze říci, že korónový výboj je neúplným probitím prostoru s plynem.

V případě záporné koróny jsou jevy na katodě shodné s jevy na katodě doutnavého výboje. Kladné ionty, urychlené silným polem, vyrážejí z katody elektrony, které způsobí ionizaci a nabuzení molekul v korónující vrstvě. Ve vnější oblasti koróny je pole nedostatečné k tomu, aby udělilo elektronům energii, potřebnou pro ionizaci. Proto elektrony, které pronikly do této oblasti, driftují pod vlivem pole k anodě. Část elektronů je zachycena molekulami a v důsledku toho se vytvářejí záporné ionty. Tedy proud ve vnější oblasti je dán pouze zápornými nosiči – elektrony a zápornými ionty. V této oblasti má výboj nesamostatný charakter.

V kladné koróně se vytvářejí elektronové laviny u vnější hranice koróny a jsou usměrnovány ke korónující elektrodě – anodě. Vytváření elektronů, vytvářejících laviny, je podmíněno fotoionizací, způsobenou zářením korónující vrstvy. Nosiči proudu ve vnější oblasti koróny jsou kladné ionty, které driftují vlivem působení pole ke katodě.

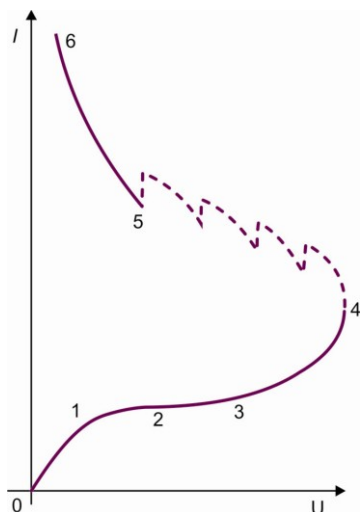
Mají – li obě elektrody velký poloměr křivosti, probíhají v blízkosti každé z nich procesy, stejné jako u korónující elektrody daného znaménka. Obě korónující vrstvy jsou odděleny vnější oblastí, ve které se pohybují vstřícné proudy kladných a záporných nosičů proudu. Takovou korónu nazýváme *bipolární*. V kapitole 2.1.2 jsme hovořili o počítačích. Samostatný výboj, který v nich probíhá, je výbojem korónovým. Schématický diagram všech částí výboje v plynech za atmosférického tlaku je uveden na Obr.2.7.

Tloušťka korónující vrstvy a intenzita výbojového proudu rostou s růstem napětí. Při nevelkém napětí jsou rozměry koróny malé a její záření je nepozorovatelné. Taková mikroskopická koróna vzniká poblíž hrotu, ze kterého „stéká“ elektrický vítr .

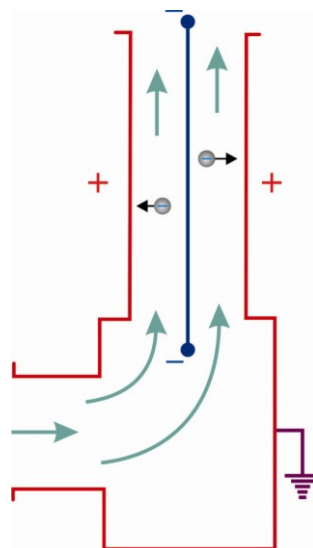
Koróna, která vzniká vlivem atmosférické elektřiny na stromech, stožárech, apod., se nazývá *ohněm svatého Eliáše*.

Ve vysokonapěťových zařízeních, zejména na stožárech vysokého napětí, vede korónový výboj ke značným ztrátám proudu. Abychom ho potlačili, snažíme se, aby vodiče měly dostatečně velký poloměr (čím větší, tím vyšší intenzita, potřebná pro vznik koróny).

V technice se používá korónový výboj v *elektrofiltrech*. Čištěný plyn se pohybuje v komíně, v jehož ose se nachází korónující elektroda (Obr.8). Záporné ionty, kterých je velké množství ve vnější oblasti koróny, si nasedají na drobné prachové částice (popílek) a na kapénky aerosolu a pohybují se spolu s nimi k vnější nekorónující elektrodě. Když dosáhnou této elektrody, stanou se neutrálními a zůstanou na ní. Při mechanickém nárazu např. kladívka na elektrodu částice dopadnou do zásobníku.



Obr.2.7. Voltampérová charakteristika výboje v plynu za atmosférického tlaku.



Obr.2.8. Schéma elektrofiltru.

## 2.2. Elektrický proud ve vakuu.

Nosiči proudu ve vakuu jsou zpravidla elektrony, emitované z katody (nejčastěji kovové). Aby z ní mohly být emitovány, je třeba dodat jim energii. Podle druhu energie, kterou jim dodáme, hovoříme o termoemisi, fotoemisi, sekundární emisi a autoemisi.

**Termoemise.** Zahřejeme – li katodu, získají některé elektrony tak vysokou energii, že překonají tzv. výstupní práci elektronu z kovu (tj. minimální energii, potřebnou k výstupu z daného materiálu) a opustí katodu. Pokud nebudou poté přitahovány jinou elektrodou (anodou), vznikne poblíž katody *prostorový náboj* ve formě oblaku elektronů.

S růstem teploty se množství elektronů v oblaku rychle zvyšuje, a protože podle zákona zachování náboje jsou elektrony přitahovány zpět do kladněji nabitě katody, některé se do ní zpět vrací. Samozřejmě jsou emitovány elektrony nové, takže dochází k tzv. dynamické rovnováze.

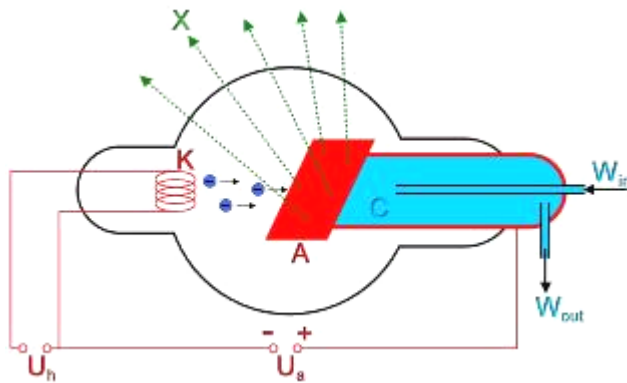
Hustota termoemisního proudu je dána Richardsonovým – Dushmanovým vztahem

$$j = BT^2 e^{-\frac{A}{kT}} \quad (2.22)$$

kde  $B$  a  $A$  jsou experimentální konstanty,  $h$  je Planckova konstanta a  $T$  teplota.

Termoemisní katody jsou jednou z podstatných částí mnoha elektronických prvků a zejména v minulosti hrály významnou roli při rozvoji radiotechniky a elektroniky. Aby se zvýšil termoemisní proud, jsou konstruovány tak, že žhavený wolframový drátek, umístěný v keramické trubičce, pokryté sloučeninami alkalických kovů (Cs, Ba, K, ...), je ohřát natolik, že poskytne značnou hustotu proudu (alkalické kovy mají nízkou výstupní práci elektronů).

Elektronky (diody, triody, pentody, atd.) byly v elektronických přístrojích nahrazeny polovodiči a v současnosti jsou pouze součástí některých speciálních přístrojů. Existují však přístroje, kde vakuové elektronky nebyly zatím nahrazeny jinými prvky. Jsou to např. *rentgenky* – zdroje rentgenových paprsků. Schematické znázornění rentgenky je uvedeno na Obr.9.

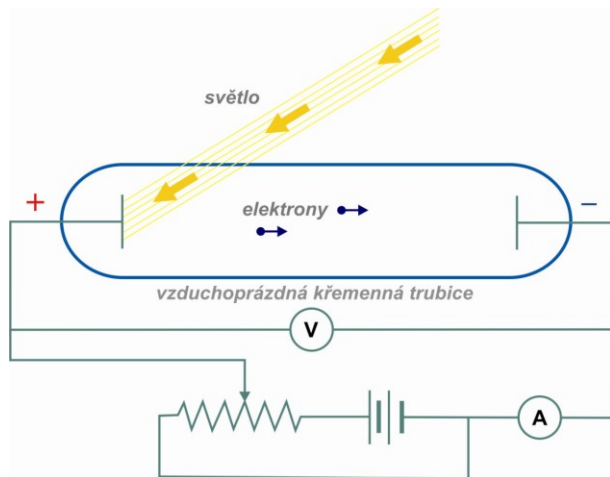


Obr2.9. Schéma rentgenky

Zdrojem elektronů je žhavená katoda, proti níž je umístěna anoda (v tomto případě nazývaná antikatoda), zhotovená buď z wolframu, nebo platiny (v některých speciálních případech z molybdenu, stříbra, mědi, či oceli), nacházející se na konci duté měděné trubice, chlazené vodou. Při vysokém stejnosměrném napětí mezi katodou a anodou získají elektrony vysokou rychlost, která jim umožní nabudít elektrony ve vnitřních slukách atomů antikatody. Takto nabuzené atomy antikatody vydávají rentgenové paprsky. Jejich využití v době od jejich objevu na přelomu 19. a 20. století způsobilo kvalitativní pokrok ve zdravotnictví, vědě, i v mnoha technických oborech.

**Fotoelektrický jev.** Dopadají – li na povrch kovu paprsky světla, jsou z kovu emitovány elektrony a samotný kov se nabíjí kladně. V tomto případě se jedná o jev, zvaný *fotoelektrický jev*, nebo zkráceně *fotoefekt*. Fotoefekt objevil v roce 1887 německý fyzik H. Hertz a o poznání jeho vlastností se zasloužil mimo jiných i ruský fyzik A.G. Stoletov. Ten zjistil, že kov (jako první použil Zn), zprvu záporně nabitý, rychle ztrácí svůj náboj, je – li osvětlen. Ukazuje se, že s výjimkou alkalických kovů je k vyvolání fotoemise vždy zapotřebí ultrafialových paprsků. Na Obr.10. je uvedeno schéma aparatury, která slouží ke stanovení zákonů fotoemise. Vzduchoprázdná trubice obsahuje dvě elektrody, zapojené do vnějšího obvodu. Anodu v něm tvoří kovová destička, jejíž povrch je ozařován. Některé z fotoelektronů, vyletujících z ozařovaného povrchu anody mají dostatečnou energii na to, aby dosáhly katody, přestože mají záporný náboj. Tyto elektrony tvoří tzv. fotoproud. Se zvyšováním brzdícího potenciálu  $V$  dopadá na katodu stále méně elektronů a proud klesá. Když dosáhne jisté hodnoty  $V_0$  (řádově několik voltů), nedopadnou již na katodu žádné elektrony.

Při snaze vysvětlit fotoefekt z hlediska vlnové teorie světla, narazili fyzikové na značné potíže. Klasická fyzika nebyla schopna objasnit, proč energie fotoelektronů nezávisí na intenzitě světla, ale závisí na frekvenci dopadajícího elektromagnetického záření. Tuto skutečnost objasnil na základě v té době ještě velmi „mladé“ kvantové teorie světla sám A. Einstein a za svou práci získal Nobelovu cenu.

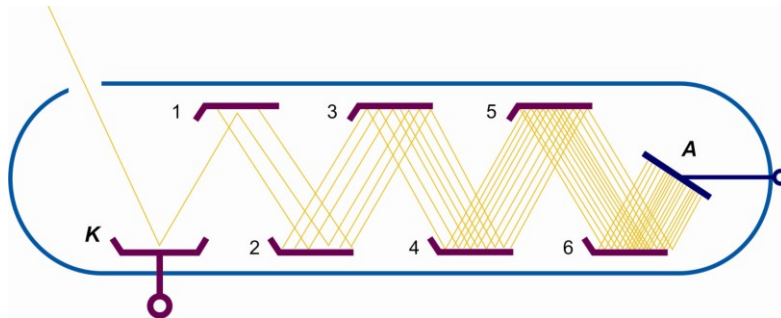


Obr.2.10. Schéma zařízení na demonstraci fotoemise.

**Sekundární elektronová emise.** Dopadá – li na povrch kovu, umístěného ve vakuu proud elektronů, část z nich se odrazí a část „vyrazí“ tzv. sekundární elektrony z kovu. Tyto elektrony, spolu s elektrony odraženými lze registrovat (Lange 1925). Takto zaznamenaný proud sekundárních elektronů je několikanásobně větší, než proud elektronů primárních (závisí to na energii dopadajících elektronů). Analogický jev lze pozorovat i při bombardování povrchu dielektrik a polovodičů.

Maximální sekundární emisi elektronů pozorujeme tehdy, mají – li dopadající elektrony rychlost asi  $0,04 c$  ( $c$  je rychlost světla). Této rychlosti dosáhnou elektrony při průchodu rozdílem potenciálů několika set voltů. Při dalším zvyšování rychlosti dopadajících elektronů počet sekundárních elektronů klesá.

Jev sekundární emise elektronů má značný význam vědecký a slouží zejména k analýze povrchu látek. Praktický význam má tento jev při konstrukci *elektronového násobiče (fotonásobiče)*. Pomocí fotonásobiče můžeme mnohonásobně zesílit slabé světelné signály (např. při astronomických pozorováních). Schéma fotonásobiče je uvedeno na Obr.2.11.



Obr.2.11. Schéma fotonásobiče.

Paprsky světla, fokusované čočkou, dopadají na elektrodu 0 a způsobí na ní fotoemisi. Elektron, který vylétl z katody 0 je urychlen potenciálovým rozdílem mezi elektrodami 0 a 1 a z elektrody 1 vyrazí např. dva elektrony. Ty jsou opět urychleny potenciálovým rozdílem mezi elektrodami 1 a 2 a z elektrody 2 vyrazí 4 elektrony. Tak postupuje zesilování svazku elektronů dále, až v posledním stupni této kaskády dopadnou elektrony na kolektor, kde jsou registrovány. Fotonásobiče byly postupem času zdokonalovány, takže u těch moderních lze dosáhnout zesílení řádu  $10^5 - 10^6$ .

## Řešené příklady

1. Určete intenzitu nasyceného proudu v diodě s wolframovou katodou při teplotě vlákna 2700 K. Délka vlákna je 3 cm a jeho průměr 0,1 mm. Konstanta  $B = 6 \cdot 10^5 \text{ A}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^2)$ .  
Řešení: výpočet provedeme pomocí Richardsonovy – Dushmanovy rovnice. Výstupní práce elektronu z wolframu je 4,5 eV.

Řešení: Richardsonova – Dushmanova rovnice má tvar

$$i = BT^2 e^{-\frac{A}{kT}}, \text{ kde } i \text{ je hustota proudu, } B \text{ je konstanta a } A \text{ je výstupní práce elektronu z wolframu. Logaritmuje se – li tuto rovnici,}$$

dostaneme:

$$\ln I = \ln S + \ln B + 2 \ln T - \frac{A}{kT} = \ln \pi + \ln d + \ln l + \ln B + 2 \ln T - \frac{A}{kT}$$

Numericky:  $I = 0,034 \text{ A}$

2. Jak se změní intenzita nasyceného proudu v diodě, jejíž wolframová katoda je pokryta cesiem, kolísá – li teplota z hodnoty 1000 K na 1200 K? Předpokládáme, že se při změně teploty konstanty v Richardsonově – Dushmanově rovnici nemění.

Řešení:

Pro poměr intenzit nasyceného proudu dostáváme výraz

$$x = \frac{i_2}{i_1} = \frac{I_2}{I_1} = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^2 \exp \left[ \frac{A(T_2 - T_1)}{kT_1 T_2} \right]$$

Numericky:  $x = 8644$

3. V některých diodách bývá anoda umístěna velmi blízko u katody, takže jejich plošný obsah je přibližně stejný. Za předpokladu, že elektrony opouštějí katodu s nulovou rychlostí, určete sílu, s jakou působí na anodu. Intenzita proudu v diodě necht' je 500 mA a rozdíl potenciálů mezi elektrodami  $U = 600 \text{ V}$ .

Řešení: vyjdeme z impulsové rovnice:  $m \cdot v = F \cdot t$  a vztahu  $I = \frac{q}{t}$

Odtud  $F = \frac{I m v}{q} = \frac{I m v}{e}$ . Intenzita proudu  $I = e \cdot n \cdot S \cdot v$ . Podle zákona

Zachování energie platí:  $\frac{1}{2} m v^2 = e U$ , takže nakonec dostaneme

$$F = \frac{I}{e} \sqrt{2eUm}$$

Numericky:  $F = 4,13 \cdot 10^{-5} \text{ N}$



4. Kyslík je ionizován  $\gamma$ -zářením a koncentrace iontů činí  $10^{15} \text{ m}^{-3}$ . Určete vodivost plynu za těchto podmínek. Pohyblivost iontů je  $b_+ = 1,32 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ ,  $b_- = 1,81 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ .
5. Jak se změní intenzita proudu daleko od nasycení, jestliže k sobě přiblížíme elektrody ionizační komůrky? Jak se změní proud nasycení? Nakreslete voltampérové charakteristiky při jisté vzdálenosti  $d_1$  mezi elektrodami a při  $d_2 < d_1$ . Předpokládejte, že ostatní parametry se nemění.  
[ Daleko od nasycení intenzita proudu vzroste, neboť při přiblížení destiček (elektrod) roste intenzita elektrického pole. V režimu nasycení intenzita proudu klesá, neboť se zmenší objem ionizační komůrky. Voltampérové charakteristiky mají tvar:
6. V ionizační komůrce o objemu 0,5 l je nasycený proud roven  $0,02 \text{ } \mu\text{A}$ . Určete koncentraci iontů, které vzniknou v tomto objemu za 1 s.  
[ Nasycený proud je  $i_s = \beta \cdot n_0 \cdot e \cdot V = v \cdot e \cdot V$ , kde  $v$  je počet iontů, které vzniknou za každou sekundu v objemové jednotce komůrky.]
7. Při jaké teplotě dojde k ionizaci atomárního vodíku?

Řešení: Hrubý odhad teploty lze provést pomocí vztahu  $\frac{3}{2}kT_0 = e\phi_0$ . Tento výpočet však dává dosti nadsazenou hodnotu teploty  $T_0$ :

$$T_0 = \frac{2e\phi_0}{3k} = \frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 13,6}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}} \sim 10^5 \text{ K.}$$

Ve skutečnosti ionizace začíná při mnohem nižších teplotách a to z těchto důvodů:

a) Je třeba vzít v úvahu srážky dvou atomů, kdy jejich celková kinetická se přemění na energii vnitřní, tj.

$$\frac{3}{2}kT + \frac{3}{2}kT = e\phi_0$$

b) Dále je třeba vzít v úvahu maxwellovské rozdělení molekul podle rychlosti a to zejména tu skutečnost, že existuje značné procento molekul, jejichž rychlost převyšuje nejpravděpodobnější rychlost. Například platí, že  $9/368 \sim 2,5\%$  molekul má rychlost třikrát převyšující rychlost střední. Tedy jejich kinetická energie bude 9x převyšovat střední kinetickou energii molekul.

Uvážíme – li oba tyto faktory, dostaneme:  $9 \cdot 3kT = e \cdot \phi_0$ , tj.

$$T = \frac{e\phi_0}{6k} = \frac{10^5}{9} \approx 11111 \text{ K}$$

Neřešené příklady:

- 9, Vysokoteplotní vodíkové plazma s teplotou  $10^5\text{K}$  je umístěno do magnetického pole o indukci  $0,1\text{ T}$ . Určete cyklotronové poloměry iontů a elektronů (tj. poloměry drah, po nichž se pohybují kladné ionty a elektrony).  
[Při tepelném pohybu v magnetickém poli se ionty a elektrony pohybují po kružnicích, jejichž poloměry lze vypočítat podle vztahu  $R = \frac{\sqrt{3mkT}}{eB}$  ]
10. Ionizační energie atomu vodíku je  $E_i = 2,18 \cdot 10^{-18}\text{ J}$ . Určete ionizační potenciál  $U_i$  atomu vodíku.  
[  $U_i = 13,6\text{ V}$  ]
11. Jakou minimální rychlost  $v$  musí mít elektron, aby ionizoval atom dusíku?. Ionizační potenciál dusíku je  $U_i = 14,5\text{ V}$ .  
[  $v = 2,3 \cdot 10^6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ]
12. Jakou teplotu musí mít atomární vodík, aby střední kinetická energie postupného pohybu atomů stačila na ionizaci pomocí srážek ? Ionizační potenciál atomárního vodíku je  $U_i = 13,6\text{ V}$ .  
[  $T = 210 \cdot 10^3\text{ K}$  ]
13. Středem mezi elektrodami ionizační komůrky proletěla  $\alpha$  - částice, která se pohybovala rovnoběžně s elektrodami. Na své cestě vytvořila řadu iontů. Za jaký čas po průletu částice dojdou ionty k elektrodám, je-li vzdálenost mezi nimi  $4\text{ cm}$ ? Rozdíl potenciálů mezi elektrodami je  $U = 5\text{ kV}$  a průměrná pohyblivost iontů obou znamének je  $b = 2\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$   
[  $t = 0,8\text{ ms}$  ]
14. Dusík je ionizován rentgenovým zářením. Určete jeho vodivost  $G$ , víte – li, že se v rovnovážném stavu nachází v každém kubickém centimetru dusíku  $n_0 = 10^7$  dvojic iontů. Pohyblivost kladných resp. záporných iontů je  $b_+ = 1,27\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , resp.  $b_- = 1,81\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$   
[  $G = 0,5\text{ nS}$  ]
15. Vzduch, nacházející se mezi rovnoběžnými elektrodami ionizační komůrky, je ionizován rentgenovým zářením. Proud, protékající komůrkou je  $1,2\text{ }\mu\text{A}$ , plošný obsah každé z elektrod je  $300\text{ cm}^2$  a jejich vzdálenost je  $d = 2\text{ cm}$ . Rozdíl potenciálů mezi oběma elektrodami je  $U = 100\text{ V}$ . Určete koncentraci  $n$  dvojic iontů mezi deskami, je – li proud daleko od režimu nasycení. Pohyblivost kladných, resp. záporných iontů je  $b_+ = 1,4\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , resp.  $b_- = 1,9\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ . Náboj každého z iontů je roven elementárnímu náboji.  
[  $n = 1,52 \cdot 10^{14}\text{ m}^{-3}$  ]

16. Objem  $V$  plynu, uzavřeného mezi elektrodami ionizační komůrky je roven 0,5 l. Plyn je ionizován rentgenovým zářením a proud nasycení je  $I_{nas} = 4$  mA. Kolik párů iontů se vytvoří za 1s v 1 cm<sup>3</sup> plynu? Náboj každého iontu je roven elementárnímu náboji.  
[  $5 \cdot 10^7 / (\text{cm}^3 \cdot \text{s})$  ]

17. Určete intenzitu proudu nasycení mezi deskami kondenzátoru, víte – li, že vlivem ionizačního činidla se v každém kubickém centimetru vytvoří  $n_0 = 10^8$  párů iontů, z nichž každý nese elementární náboj. Vzdálenost  $d$  mezi deskami kondenzátoru je rovna 1 cm a plošný obsah každé z desek je  $S = 100$  cm<sup>2</sup>.  
[  $I = 1,6 \cdot 10^{-9}$  A ]

18. Vzdálenost mezi deskami ionizační komůrky je  $d = 5$  cm a protéká jí nasycený proud  $j = 16$  μA.m<sup>-2</sup>. Určete počet  $n$  dvojic iontů, vytvářejících se v každém kubickém centimetru objemu komůrky za 1 s.  
[  $n = 2 \cdot 10^9$  cm<sup>-3</sup>.s<sup>-1</sup> ]

19. Jakou část své kinetické energie ztratí částice A o hmotnosti  $m_1$  při centrálním elastickém rázu s částicí B o hmotnosti  $m_2$ , která byla před srážkou v klidu? Výpočet proveďte též numericky pro případ srážky  
a) elektronu s atomem rtuti,  
b) neutronu s deuteriem.  
c) Při jaké hmotnosti částice B je ztráta energie částice A maximální ?

$$\left[ a) \frac{\Delta W_k}{W_k} = -\frac{4m_1m_2}{(m_1+m_2)^2} = -10910\% \quad b) \frac{\Delta W_k}{W_k} = -894\% \quad c) m_1 = m_2 \right]$$

20. Elektron o hmotnosti  $m$  a rychlosti  $v$  narazí centrálně na atom o hmotnosti  $M$ . Určete hybnost, kterou atom při srážce získá.

$$\left[ H = \frac{2mM}{m+M}v \right]$$

21. Ukažte, že při srážce elektronu, který má kinetickou energii  $e \cdot U$  s iontem, jehož ionizační potenciál je  $U_i$ , se musí uvolnit energie  $\frac{eU}{1+\frac{m}{M}} + eU_i$ , má – li srážka vést k rekombinaci.

22. Charakteristika elektrického oblouku, hořícího mezi uhlíkovými elektrodami, je dána vztahem  $U = a + \frac{b}{I}$ , kde konstanty  $a$  a  $b$  jsou lineárními funkcemi vzdálenosti  $d$  mezi elektrodami:  $a = \alpha + \beta \cdot d$  a  $b = \gamma + \delta \cdot d$ . Je – li průměr uhlíkových elektrod 1 cm a

měříme – li vzdálenost  $d$  v centimetrech, je  $\alpha = 39$ ,  $\beta = 0,21$ ,  $\gamma = 11,7$  a  $\delta = 1,05$ .  
 Vypočtete proud, je – li oblouk v sérii s rezistorem  $R = 25 \Omega$  připojen ke zdroji s elektromotorickým napětím  $\mathcal{E} = 100 \text{ V}$ .  
 [  $I = 2,215 \text{ A}$  ]

23. a) Kolikrát vzroste hustota nasyceného proudu z wolframové katody, zvýší – li teplota katody z 2500 K na 3000 K? Výstupní práce elektronu z wolframu je  $W = 4,52 \text{ eV}$ .  
 b) Kolikrát by vzrostla hustota nasyceného proudu z katody, pracující při teplotě 2500 K, kdyby výstupní práce elektronu z povrchu klesla ze 4 eV na 2 eV?

$$\left[ a) \frac{I_{n2}}{I_{n1}} = 4,73 \quad b) \frac{I_{n2}}{I_{n1}} = 1063 \right]$$

24. Vypočtete, jak velký nasycený proud emituje tantalová katoda ve tvaru vlákna délky  $l = 10 \text{ cm}$  a průměru  $d = 0,1 \text{ mm}$  při teplotě  $T = 3000 \text{ K}$ . Konstanty  $B = 50 \text{ A/cm}^2 \text{K}^2$ ,  $A = 4,10 \text{ eV}$ ,  
 [  $I_n = 18,29 \text{ A}$  ]

25. Elektrody vakuové diody jsou tvořeny paralelními destičkami, z nichž každá má plochu  $1 \text{ cm}^2$  a jsou od sebe vzdáleny  $0,3 \text{ cm}$ .  
 a) Jak veliké musí být anodové napětí, aby diodou protékal anodový proud  $60 \text{ mA}$  ?  
 b) Jak velikého napětí by bylo třeba k dosažení téhož proudu, kdyby se vzdálenost elektrod zdvojnásobila ?  
 [ a)  $U = 175 \text{ V}$ ,    b)  $U = 441 \text{ V}$  ]

### Literatura:

- [1] Fuka, J, Havelka, B.: *Elektrina a magnetismus*. SPN Praha 1965  
 [2] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.: *Fyzika*. VUTIUM Brno, PROMETHEUS Praha, 2000.  
 [3] Saveljev, I.V.: *Kurs obščej fiziki*, Nauka, Moskva 1984.  
 [4] Putilov, K.A.: *Kurs fiziki II*, Fizmatgiz 1959  
 [5] Horák, Z., Krupka, F., Šindelář, V.: *Technická fyzika*, SNTL Praha 1960  
 [6] [www.dbme.feec.vutbr.cz/ubmi/courses/MKZS](http://www.dbme.feec.vutbr.cz/ubmi/courses/MKZS)  
 [7] Sedlák, B., Štoll, I.: *Elektrina a magnetismus*. UK Praha, Academia Praha 1992.  
 [8] Čičmanec, P.: *Elektrina a magnetismus*, Bratislava 2001  
 [9] Tirpák, A.: *Elektromagnetismus*. Polygrafia SAV, 1999.  
 [10] Serway, R.A.: *Physics*. Sanders College Publ. 1996.

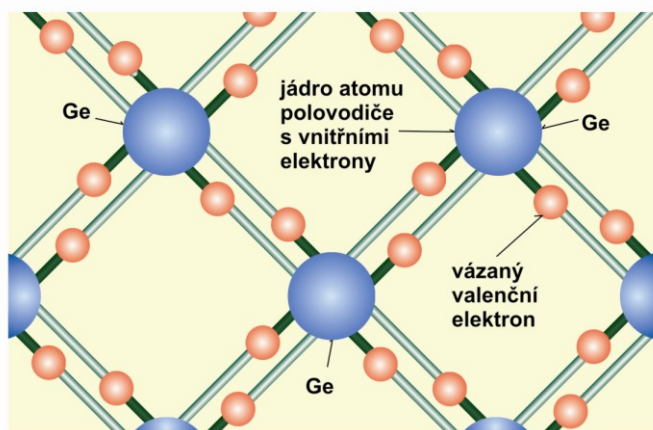
### 3. Polovodiče.

Teorii vedení elektřiny v polovodičích lze podat v zásadě dvěma způsoby. První vychází z klasických představ vedení elektrického proudu jako záporně a kladně nabitých bodových nábojů (elektronů a děr). Tento způsob je jistě velmi názorný, vhodný k vysvětlení této látky na základní a střední škole, není však úplný. Druhý způsob vychází ze závěrů kvantové teorie pevných látek (konkrétně z pásové teorie pevných látek). Tímto druhým způsobem je vysvětlena teorie vedení elektrického proudu v polovodičích v knize autorů Halliday, D, Resnick, R, Walker, J „Fyzika“ až po objasnění základů kvantové fyziky. Protože studenti Pedagogické fakulty, kombinací s fyzikou, jsou vychováváni jako budoucí učitelé fyziky na základní škole a nižších stupních gymnázia, je podle našeho názoru velmi vhodné, aby na slušné úrovni zvládli oba způsoby výkladu elektrických vlastností polovodičů. Proto jsme považovali za vhodné zařadit do výuky i „klasický“ výklad vedení elektřiny v polovodičích.

#### 3.1. Vlastní polovodič.

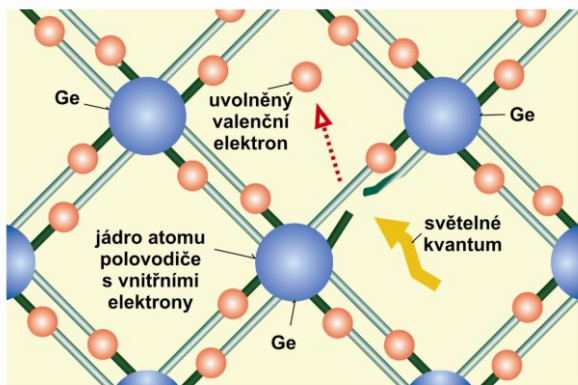
Vytvoříme – li jednoduchý obvod, složený z baterie, měděných přívodů a žárovky, bude žárovka svítit, což je známkou toho, že vodičem protéká elektrický proud. Nahradíme – li část vodiče tyčinkou z křemíku, proud poteče až tehdy, ohřejeme – li ji např. plamenem plynového hořáku. Křemík patří k tomu druhu materiálu, který se co do své elektrické vodivosti nachází mezi vodiči a izolátory, tj. k *polovodičům* (kdybychom křemíkovou tyčinku nahradili tyčinkou keramickou, proud by neprotékal ani při vysoké teplotě).

Rozdíl mezi vodiči, polovodiči a izolátory lze vyjádřit i kvantitativně: řádová hodnota vodivosti kovů je cca  $10^{-8} - 10^{-6} \Omega \cdot m$ , polovodičů cca  $10^{-3} \Omega \cdot m$  a izolátorů  $10^{12} - 10^{15} \Omega \cdot m$ . V polovodičích a izolátorech se na rozdíl od kovů nemohou pohybovat valenční elektrony volně – jsou vázány tzv. kovalentní vazbou. Například u čtyřvázného křemíku je každý z valenčních elektronů jednoho atomu vázán touto vazbou s obdobným elektronem atomu sousedního (Obr.3.1.). Základními vlastnostmi kovalentní vazby je její směrovost, nasycenost a sdílení elektronů. Její podstata nemůže být dokonale objasněna na základě klasické fyziky a bude probrána podrobněji v posledním dílu učebnice, zabývající se kvantovou fyzikou.



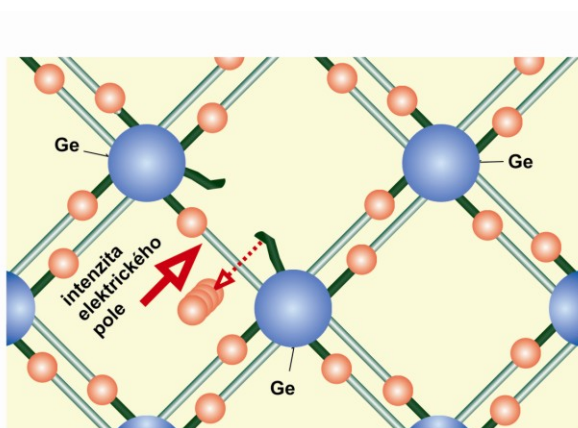
Obr.3.1. Vlastní polovodič.

Podle nastíněného obrázku krystalu polovodiče, vázaného kovalentní vazbou, by v něm neměla existovat možnost vedení elektrického proudu. Z praxe však víme, že polovodiče elektrický proud vedou. Vysvětlujeme si to tak, že dojde k uvolnění původně vázaného elektronu do oblasti mezi atomy. Může se tak stát např. působením světelného kvanta, (Obr.3.2.), nebo vlivem teploty. Takto uvolněný elektron se pohybuje polovodičem podobně, jako tomu bylo u vodičů, tj. proti směru intenzity elektrického pole – tzv. elektronová vodivost (Obr.3.3). Jiný způsob vodivosti spočívá v tom, že na místo, které zůstalo po uvolnění elektronu (které je nyní kladné) se dostane elektron, odtržený např. od sousedního, nebo jiného blízkého atomu. Tento děj může pokračovat dále a pro jednoduchost si můžeme představit, že se „pohybuje“ ono kladné místo („díra“) a to ve směru intenzity elektrického pole. Takovou vodivost nazýváme *děrovou*.



Obr.3.2. Mechanismus uvolnění elektronu světelným kvantem.

Elektronová nebo děrová vodivost čistých polovodičů je označována jako *vlastní vodivost* a zmíněné polovodiče jsou tzv. *vlastní polovodiče*. V tomto případě hovoříme o vzniku páru elektron – díra. Poněvadž podle II. termodynamické věty nelze vyrobit monokrystal bez cizích příměsí a vakancí (bodových poruch), je možný i vznik nosičů nábojů díky těmto nečistotám (minoritní nosiče nábojů).



Obr.3.3. Elektronová vodivost v polovodičích

Vlastní vodivost polovodičů není příliš využívána v praxi. Protože vlastní vodivost roste dosti značně s rostoucí teplotou, jsou vlastní polovodiče využívány jako čidla teplot, zejména v oblasti nízkých teplot. Z hlediska fyzikálně – chemického se prvky, které mají

polovodiivé vlastnosti, nacházejí ve zcela určité části Mendělejevovy periodické tabulky prvků (Tab.1). Zde jsou uvedeny tzv. elementární polovodiče, vykazující vlastní vodivost.

V polovodičích dochází i k ději opačnému k uvolňování elektronů z kovalentních vazeb a to k ději zvanému *rekombinace* (elektron + díra  $\rightarrow$  neutrální atom). Celkový obraz vedení proudu v polovodičích je tedy takový, že v každém okamžiku sice existuje určitý počet volných elektronů a děr, ale volné elektrony se stále obměňují – nové vznikají a jiné rekombinují s dírami. Výsledkem je stav, zvaný *dynamická rovnováha*. Jako dobu života označujeme průměrnou dobu mezi vznikem páru elektron – díra a rekombinací na neutrální atom. Tato doba může být různá a může být vhodně regulována. V polovodičových součástkách bývá v rozmezí 10  $\mu$ s – 0,1  $\mu$ s.

| P \ G | II | III | IV | V  | VI | VII | VIII |
|-------|----|-----|----|----|----|-----|------|
| II    | Be | B   | C  | N  | O  | F   |      |
| III   |    | Al  | Si | P  | S  | Cl  |      |
| IV    |    | Ca  | Ge | As | Se | Br  |      |
| V     |    | In  | Sn | Sb | Te | J   |      |
| VI    |    |     | Pb | Bi | Po | At  |      |

Tab.1. Elementární polovodiče v Mendělejevově tabulce prvků

### 3.2. Příměsové polovodiče.

Pomocí základních termodynamických principů lze, jak již bylo řečeno, dokázat, že nelze vyrobit krystal, ve kterém by nebyly přítomny žádné bodové poruchy (vakance, atomy nečistot). Pokud je cizí atom nežádoucí, hovoříme o nečistotě, pokud je přidán záměrně, hovoříme o příměši.

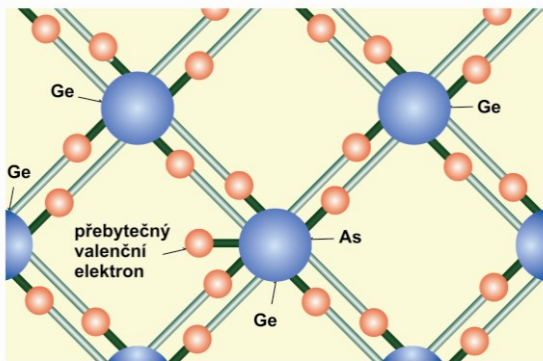
**Vodivost typu N, donory.** Vpravíme – li do krystalu polovodiče, složeného ze čtyřvazných atomů, pětivazné atomy (např. fosforu, velmi často pomocí difúze), naváží se tyto atomy kovalentní vazbou na své sousedy (Si, Ge, apod.). Pátý valenční elektron však bude slabě vázaný, snadno se uvolní a stane se z něho vodivostní elektron. Taková vodivost se nazývá vodivostí typu N (negativní) a příměši, dodávající vodivostní elektrony do polovodiče, se nazývají donory (z latinského donor = dárcce) (Obr.3.4.)

**Vodivost typu P, akceptory.** Zavedeme - li do monokrystalu čistého křemíku nebo germania trojvazný prvek (např. kadmium), způsobí tento prvek tzv. *děrovou vodivost* (Obr 3.5.) a pohybující se částice budou kladné díry, pohybující se ve směru elektrického pole (fyzicky to však budou opět elektrony, jak jsme již dříve vysvětlili).

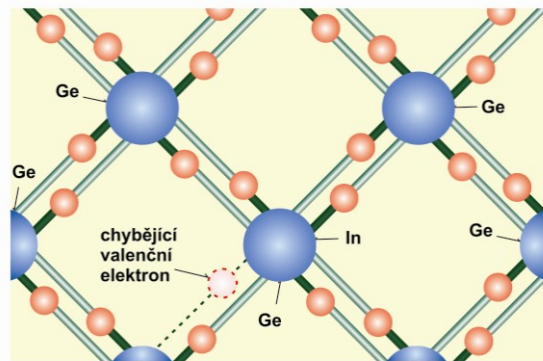
Hlubší zamyšlení nám objasní jeden z podstatných rozdílů mezi vodivostí vodičů a polovodičů: vodivost čistých vodičů je vysoká a malé procento příměsí ji nijak nezmění. Vodivost čistých polovodičů je velmi malá a již velmi malé procento příměsí ji značně zvýší.

Jako *silně dotovaný* označujeme takový krystal, ve kterém na každých  $10^2 - 10^4$  atomů základního prvku připadá jeden atom příměsí. Ve *slabě dotovaných* krystalech připadá jeden dotující atom na  $10^6 - 10^9$  atomů základní matrice.

**Difúzní a vodivostní proud v polovodičích.** Podobně jako v případě vodičů, pohybují se i v polovodičích nosiče proudu vlivem působení elektrického pole (což jsme již diskutovali). Druhou příčinou pohybu nosičů nábojů v polovodičích může být jev, zvaný difúze. Difúze je podmíněna teplotou systému (roste s teplotou, neboť nosiče nábojů jsou více „postrkovány“ kmity mřížce) a koncentračním spádem nosičů nábojů (proudí z míst s vyšší koncentrací do míst s koncentrací nižší). Takový proud se nazývá *proudem difúzním*.



Obr.3.4. Polovodič typu N.



Obr.3.5. Polovodič typu P

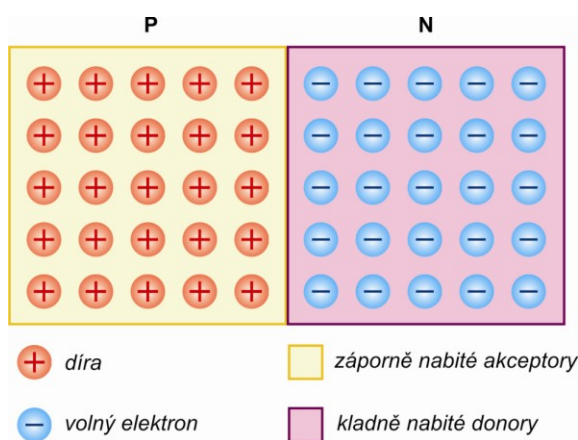
### 3.3. Přechod PN, dioda.

Dotujeme – li část krystalu čistého polovodiče (Si,Ge) atomy pětivazného prvku (P,As,Sb), získáme polovodič typu N. Dotujeme – li zbylou část krystalu atomy trojvazného prvku (B,Al,Ga,In), dostaneme polovodič typu P. Část krystalu, rozdělující obě oblasti s různým typem vodivosti, nazýváme *PN přechod*. Mějme nyní krystal polovodiče, v jehož levé části jsme vytvořili pomocí nějakého technologického postupu (budou diskutovány později) vodivost typu P a v pravé části vodivost typu N. Na Obr.3.6. je taková situace schematicky zobrazena. V levé části krystalu jsou nosiči nábojů díry (+ v kroužku) a ionty akceptorů jsou tedy nabity záporně. Naopak v pravé části donory odevzdaly do krystalu elektrony a staly se z nich tedy kladně nabitě ionty (barva je v obou oblastech různá, abychom tím vyjádřili rozdílné znaménko iontů akceptorů a donorů).

Volné díry i volné elektrony konají v krystalu chaotický pohyb, rekombinují, vznikají nové, atd. Protože v levé části krystalu je nadbytek děr, budou tyto *difundovat* do pravé části a naopak elektrony z pravé části budou difundovat do části levé (Obr.3.7.). Je třeba zdůraznit, že to *není* elektrická síla, která řídí přerozdělování nosičů nábojů, ale že je to difúze. Že tedy

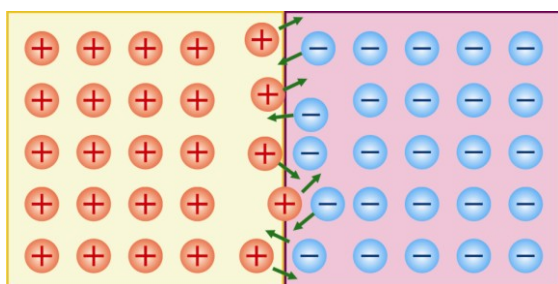


díry a elektrony se navzájem nepřitahují, jak by se na první pohled mohlo zdát – vždyť celý krystal je navenek neutrální (to bývá nejčastější chyba při interpretaci PN přechodu). Difúzní proud po jisté době ustane, neboť po děračích zůstala záporně nabitá část krystalu, která je přitahuje zpět a po elektronech tomu je naopak. Dojde tedy opět k tzv. dynamické rovnováze, která má statistický charakter. Jiný způsob představy vzniku PN přechodu je následující: elektrony, které přešly z pravé části do části levé se naváží na volné vazby u akceptorů (díry) a tím učiní oblast levé části poblíž PN přechodu zápornou a naopak po nich v pravé části poblíž PN přechodu zůstane část krystalu kladná (Obr.3.8.). Tak vzniká v části krystalu, těsně přiléhající k PN přechodu nevykompenzovaný náboj kladný a záporný – tzv. *difúzní napětí*. Oblast, ve které se nevykompenzovaný elektrický náboj nachází, se nazývá *oblastí prostorového náboje*. Je třeba zdůraznit, že tento prostorový náboj je tvořen ionty atomů příměsí, pevně zabudovanými v mřížce krystalu a tedy nepohyblivými a nelze proto jeho rozdíl potenciálů změřit například tak, že bychom se dotkli obou oblastí tenkými drátky a snažili se difúzní napětí změřit voltmetrem.

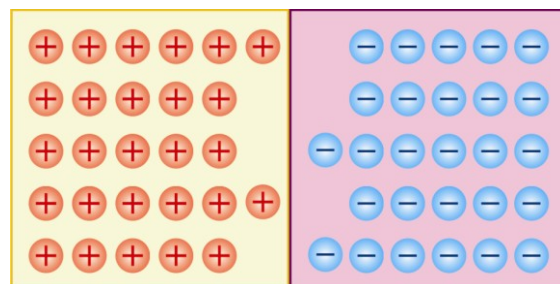


Obr.3.6. PN přechod.

Všechny úvahy byly provedeny pro případ, kdy na krystal polovodiče nebylo přiloženo vnější napětí. Ke vzniku prostorového náboje dochází tedy v každém polovodičovém prvku ihned po vytvoření PN přechodu.



Obr.3.7. Difúze na přechodu PN

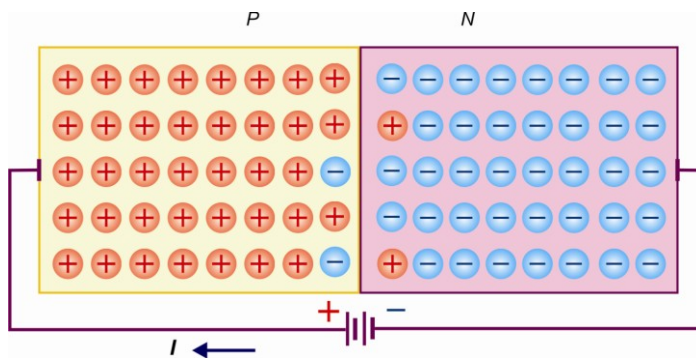


Obr.3.8. Vznik oblasti prostorového náboje.

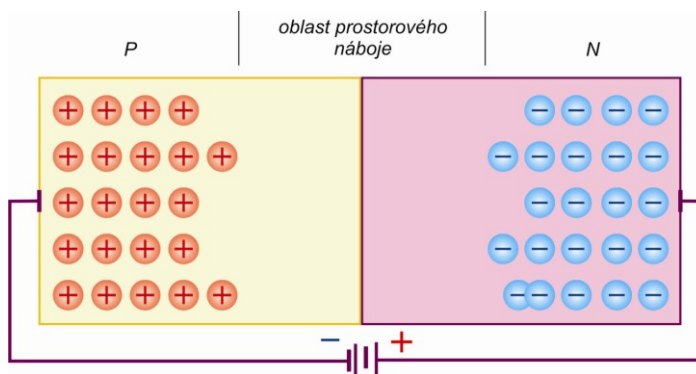
**PN přechod, připojený na vnější napětí.** Připojíme – li nyní kladný pól baterie např. na oblast typu P a záporný na oblast typu N polovodiče, nebude při malých hodnotách vnějšího napětí procházet téměř žádný proud, neboť záporný prostorový náboj PN přechodu

nemůže být elektrony překonán. Teprve po dosažení tzv. difúzního napětí (pro Si cca 0,8 V, pro Ge cca 0,4 V), začne proud prudce vzrůstat. Takové zapojení vnější baterie nazýváme *zapojením v propustném směru* (Obr.3.9.).

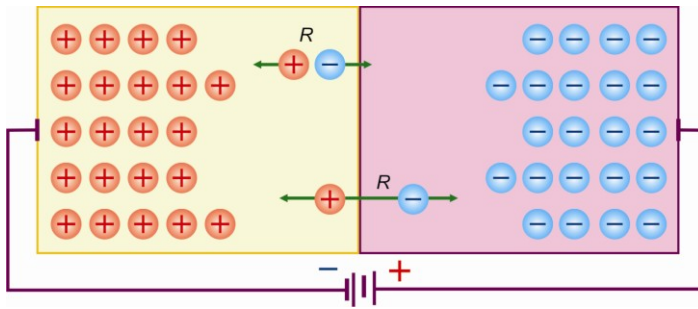
Změníme – li polaritu vnější baterie na opačnou, získáme tzv. *zapojení v závěrném směru* (Obr.3.10.). V tomto případě kladný pól baterie přitahuje elektrony z oblasti N a záporný pól díry z oblasti P, takže dojde k rozšíření oblasti prostorového náboje a přechodem PN nebude procházet *téměř* žádný proud. Záměrně jsme zdůraznili slovo *téměř*, neboť ve skutečnosti jistý velmi malý proud PN přechodem prochází a je třeba se zmínit o jeho podstatě, neboť byť by byl velmi malý, je důležitý. Vznik tohoto proudu lze vysvětlit následovně: již dříve jsme uvedli, že v celém prostoru krystalu existují rekombinační centra (atomy nečistot, vlastní vodivost polovodičů), která jsou zdrojem vzniku párů elektron – díra. Tato rekombinační centra dodávají do obvodu tzv. minoritní nosiče nábojů, které tak tvoří tzv. závěrný proud (Obr.3.11.). Pokud bychom zvyšovali napětí vnější baterie, může dojít ke vzniku lavin, vyvolaných minoritním nosiči proudu. Ty dosahují při vyšším napětí v závěrném směru tak vysoké rychlosti (a energie), že jsou schopné ionizovat nárazem neutrální atomy polovodiče. Tím vzroste počet nosičů nábojů, které se opět urychlí, a proud v závěrném směru roste velmi prudce. Tak velký proud způsobí průraz PN přechodu a zničí celý polovodičový prvek. Měření ukazují, že tzv. *kritická hodnota intenzity elektrického pole*, při níž dojde k průrazu, je 25 kV/mm. Odtud plyne, že pro reálné PN přechody, vyrobené v krystalech Si, nebo Ge, může být reálná hodnota závěrného napětí řádu několika desítek voltů.



Obr.3.9. PN přechod, zapojený v propustném směru



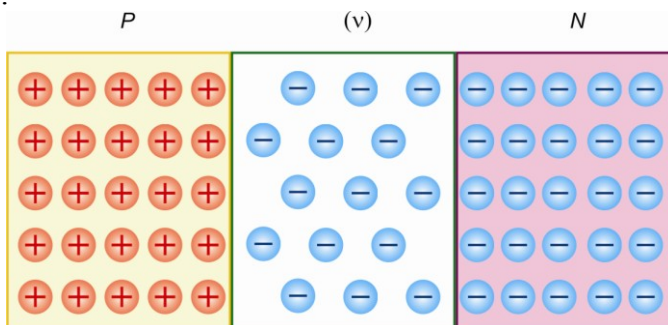
Obr.3.10. PN přechod, zapojený v závěrném směru.



Obr.3.11. K vysvětlení závěrného proudu v polovodičích.

**Poznámka.** Zajímavým problémem je otázka, které faktory ovlivňují šířku oblasti prostorového náboje. V první řadě to bude jistě teplota, neboť teplota ovlivňuje difúzi, která je zodpovědná za vznik oblasti prostorového náboje. Podobně musí být druhým faktorem, určujícím šířku oblasti prostorového náboje koncentrace příměsí, která též silně ovlivňuje difúzi. Z jednoduchých úvah tedy plyne, že šířka oblasti prostorového náboje roste s teplotou a klesá s růstem koncentrace příměsí (k dosažení difúzního napětí stačí příměsí z užší oblasti poblíž přechodu PN).

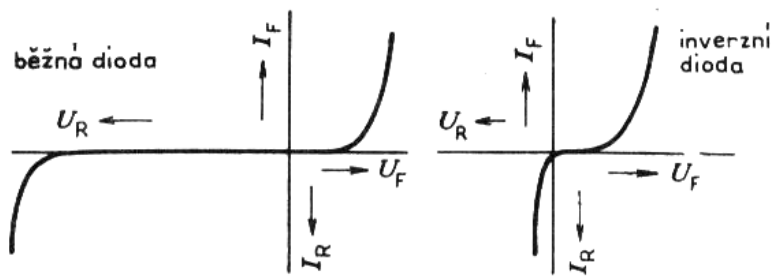
**Diody P $\pi$ N a P $\nu$ N.** Z dosavadních úvah plyne, že nelze dosti dobře dosáhnout vysokého závěrného napětí (k tomu je potřebná velmi nízká koncentrace příměsí) a velkého proudu v propustném směru (k tomu je potřebná vysoká koncentrace příměsí). Aby odstranili tento nesoulad, navrhli Hall a Dunlop diodu nového typu, tzv. diodu P $\pi$ N (nebo P $\nu$ N). Taková dioda se skládá ze tří částí s různou vodivostí: silně dotované oblasti typu P, slabě dotované oblasti v (donory) a nakonec opět silně dotované oblasti typu N (Obr.3.12.). Pokud takovou diodu zapojíme v propustném směru, nemění oblast v nijak velikost proudu v propustném směru, neboť elektrony z oblastí N a v (díry z P) ji snadno překonají. Naopak při zapojení v závěrném směru slabě dotovaná střední oblast v způsobí značné rozšíření oblasti prostorového náboje, takže kritické intenzity elektrického pole (průrazného napětí) se dosahuje až při vysokých hodnotách závěrného napětí (cca 4000 V). Z právě uvedených důvodů se v současné době prakticky všechny polovodičové diody vyrábějí jako diody P $\pi$ N, či P $\nu$ N.



Obr.3.12. Dunlopova dioda.

### 3.4. Voltampérová charakteristika diody, speciální diody.

Z informací, týkajících se funkce PN přechodu a tedy i diod jako elektronických prvků, můžeme učinit kvalitativní závěr o tvaru tzv. voltampérové charakteristiky diody, což je závislost proudu, procházejícího diodou na napětí na ní. Typický tvar takové charakteristiky je uveden na Obr.3.13. Je třeba poznamenat, že hodnoty, charakterizující kvalitativně křivku na tomto obrázku se mohou značně lišit pro různé konkrétní diody.

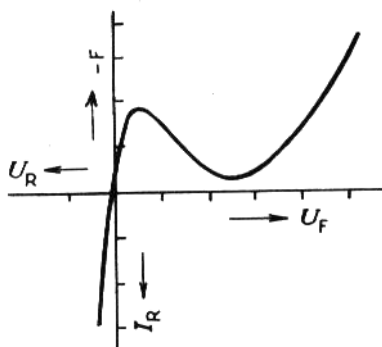


Obr.3.13. Voltampérová charakteristika běžné a inverzní diody.

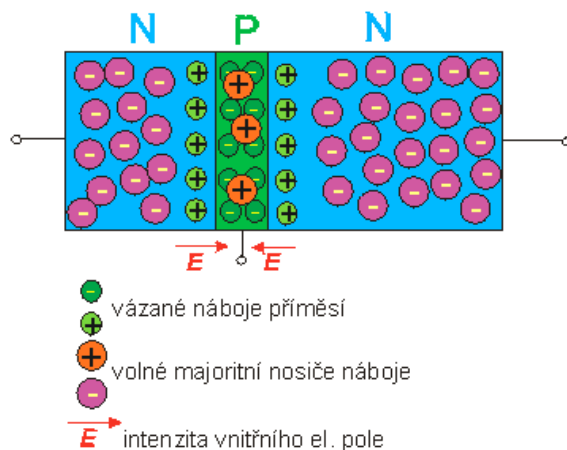
**Zenerova dioda.** V případě silně dotovaného přechodu PN, bude oblast prostorového náboje velmi úzká. V závěrném směru potom nedojde k průrazu, neboť nebude dosti prostoru pro vznik laviny. V praxi využíváme závěrné části voltampérové charakteristiky jako stabilizátoru napětí.

**Inverzní dioda.** Při ještě vyšším stupni dotace bude oblast prostorového náboje ještě užší, než u Zenerovy diody a průrazné napětí v závěrném směru bude nižší, než difúzní napětí ve směru propustném (Obr.3.13.). Inverzní diody se používají k usměrňování velmi nízkých střídavých napětí (dioda usměrňuje v závěrném směru – proto přívlastek *inverzní*).

**Tunelová dioda.** Ještě vyšší dotace příměsími než tomu bylo v případě inverzní diody, je ovlivněna i voltampérová charakteristika v propustném směru a to tak, že na ní vznikne oblast se záporným odporem (Obr.3.14. ). Mechanismus vedení proudu v této diodě lze objasnit pouze na základě poznatků z kvantové mechaniky pomocí tzv. tunelového jevu. Tunelové diody se používají při konstrukci vysokofrekvenčních generátorů jako zdroje elektromagnetických kmitů (jako oscilátory).



Obr. 3.14. Voltampérová charakteristika tunelové diody.



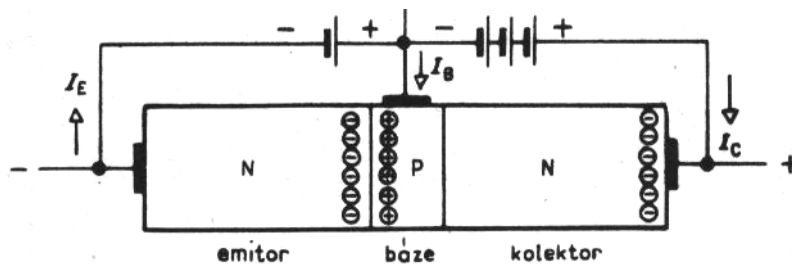
Obr.3.15. Princip činnosti tranzistoru [6].

### 3.5. Tranzistor.

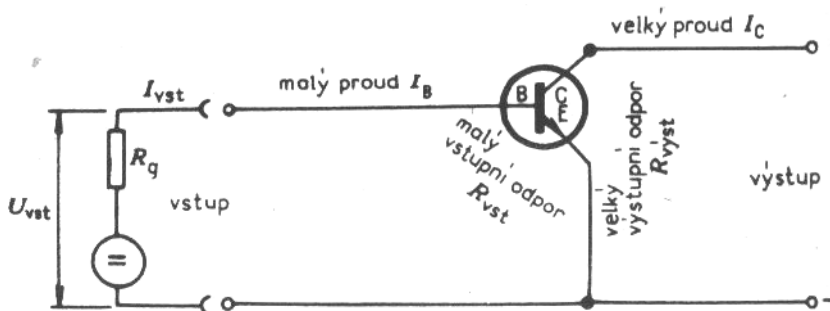
V historickém kontextu lze polovodičové diody chápat jako mnohem úspornější a mnohem menší (co do objemu) náhrady diod vakuových. Vědci se analogicky snažili najít polovodičovou náhradu za vakuovou triodu, tj. elektronku se třemi elektrodami, která tím, že se stala základem zesilovačů a oscilátorů, předznamenala bouřlivý rozvoj radiotechniky v polovině minulého století.

Byli to američtí vědci, Bardeen, Brattain a Shockley, kteří tuto úlohu úspěšně vyřešili tím, že sestrojili *tranzistor* (a byli za tento vynález oceněni Nobelovou cenou). Tranzistor se skládá ze tří oblastí typu NPN, nebo PNP. Elektrické vývody těchto oblastí značíme jako báze, emitor a kolektor (Obr.3.16.). Tranzistor si můžeme představit jako dvě diody, zapojené proti sobě. V případě tranzistoru NPN, zapojeného v zapojení se společnou bází, je první dioda NP (emitor – báze) zapojena v propustném směru a druhá dioda PN (báze – kolektor) je připojena na baterii s mnohem vyšším napětím ve směru závěrném. Elektrony z emitoru přicházejí do oblasti báze, která je konstruována jako úzká oblast mezi emitorem a kolektorem a proto jenom velmi malá část elektronů vytvoří tzv. proud báze  $I_b$  a převážná část jich přejde do oblasti kolektoru, kam je vtažena mnohem vyšším kolektorovým napětím a vytvoří tzv. kolektorový proud  $I_k$ . V zapojení se společnou bází (Obr.3.16.) je proudový zesilovací činitel  $\alpha = \frac{I_k}{I_e}$  poněkud menší, než 1, ovšem napěťové a výkonové zesílení je

vždy větší než 1. Snadno si můžeme podobnými úvahami odvodit, že při zapojení tranzistoru se společným emitorem, nebo se společným kolektorem je i proudový zesilovací činitel větší jak 1. Dokazuje to zapojení se společným emitorem na Obr 3.17.: malý proud báze řídí velký kolektorový proud.



Obr.3.16. Zapojení transistoru se společnou bází



Obr.3.17. Zapojení tranzistoru se společným emitorem.

## Literatura:

- [1] *Dioda, transistor a tyristor názorně*. Programovaný kurs. SNTL Praha 1983
- [2] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.: *Fyzika*. VUTIUM Brno, PROMETHEUS Praha, 2000.
- [3] Putilov, K.A.: *Kurs fyziki II*, Fizmatgiz 1959
- [4] Horák, Z., Krupka, F., Šindelář, V.: *Technická fyzika*, SNTL Praha 1960
- [5] Fuka, J, Havelka, B.: *Elektrina a magnetismus*. SPN Praha 1965
- [6] Encyklopedie Wikipedia.

## 4. Praktické využití elektrických a magnetických jevů.

Využití elektrických jevů zejména v technické praxi je tak rozsáhlé, že daleko přesahuje rámec dokonce i dosti objemné knihy. Proto jsme se omezili na taková využití, která jsou na jedné straně natolik známá, že se nad jejich podstatou nezamýšlíme a na druhé straně taková využití, která jsou zajímavá tím, že v nich elektřinu a magnetismus na první pohled nevidíme. Podle našich zkušeností mohou právě takové jevy a zařízení sloužit jako motivační prvky ve výuce fyziky.

### 4.1. Elektrostatika

Elektrické náboje vznikají různým způsobem. Někdy je tomu díky fázovým změnám v látkách (vznik ledu), při přetržení vlákna, při rozlomení krystalu (cukr, sůl aj.), při přelévání kapalin, proudění plynu, tření látek apod. Jsou – li tyto náboje od sebe odděleny nevodivým prostředím, vzniká mezi nimi elektrické napětí. V tabulce 1 jsou uvedeny orientační hodnoty takového napětí při různých dějích:

| Děj                                  | Napětí   |
|--------------------------------------|----------|
| Sníh ve vánici                       | 65 V     |
| Mletí cukru ve válcovém mlýně        | 1 700 V  |
| Jízda automobilu po betonové vozovce | 3 000 V  |
| Praní vlněných šatů v benzínu        | 5 000 V  |
| Barvení předmětů stříkáním           | 10 000 V |
| Chůze po vlněném koberci             | 14 000 V |
| Pohyb koženého hnacího řemene        | 80 000 V |

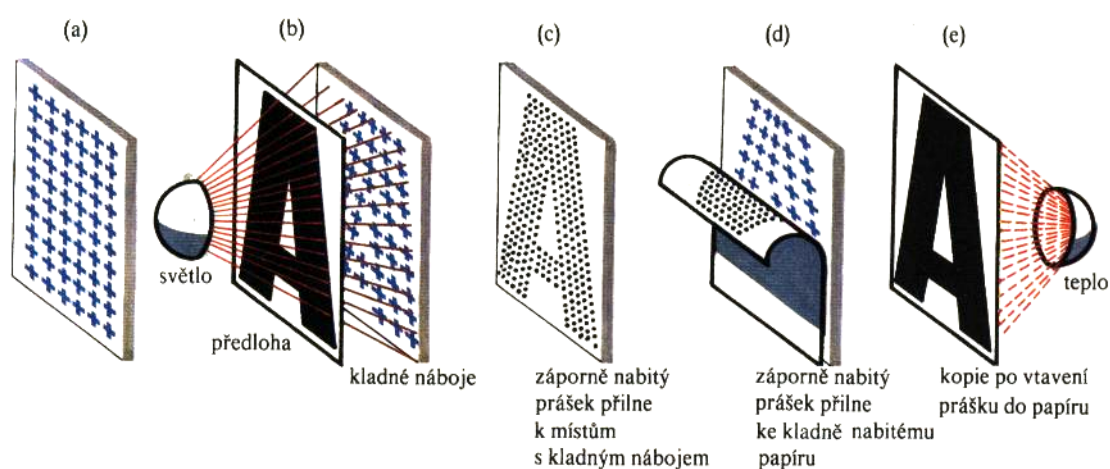
Tab.1. Velikost elektrických nábojů, generovaných za různých podmínek

Tak vysoké hodnoty napětí nás však nesmí příliš lekat. Fyziologické účinky má kromě hodnoty napětí hlavně proud, protékající živou tkání a ten je v těchto případech velmi malý a tak obvykle cítíme pouze píchnutí či brnění v prstech, dotkneme – li se po svléknutí vlněného svetru např. tělesa ústředního topení. Fyziologické účinky jsou obvykle tedy zanedbatelné, ale jiné účinky mohou být nepříjemné, ba přímo nebezpečné. Například jiskra, která přeskočí v prostředí, vyplněném hořlavými parami (nádrž automobilu, plastový kanystr na benzín, zaprášené tovární provozy, prázdné tankery, apod.). Nepříjemné účinky elektrostatického náboje známe z denní praxe – nemožnost docílení hladkého účesu příliš suchých vlasů, „přilepení“ sukně k punčochám při chůzi, usedání prachových částic na některé druhy látek (zejména syntetických), atd.

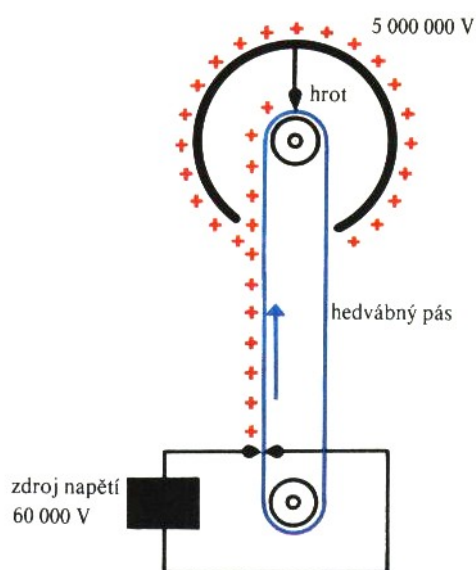
Známe – li příčinu těchto jevů, můžeme učinit opatření, která zamezí vzniku elektrických nábojů. Nejjednodušším opatřením je uzemnění těch objektů, na nichž se elektrický náboj shromažďuje (vodivý proužek textilie, protkaný kovovými drátky, spojující při jízdě automobil se zemí, odsávání náboje hroty, umístěnými poblíž pohybujících se pásů). Jindy zajistíme, aby náboje byly propojeny vodivě – různé druhy aviváží.

*Poznámka:* až asi do konce 50. let minulého století jezdily po silnicích automobily, poháněné párou (tzv. sentinely). Třením páry v jejich komínkách vznikala elektrický náboj tak velký, že při vystupování z automobilu by mohlo vzniknout tzv. krokové napětí. Aby se náboj vybíjel i během jízdy, táhl sentinel za sebou po vozovce dokonce řetěz.

**Využití elektrostatiky v praxi.** Nejznámější zařízení, využívající elektrostatických jevů bylo popsáno v kap.2.1. Jedná se o tzv. *elektrostatický odlučovač popílku*. Dalším významným využitím elektrostatiky je **xerografie** (suchý tisk). Princip xerografie je uveden na Obr.4.1.



Obr.4.1. Princip činnosti xerografie.



Obr.4.2. Van de Graafův generátor

Kovová deska (válec) je pokryta tenkou vrstvou polovodiivého selenu, který se ve tmě nabije pomocí doutnavého výboje kladným elektrostatickým nábojem. Jestliže nyní na vrstvičku selenu promítneme kopírovaný text, zůstane náboj pouze na neosvětlených místech vrstvy selenu. Na desku poté rozprášíme velmi jemný prášek (např. asphalt), nebo vhodné barvivo s nízkým bodem tání, které jsme předem nabili záporným nábojem. Proto se tento prášek zachytí pouze na místech s kladným nábojem, tj. na textu (obrázku). Na takto vzniklý prachový obraz přiložíme papír, nabitý kladným nábojem a prášek přilne k papíru. Poté se prášek zataví do papíru zahřátím na vyšší teplotu. Je jasné, že jsme uvedli pouze princip xerografie, reálně fungující kopírky jsou složitější.

**Van de Graafův generátor** (Obr.4.2.) je přístroj, využívaný nejen jako demonstrační zdroj vysokého napětí, ale též jako laboratorní přístroj, sloužící např. k urychlování elementárních částic. Pás, zhotovený z pogumovaného hedvábí se pohybuje mezi dvěma válci. V dolní části jsou na pás přiváděny kladné náboje ze zdroje vysokého napětí (60 000 V). V horní části přístroje jsou tyto náboje odváděny pomocí hrotu na vnější povrch duté kovové koule, kde se shromažďuje a takto lze dosáhnout napětí několika milionů voltů. V laboratorních přístrojích se přivádí na pás náboj, získaný třením kladky o pás.

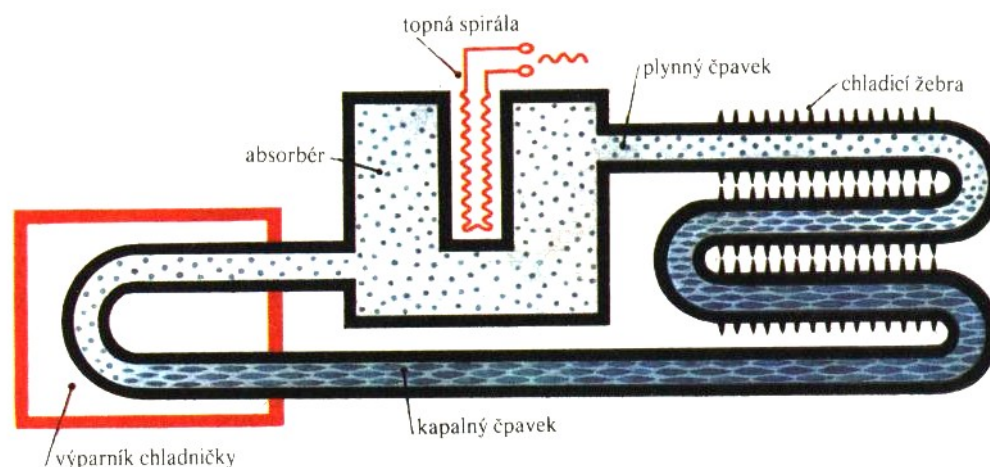
## 4.2. Elektrický proud.

Využití elektrického proudu v praxi je natolik rozmanité, že pouhý výčet názvů by byl velmi obtížný. Proto uvedeme pouze některá z nich (podle našeho názoru nejzajímavější).

**Elektrické vytápění.** Všechny elektrické spotřebiče, sloužící k vytápění jsou založeny na platnosti vztahu pro výpočet elektrické práce (Jouleovo teplo):

$$W = U.I.t = R.I^2.t.$$

Z tohoto vztahu vidíme, že u takových spotřebičů hraje velmi důležitou roli ohmický odpor. Elektrické spotřebiče, používané k vytápění dělíme na přímotopné a akumulční. Přímotopné spotřebiče ohřívají vzduch sáláním, akumulční topné spotřebiče pomocí šíření tepla prouděním. Akumulční topné spotřebiče mají vyšší účinnost a bývají navíc často konstruovány tak, že využívají tzv. noční proud, který je levný a ve vhodném médiu (např. keramice) teplo nashromážděné v noci vydávají ve dne, kdy jsou automaticky vypnuty.



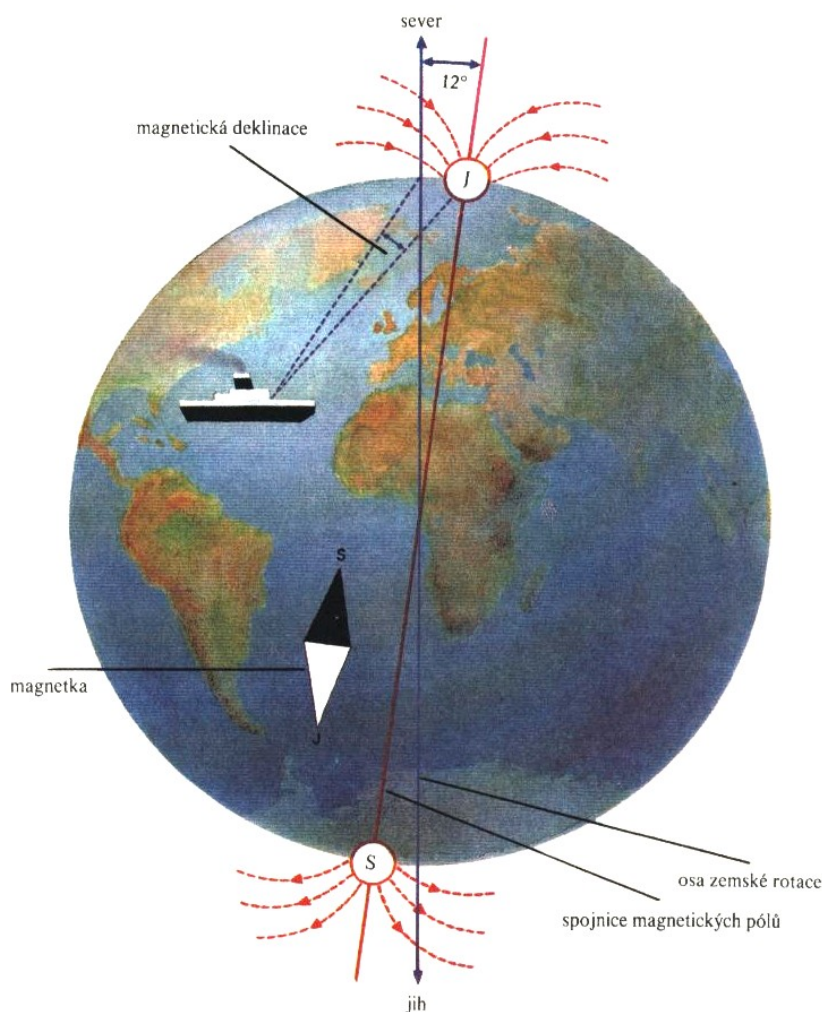
Obr.4.3. Princip absorpční chladničky.



**Elektrické chladničky.** Elektrická **absorbční chladnička** je založena na skutečnosti, že vypařující se médium odnímá svému okolí teplo. Náplní této ledničky je snadno se vypařující kapalina a absorbér, který páry chladicí kapaliny pohlcuje. Chladicí kapalinou je například čpavek a absorbérem voda. Z Obr.4.3. je zřejmý princip činnosti chladničky. Kapalný čpavek se vypařuje ve výparníku a tím ochlazuje vnitřní prostor chladničky. Páry čpavku jsou pohlcovány vodou v absorbéru. Vyhřívací těleso ohřívá vodu a tím je čpavek z vody vytěsňován a v trubičkách s chladicími žebry se čpavek vnějším vzduchem ochladí, zkapalní a přivádí znovu do výparníku. Tento cyklus se stále kontinuálně opakuje. Místo ohřívání elektrickým proudem lze k vytěsňování chladicí kapaliny použít i tepla, získaného např. z hořícího plamene plynu.

Druhým typem chladniček jsou **chladničky kompresorové**. U nich je absorbér nahrazen zařízením, ve kterém se páry chladicí kapaliny zkapalňují stlačováním pomocí pístu, poháněného kompresorem.

Výhodou absorbčních chladniček je skutečnost, že nemají žádné pohyblivé součástky a jsou tedy méně poruchové a mají tichý chod. Mají však vyšší spotřebu, než chladničky kompresorové (jejich spotřeba je asi 1 kWh za 24 hod.). Ve světě je vyráběno mnohem více ledniček kompresorových, než absorbčních.



Obr.4.4. Magnetické pole Země.

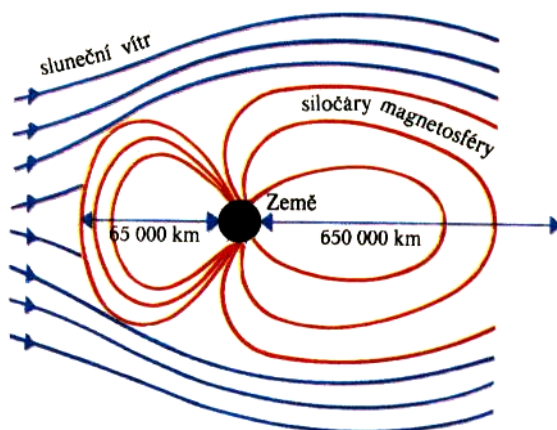
### 4.3. Magnetismus

Magnetické jevy byly známy lidstvu již asi 4000 let př.n.l. (Číňané – první kompas). V roce 1269 zkonstruoval Francouz P.Peregrinus první magnetickou stříčku v Evropě. Tento magnet sloužil jako základ pro pozdější velké zámožské objevy. V roce 1600 W.Gilbert vyslovil domněnku, že celá Země je velkým magnetem. Důvod vzniku magnetického pole Země není ještě definitivně prokázán. Soudíme, že souvisí s tím, že pevné kovové jádro Země rotuje s jinou rychlostí, než zemská kůra – vzniká tím elektrický proud, který vytvoří magnetické pole a vytvoří tak ze Země permanentní magnet. Severní pól tohoto magnetu se nachází v oblasti jižního geografického pólu a jižní pól naopak asi 1000 km od pólu severního. Aby však nedocházelo ke zmatkům, nazýváme jižní magnetický pól severním a naopak (Obr.4.4.)

Poloha magnetických pólů není pevná, póly „cestují“ pomalu a jejich poloha je ovlivňována atmosférickými bouřemi, zemětřeseními, sluneční činností, apod. Navíc dochází vždy po jisté dlouhé době k přepólování obou pólů, které trvá asi 2 roky (a v této době je Země bez magnetického pole, což může mít fatální význam pro život na Zemi). Země vytváří kolem sebe magnetické pole (magnetosféru), které sahá do vzdálenosti od 65 000 km až 650 000 km. Řádivý rozdíl těchto vzdáleností způsobuje tzv. Sluneční vítr, tj. proud nabitých částic, vyvrhovaných Sluncem při erupcích (Obr.4.5). Magnetosféra tyto nabitě částice odchyluje podle vztahu pro Lorentzovu sílu

$$F_L = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

( $q$  je velikost elektrického náboje,  $v$  je jeho rychlost a  $\mathbf{B}$  je magnetická indukce pole) a výsledkem je spirální rotace částic podél magnetických siločar a jejich dopad do oblasti Severního, nebo Jižního pólu (vznik polárních září v těchto oblastech).



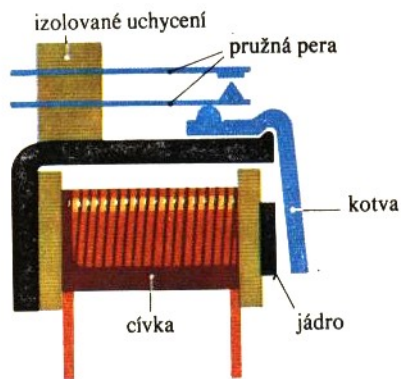
Obr.4.5. Sluneční vítr a jeho vliv na magnetosféru Země.

### 4.4. Elektromagnetická indukce

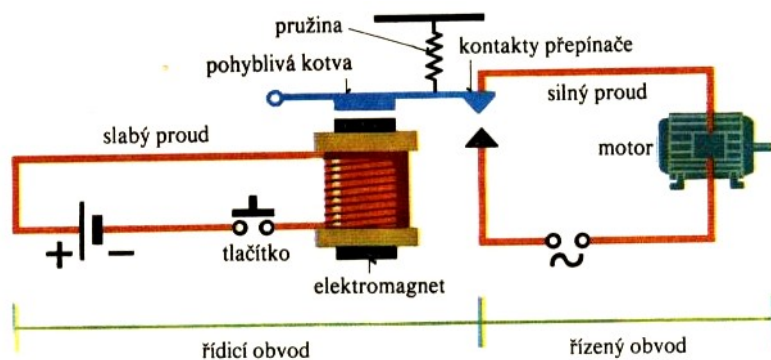
**Elektromagnetická relé** jsou stále ještě často používaným regulačním a spínacím prvkem. Společným jmenovatelem pro všechny typy relé je skutečnost, že pomocí malých proudů regulujeme proudy velké, nebo i jiné veličiny neelektrické povahy. Na Obr.4.6. je uvedeno nejjednodušší relé – telefonní.

**Elektrický spínač.** V tomto případě se jedná o velmi jednoduché relé, které se skládá z elektromagnetu a pohyblivé kotvy. Zapneme – li tlačítko, protéká cívkou slabý proud a

jádro elektromagnetu přitáhne kotvu, kontakty přepínače se spojí a řízeným obvodem bude protékat silný proud, který roztočí motor. Po vypnutí tlačítka dojde k procesu opačnému a motor se vypne (Obr.4.7.)

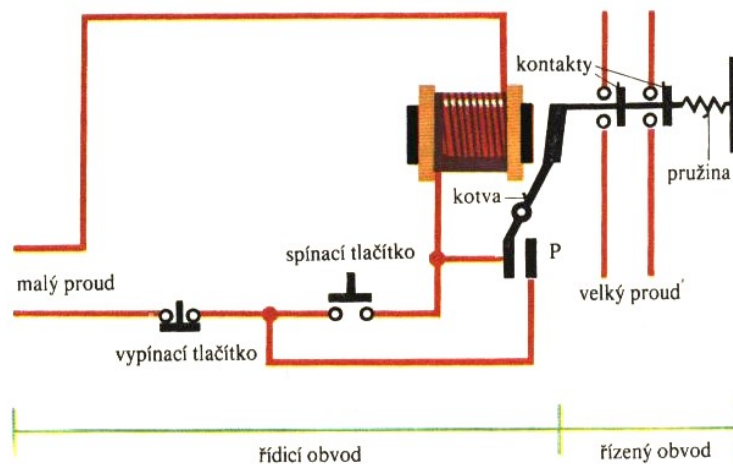


Obr.4.6. Telefonní relé.



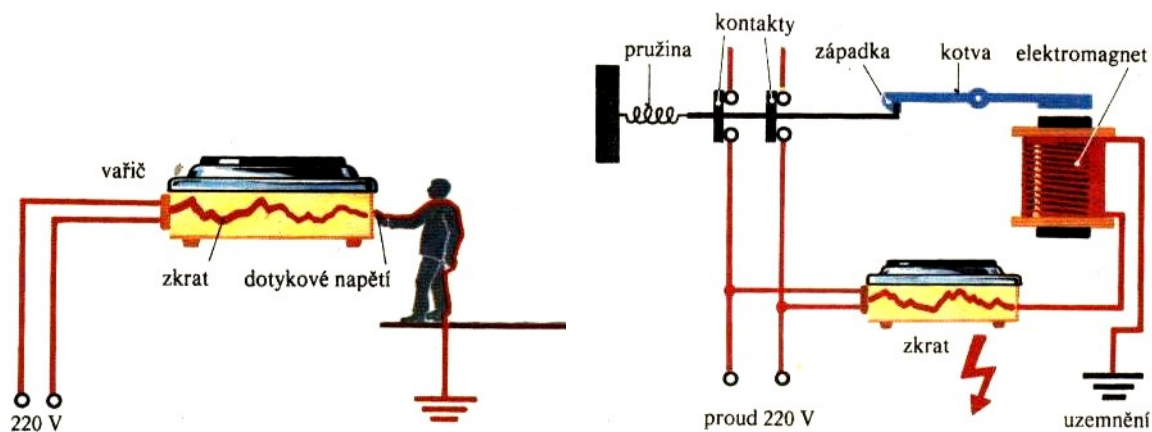
Obr.4.7. Elektrický spínač.

Ve výtahu a jiných podobných zařízeních používáme tzv. **elektromagnetické stykače** (Obr.4.8.). Po stisknutí spínacího tlačítka projde cívkou elektromagnetu proud, který přitáhne kotvu a spojí kontakty, takže řízeným obvodem bude protékat proud, který dá do pohybu např. výtah. Současně se spojí i kontakt P, takže i po uvolnění spínacího tlačítka protéká kotvou i cívkou proud a stykač zůstane zapnut do té doby, dokud vypínacím tlačítkem proud v cívce elektromagnetu nepřerušíme. Pružina pak kotvu přitáhne a tím rozpojí i kontakty řízeného obvodu.



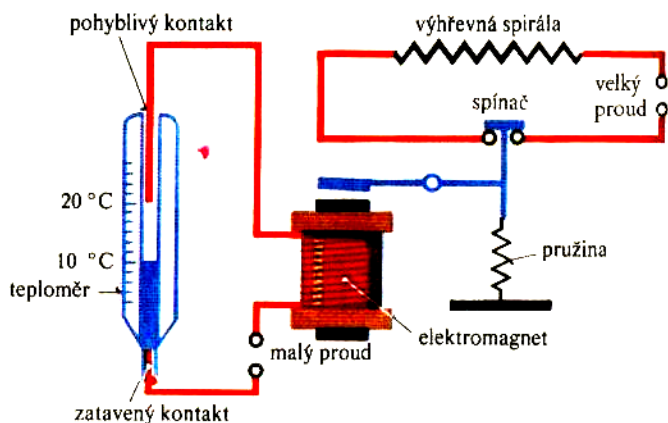
Obr.4.8. Elektromagnetický stykač.

K ochraně před úrazy elektrickým proudem slouží tzv. **chrániče** (Obr.4.9.). Vznikne – li poruchou na elektrickém spotřebiči (např. na vařiči) nebezpečné napětí (např. když se uvolněný vodič dotkne kovového obalu spotřebiče), začne cívkou elektromagnetu protékat proud do země, jádro přitáhne kotvu, uvolní se západka a pružina rozpojí kontakty a tím se přeruší průchod proudu.



Obr.4.9. Využití relé při ochraně proti úrazům elektrickým proudem.

Elektromagnetická relé se užívají i tam, kde chceme regulovat nějakou veličinu neelektrické povahy (teplotu, světlo, koncentraci roztoků apod.). Činnost takových relé je zřejmá z Obr.4.10. Tepelné relé pracuje tak, že v případě, že dosáhne rtuť k drátku (na předem nastavenou teplotu), dojde ke spojení obvodu, relé sepne a vypne se topná spirála. Při poklesu teploty poklesne i hladina rtuti, obvod se přeruší a topná spirála opět začne pracovat.



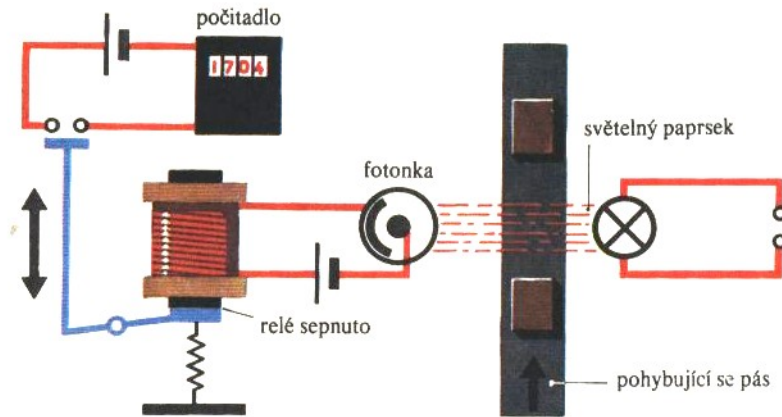
Obr.4.10. Regulátor teploty.

Fotoelektrické relé (fotorelé) lze použít např. k automatickému počítání předmětů na pohybujícím se pásu. Fotonkou protéká proud pouze tehdy, je – li osvětlena. Další činnost obvodu j zřejmá z Obr.4.11.

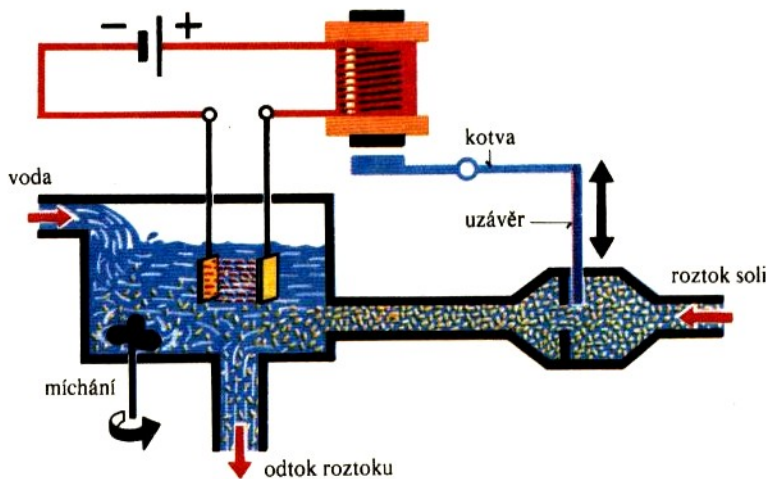
**Elektrochemické relé** slouží k přípravě roztoků s požadovanou koncentrací různých chemikálií. Čistá voda je sice dobrý izolátor, ale roztoky solí, kyselin a zásad jsou vodivé. Přitéká – li do nádrže roztok soli, potom při určité koncentraci soli ve vodě se zvýší proud cívkou natolik, že jádro přitáhne kotvu a přivře se ventil v potrubí, z něhož koncentrovaný

roztok soli přitéká. Jestli naopak koncentrace soli ve vodě poklesne, kotva odpadne a do nádrže začne opět přitékat koncentrovaný roztok soli (Obr.4.12).

Velmi jednoduchým spínacím prvkem je tzv. bimetal, tj. dvojice kovových pásků o různém koeficientu teplotní roztažnosti, pevně spojených. Funkce bimetalu je dokumentována na Obr.4.13.



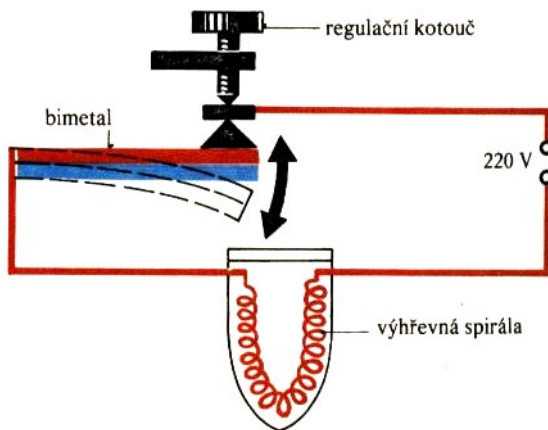
Obr.4.11. Spínací fotorelé.



Obr.4.12. Využití relé k automatickému udržování koncentrace roztoku.



Obr. 4.13. Bimetal jako spínací prvek.

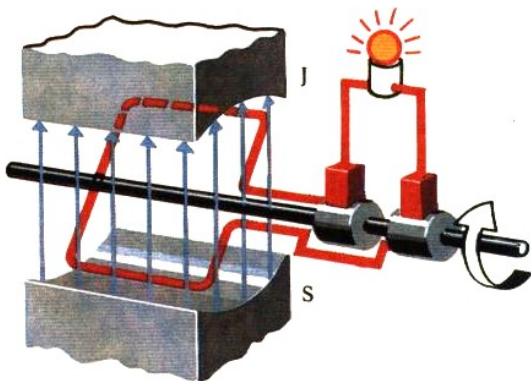


Obr.4.14. Funkce bimetalu v žehliče.

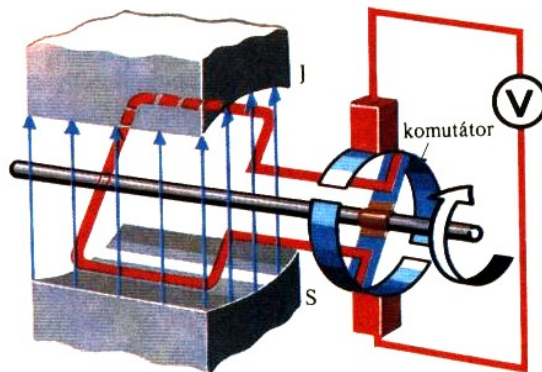
Na jevu elektromagnetické indukce je založena činnost *elektrických strojů točivých*. Fyzikálním základem činnosti *alternátorů a dynam* je Faradayův zákon elektromagnetické indukce

$$\mathcal{E}_i = - (d\Phi/dt)$$

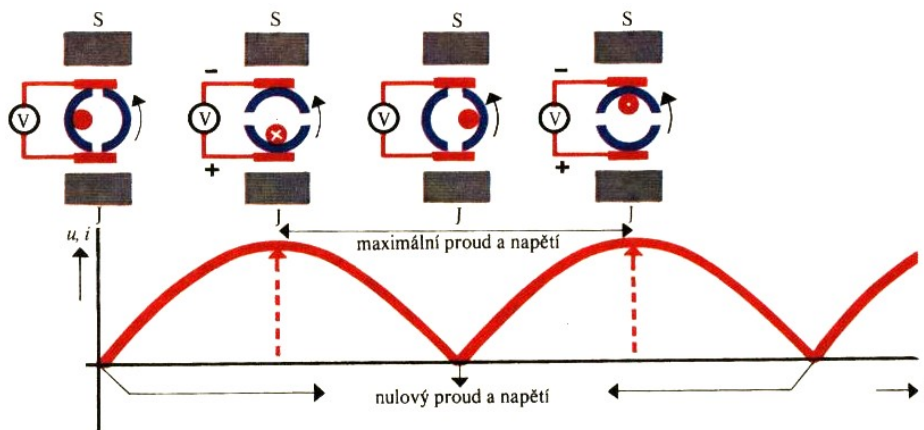
( $\mathcal{E}_i$  je indukované elektromotorické napětí,  $\Phi$  je magnetický tok  $\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}$ ,  $\mathbf{B}$  je indukce magnetického pole a  $\mathbf{S}$  je orientovaný vektor plochy).



Obr.4.15. Alternátor



Obr.4.16. Dynamo.

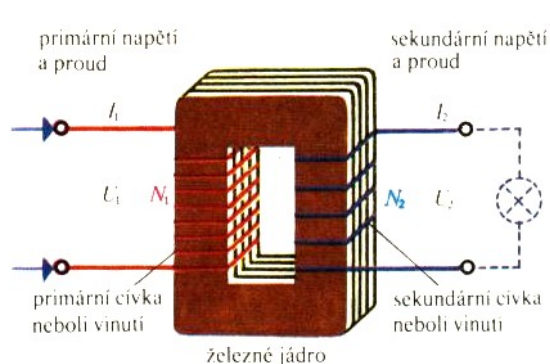


Obr.4.17. Funkce komutátoru dynamu.

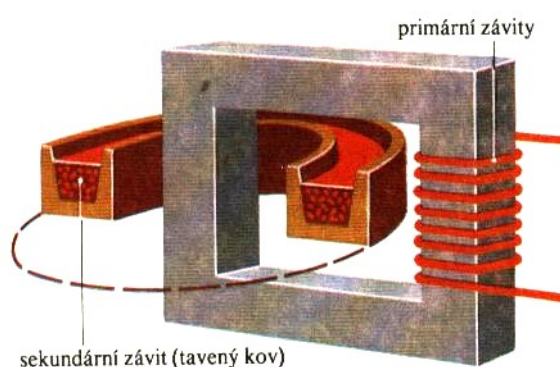
Indukované elektromotorické napětí lze tedy získat tak, že měníme magnetickou indukci, nebo plochu  $S$ , nebo obojí. Na Obr.4.15. je uvedeno schéma alternátoru (zdroj střídavého proudu) a na Obr.4.16. schéma dynama (zdroj stejnosměrného proudu). V obou případech je magnetická indukce  $B$  konstantní a mění se průmět plochy  $S$  do směru  $B$ . Schéma funkce komutátoru dynama je uvedeno na Obr.4.17.

Naopak změny magnetické indukce  $B$  při konstantní ploše  $S$  se využívá v **transformátorech**, tj. zařízeních, umožňujících změnu proudu nebo napětí střídavého proudu. Schéma transformátoru je uvedeno na Obr.4.18.. Napětí a počet závitů v primárním (1) a sekundárním (2) vinutí je dáno vztahem

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

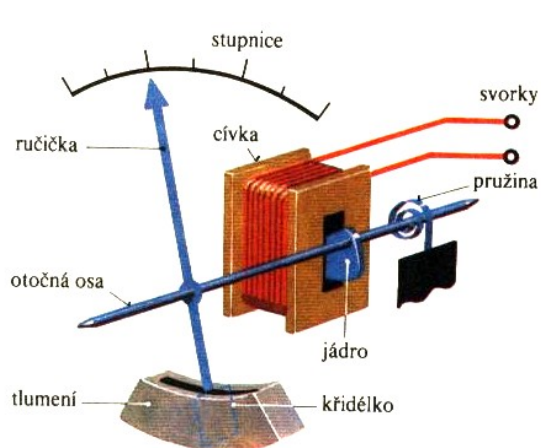


Obr.4.18. Transformátor.

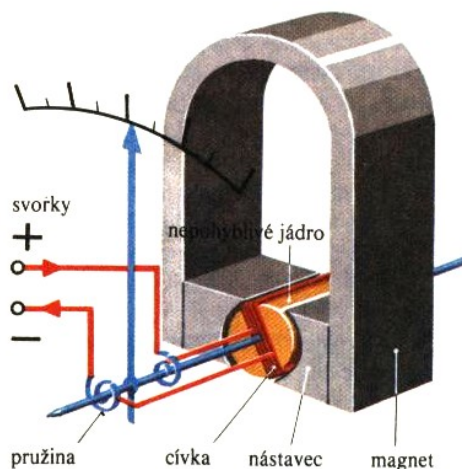


Obr.4.19. Indukční pec.

Zvláštním druhem „transformátoru“ je tzv. **indukční pec** (Obr.4.19.), která se využívá k tavení kovů. Primární vinutí pece se nijak neliší od jiných transformátorů. Sekundární vinutí je tvořeno jediným závitem taveného kovu, umístěného v kruhovém žlabu. Se snížením počtu závitů dojde k poklesu indukovaného napětí a zároveň k růstu intenzity proudu (výkon v obou vinutích transformátoru je stejný). Napětí ve žlabu je nízké (desítky V), ale proud dosahuje hodnot řádu  $10^5$  A. Taková intenzita proudu již roztaví i těžkotavitelné kovy.



Obr.4.20. Elektromagnetický měřicí přístroj.



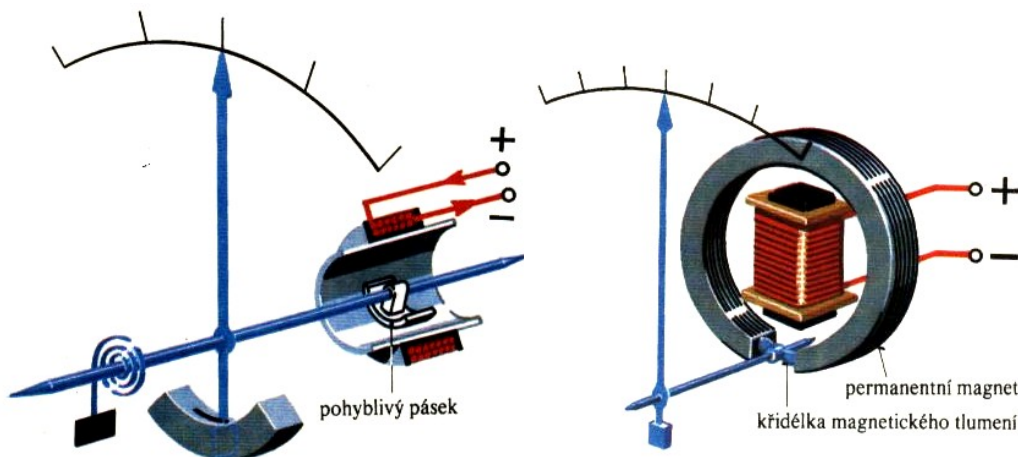
Obr.4.21. Deprézský měřicí přístroj.

Elektromagnetická indukce je rovněž základem většiny měřících přístrojů (měření proudu a napětí).

**Elektromagnetický měřící přístroj** pracuje tak, že čím větší proud prochází cívkou, tím více je do ní vtahováno jádro z měkké oceli (Obr.4.20.) a výsledek je převáděn na stupnici přístroje.

**Magnetoelektrický (Deprézský) přístroj** představuje ve své podstatě malý elektromotorek (Obr.4.21.). Magnetické pole permanentního magnetu působí na vodič, jímž prochází proud. Tím se vytváří kolem cívky magnetické pole a cívka se snaží natočit tak, aby indukční čáry jejího pole byly souhlasně rovnoběžné s indukčními čarami permanentního magnetu. Čím větší proud protéká cívkou, tím větší silou cívka překonává odpor pružinek a ručička ukáže příslušnou velikost proudu na stupnici přístroje. Tyto přístroje patří mezi nejdokonalější přístroje k měření stejnosměrného proudu (střídavý proud musíme usměrnit) a umožňují měřit proudy od  $10^{-6}$  A.

Jiná varianta elektromagnetického měřícího přístroje je uvedena na Obr.4.22.. V dutině kruhové cívky se nacházejí dva pásy z magneticky měkké oceli, které se při průchodu proudu souhlasně zmagnetují a odpuzují silou, odpovídající velikosti magnetizačního proudu. Jiná konstrukce tohoto přístroje je znázorněna na Obr.4.23. Zde je otočná kotva udržována na příslušné výchylce místo pružinky magnetickým polem permanentního magnetu (přístroj je proto odolný proti otřesům).



Obr.4.22. Elektromagnetický měřící přístroj.

4.23. Jiná varianta elektromagnetického přístroje.

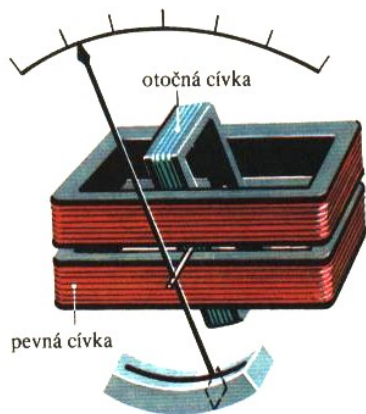
**Elektrodynamické přístroje** se skládají ze dvou cívek, navzájem zkřížených (Obr.4.24.). V tomto případě na sebe navzájem působí dvě magnetická pole obou cívek (opět se snaží zaujmout souhlasně rovnoběžnou orientaci).

#### 4.5. Využití elektrolýzy.

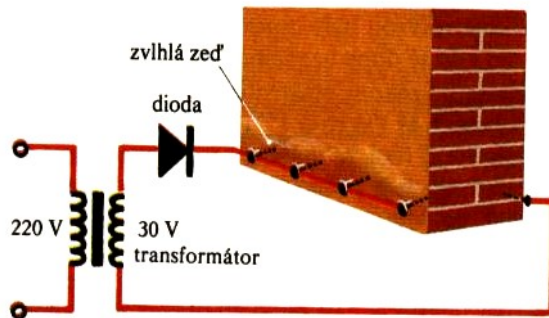
Některé z možností využití elektrolýzy v praxi byly uvedeny v kapitole 1. Zmíníme se ještě o některých dalších.

**Vysoušení zdi.** Stavební materiál, jakým jsou např. cihly a tvárnice, obsahuje velmi tenké kapiláry, kterými může vzlínat vzhůru od základů voda a zdi tak mohou být mokré do poměrně značné výšky. Vztlínání vody můžeme značně omezit pomocí elektrolýzy. Ve vodě jsou totiž rozpuštěny různé soli a vytvoříme – li pomocí vnějšího zdroje elektrický obvod (Obr.4.25.), dojde k rozkladu elektrolytu a částičky soli zaplní postupně kapiláry, čímž se omezí další vztlínání vody.

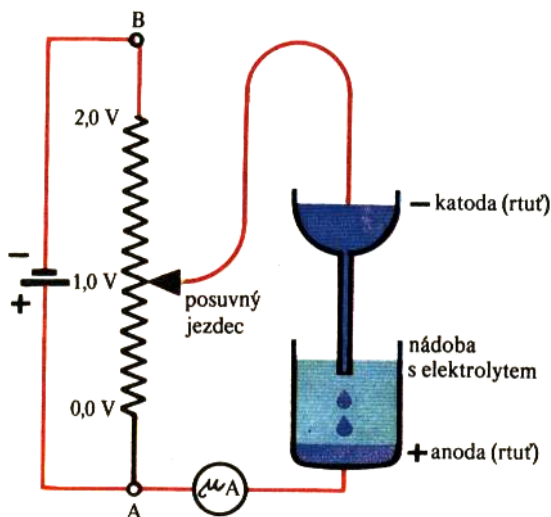




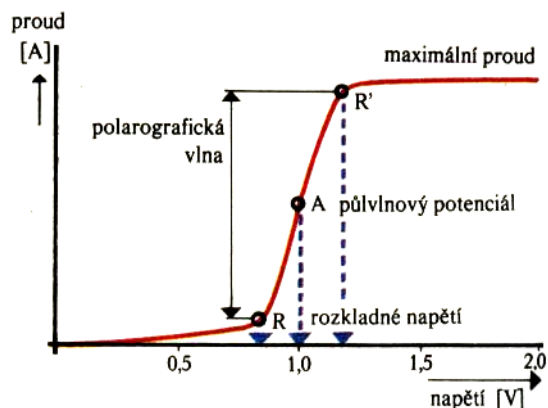
Obr.4.24. Elektrodynamický měřicí přístroj.



Obr.4.25. Vysoušení zdi pomocí elektrolýzy.



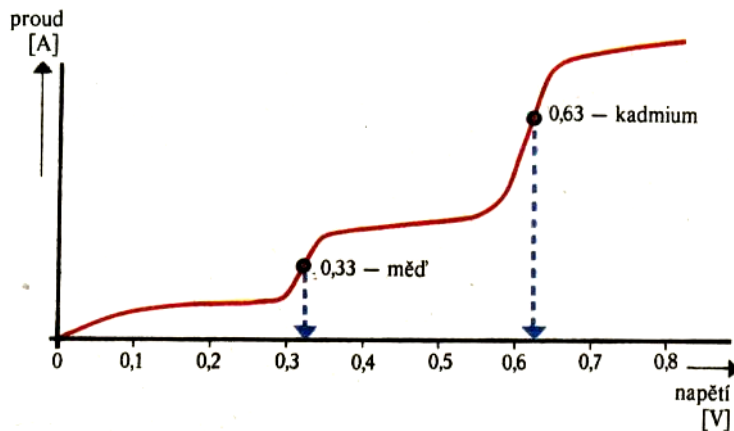
Obr.4.26. Polarograf



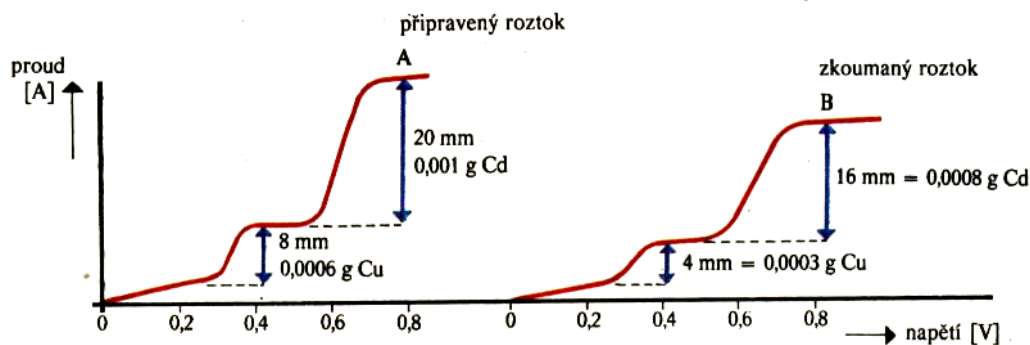
Obr.4.27. Polarografická křivka

**Polarografie.** Polarografie je metoda chemické analýzy a jejím základem je elektrolýza roztoku pomocí přístroje zvaného polarograf (Obr.4.26.). Polarograf se skládá ze zdroje stejnosměrného proudu, z potenciometru a citlivého mikroampérmetru k měření proudu v obvodu, ve kterém je dále ještě elektrolytická nádobka. V nádobce má funkci katody rtuť, odkapávající ze skleněné kapiláry, anodou je rtuť na dně nádobky. Tzv. kapková elektroda se užívá proto, aby její povrch byl stále čistý a bez usazenin (kationtů). Zvyšujeme – li pomocí potenciometru napětí na elektrodách, bude mít voltampérová charakteristika tvar, znázorněný na Obr.4.27. Zde bod R odpovídá tzv. rozkladnému napětí, od kterého začíná proud prudce růst a R' značí hodnotu, od které už proud dále neroste. Takový tvar voltampérové charakteristiky je způsoben tím, že proud není tvořen elektrony, jako je tomu u vodičů I. třídy, ale ionty. K tomu, aby vůbec ionty předaly nebo převzaly elektron na elektrodách, musí na nich být rozdíl potenciálů, rovný rozkladnému napětí ( R ). Při vyšším napětí se ionty nestačí k elektrodám rychleji pohybovat (hodnota R ). Část křivky R – R' je tzv. polarografická vlna a bod A se nazývá půlvlnový potenciál. Experimentálně bylo zjištěno, že různé prvky, nebo skupiny prvků mají různý půlvlnový potenciál (např. Zn má

1,02 V, Cd má 0,63 V,  $\text{Fe}^{++}$  má 1,32 V, apod.) (Obr.4.28). Polarografická metoda umožňuje nejen kvalitativní (4.28a), ale i kvantitativní (4.28b) chemickou analýzu.



Obr.4.28 a) Kvalitativní polarografie



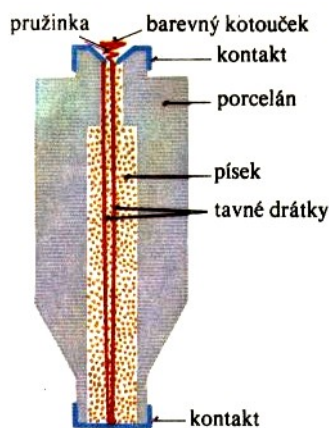
Obr.4.28b) Kvantitativní polarografie.

#### 4.6. Pojistky a jističe.

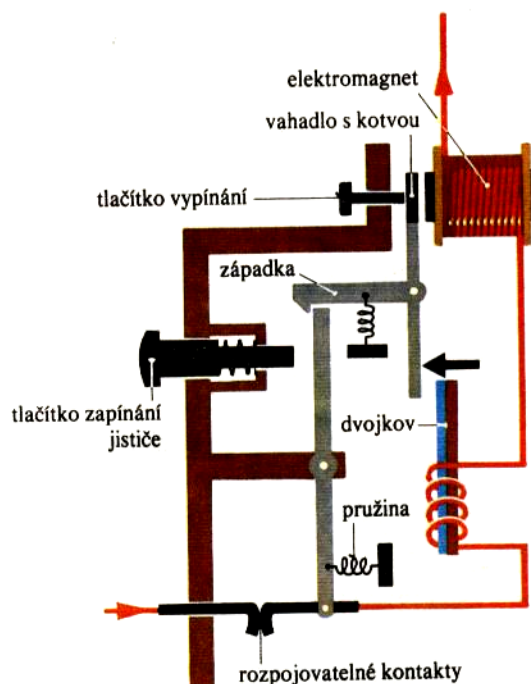
Tyto prvky slouží k ochraně elektrického obvodu před přetížením

**Tavné pojistky.** Tyto pojistky již pomalu mizí z vybavení domácností, laboratoří a výrobních provozoven. Tato pojistka se skládá z keramického obalu, tavného drátku a písku. Průměr drátku je takový, že při překročení povolené hodnoty proudu dojde k roztavení nejslabší části obvodu – tavného drátku (Obr.4.29.)

Modernějším zařízením, chránícím obvod před zkratem je **jistič**. Jeho schéma je uvedeno na Obr.4.30. a funguje následovně: vznikne – li v elektrickém obvodu zkrat, uvede zkratový proud do činnosti relé, jehož jádro přitáhne kotvu, západka se uvolní, pružina rozpojí kontakty a proudový obvod se přeruší. Takto zkonstruovaný jistič chrání obvod i před průchodem proudu nadměrné velikosti (ale nižšího, než je proud zkratový). Takový proud by mohl způsobit poškození některých prvků, nebo vodičů. Prochází – li tedy obvodem vysoký proud po delší dobu, začne se bimetal postupně ohřívat a prohne se tak, že nadzvedne kotvu, západka se opět uvolní, pružina rozpojí kontakty a obvod se přeruší. Z toho hlediska je jistič dokonalejším prvkem, než je tavná pojistka.



Obr.4.29. Tavná pojistka.



Obr.4.30. Jistič.

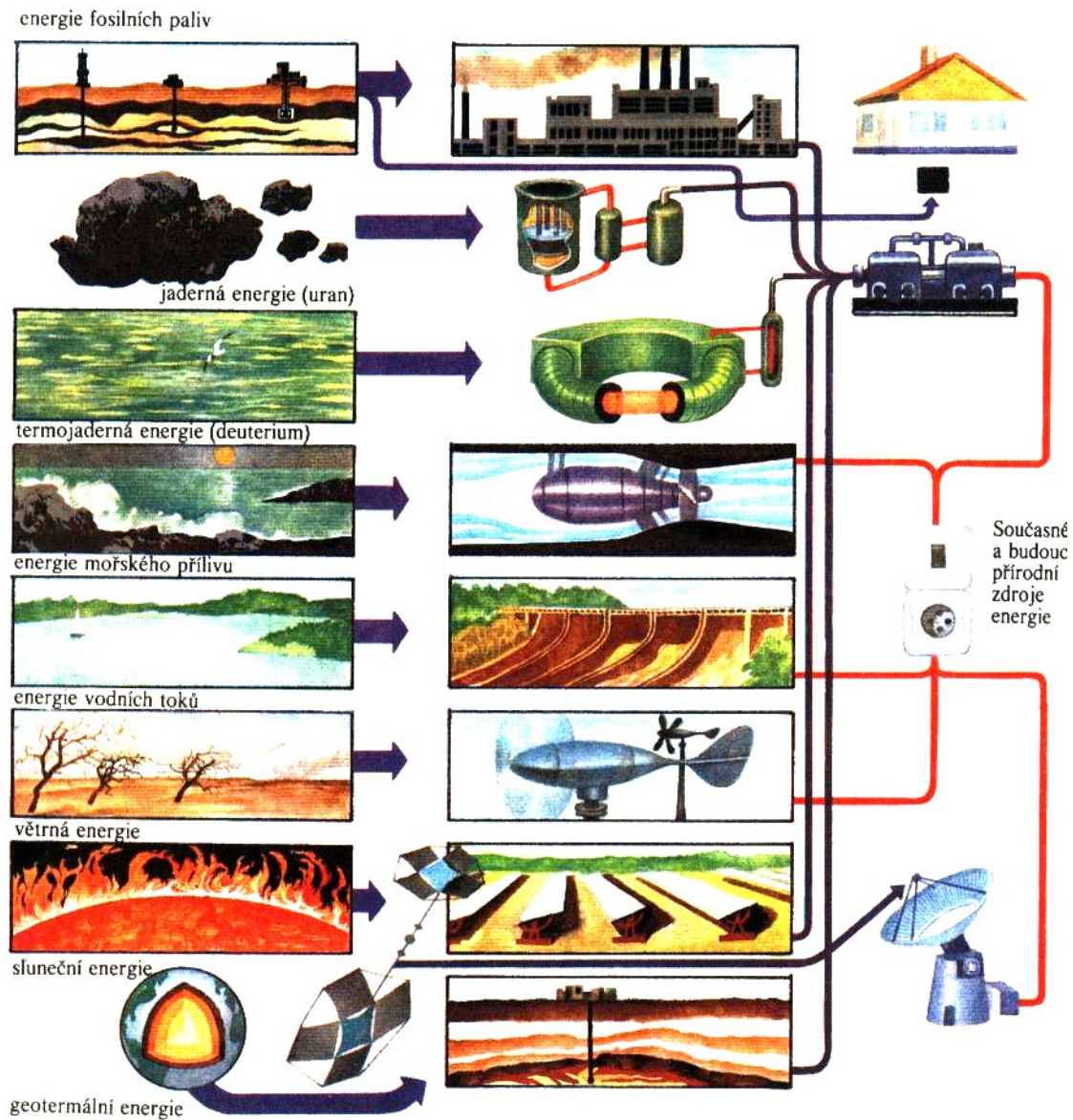
#### 4.7. Výroba elektrické energie.

Elektrická energie je nejušlechtlejším zdrojem energie, neboť se dá přeměnit prakticky na každý z ostatních druhů energie (snad kromě energie jaderné). Proto je výzkumu zdrojů elektrické energie věnována značná pozornost. Elektrická energie je vyráběna z mechanické energie (vodní a větrné elektrárny), z energie jaderné (jaderné elektrárny), z energie chemické (spalováním různých druhů paliv), atd. Nemůžeme se věnovat dále všem zdrojům elektrické energie, ale uvedeme pouze ty méně známé, či perspektivní. Přesto na Obr.4.31 uvádíme grafický přehled hlavních způsobů získávání energie.

**Palivové články.** V palivových člancích se mění energie chemická přímo na energii elektrickou, aniž bychom museli palivo spalovat klasickým způsobem. Jeden z nejjednodušších palivových článků se skládá ze dvou elektrod, zhotovených z pórovitého materiálu, mezi nimiž je elektrolyt (Obr.4.32.). K vnějším stěnám elektrod je pod tlakem přiváděn plynný vodík a kyslík. V pórech kyslíkové elektrody vznikají reakcí kyslíku a vody anionty  $\text{OH}^-$ , které přecházejí do elektrolytu. V pórech vodíkové elektrody jsou molekuly vodíku ionizovány na kationty  $\text{H}^+$ , které také přecházejí do elektrolytu a reagují s anionty  $\text{OH}^-$  za vzniku vody. Tím se na vodíkové elektrodě vytváří přebytek volných elektronů, a jestliže obě elektrody vodivě spojíme, budou se elektrony pohybovat ke kyslíkové elektrodě a obvodem bude protékat elektrický proud.

V současné době vědci, zabývající se zdroji energie soudí, že v blízké budoucnosti by se mohly palivové články stát slibným zdrojem energie a to zejména pro mobilní účely (elektromobily, lodě a snad i letadla). Potřebný vodík by byl získáván elektrolyzou vody v místech, kde je přebytek energie (energie z větrných elektráren, solárních článků, jaderné energie a podaří – li se to, i z jaderné fúze). Vodík by se tak stal „krví“ moderní civilizace a nahradil by tak ropu, jejíž zdroje již začínají slábnout. Celý projektovaný systém využití

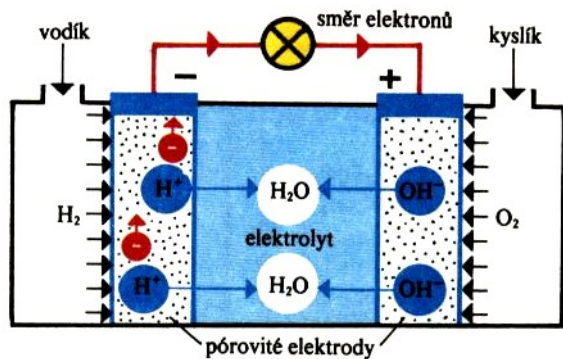
vodíku v technice se pak nazývá „vodíkové hospodářství“. Nyní existuje asi 20 druhů palivových článků, jejichž pracovní médium je různé (methylalkohol, zemní plyn, ropa, apod.). Všechny však pracují tak, že toto médium nakonec přemění na čistý vodík.



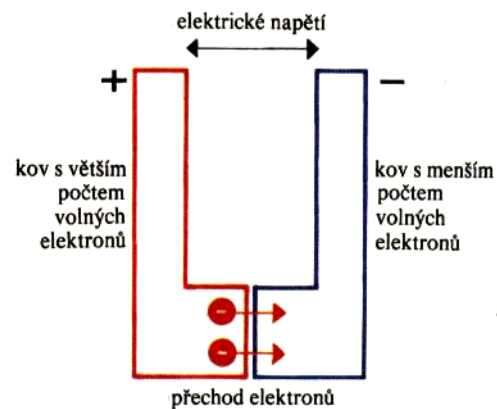
Obr.4.31. Hlavní způsoby získávání energie.

**Termoelektrické články.** Přestože slovní spojení „termoelektrický článek“ je velmi podobné spojení „palivový článek“, jedná se poněkud jiný systém. Jak je totiž známo, každý kov se skládá zhruba řečeno z kladných iontů a volných záporných elektronů, které váží k sobě kladné ionty (tzv. kovová vazba). Kovy jako celek jsou elektroneutrální, ale některé kovy mají vyšší koncentraci volných elektronů, než kovy jiné. Již několikrát (zejména v souvislosti s objasněním PN přechodu v polovodičích) jsme uvedli, že koncentrační spád je hybnou silou difúze. Proto spojíme – li (například svařením) dva kovy s odlišnými koncentracemi elektronů, dojde k difúzi elektronů z oblasti s vyšší koncentrací (kov A) do oblasti s koncentrací nižší (kov B).- Obr. 4.33. Tím se kov A nabije kladně a kov B záporně (ovšem pouze v oblasti velmi blízké rozhraní mezi oběma kovy). Vzniklý rozdíl potenciálů se

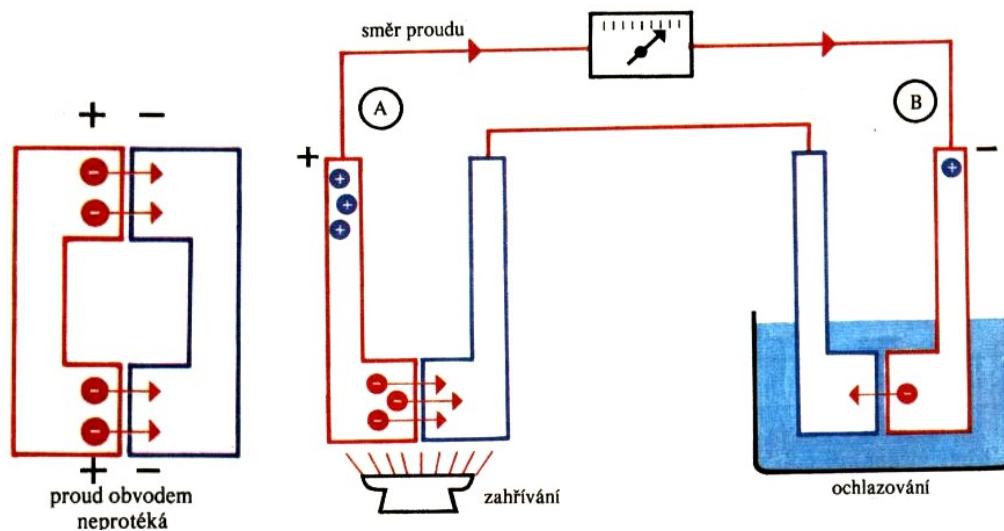
ale velmi rychle ustálí, neboť vzniklé elektrické pole brání přechodu dalších elektronů z A do B a ustaví se tzv. dynamická rovnováha. Rozdíl potenciálů však nelze chápat jako zdroj elektrického proudu, neboť k tomu, aby protékal proud, je třeba uzavřít obvod a v místě uzavření vznikne opačný rozdíl potenciálů, takže k průchodu proudu nedojde (Obr.4.34a.). Druhým faktorem, ovlivňujícím difúzi, je teplotní rozdíl. Zahřejeme – li jeden spoj a druhý budeme ochlazovat, bude difúze v horkém spoji mohutnější a vznikne termočlánek, tj. zdroj elektrické energie (bude protékat termoelektrický proud – Obr.4.34b.). Termočlánek se užívá převážně jako teplotní čidlo, ale není vyloučeno ani použití termočláneků, spojených do baterií jako zdrojů elektrického proudu a to zejména tam, kde je obtížné použít jiný zdroj energie. Tak například existují izotopové termoelektrické baterie, v nichž se využívá teplo, vzniklé rozpadem radioaktivních látek (využití v kosmických sondách, podmořských navigačních zařízeních, kardiostimulátorech, atd.). Některé speciální baterie, obsahující radioaktivní stroncium, mají napětí 24 V a výkon 12 W po dobu 5 let.



Obr.4.32. Princip palivového článku.



Obr.4.33. Princip termočláunku.

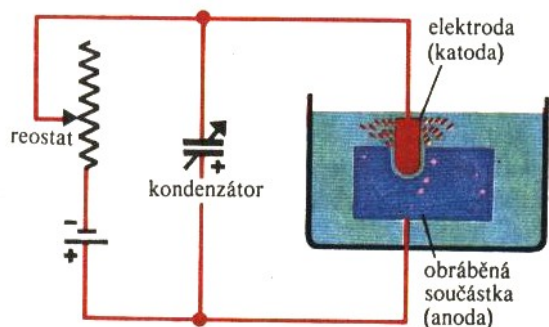


Obr. 4.34 a) Spoje termočláunku na téže teplotě, b) na různé teplotě.

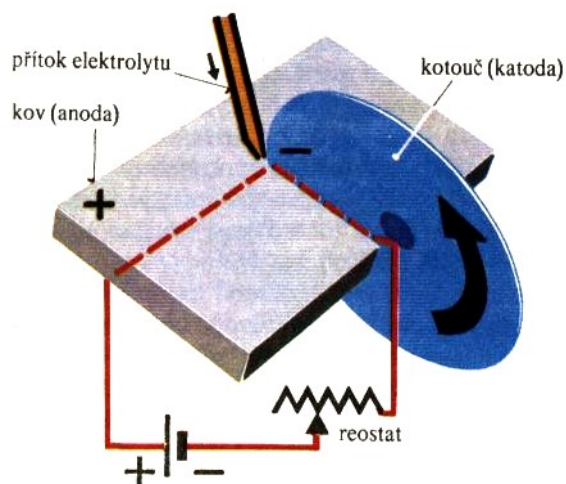
#### 4.8. Výboje v plynech.

**Využití jiskrového výboje.** Výboje v plynech mají značné využití a o některých zajímavých přístrojích jsme se již zmínili v kapitole 2. Zde se zmíníme o **elektrojiskrovém obrábění** (Obr.4.35.). Tento způsob obrábění se užívá v případě obrábění velmi tvrdých kovů.

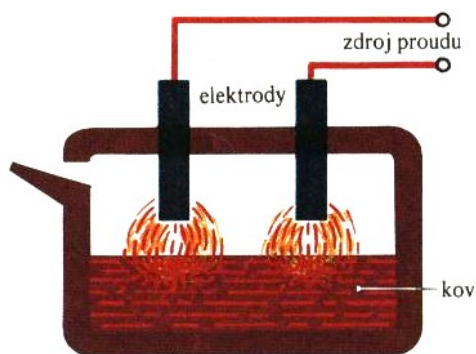
Takový kov spojíme s kladným pólem stejnosměrné baterie. Zapojíme – li proud, regulovaný reostatem, začne se kondensátor nabíjet a při jisté hodnotě napětí přeskočí jiskra, která způsobí zahřátí obráběné součástky na teplotu vyšší, než je bod tání kovu. Tak se v místě uzavření jiskry vytvoří malý kráter, část kovu se odpaří a část roztaveného kovu odpadne do chladicí kapaliny. Tento proces se velice rychle opakuje a tak můžeme součástku opracovat (vrtat otvory). Na podobném principu funguje jiskrové řezání kovů (Obr.4.36.). I zde využíváme účinků elektrické jiskry na kov a navíc mechanického účinku otáčejícího se ocelového kotouče, jehož tvrdost nemusí být větší, než tvrdost řezaného materiálu. V tomto případě nepoužíváme k vytváření jiskry kondenzátoru, ale účinků elektrického proudu na elektrolyty. Vyplňujeme – li totiž prostor mezi katodou a anodou (kotoučem a součástkou) stále přitékajícím elektrolytem, vyloučí se na anodě pevná izolační látka a tím se proudový okruh přeruší. Přibližujeme – li otáčející se kotouč k řezané součástce, poruší se izolační vrstvička a od katody k anodě (od kotouče k součástce) přeskočí jiskra, která má stejné důsledky jako jiskra v případě elektrojiskrového obrábění. V mezeře dojde opět k rozkladu elektrolytu, k vytvoření ochranné izolační vrstvičky, k jejímu novému narušení, ke vzniku jiskry, což se stále opakuje.



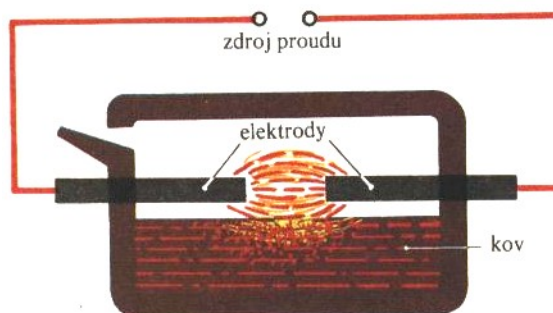
Obr.4.35. Elektrojiskrové obrábění kovů.



Obr.4.36. Elektrojiskrové řezání kovů.

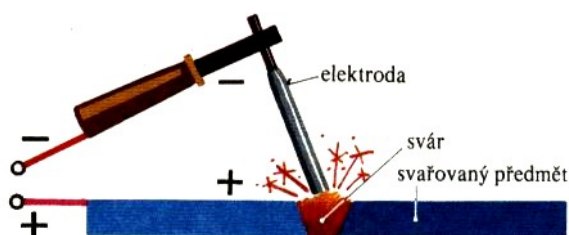


Obr.4.37. Oblouková pec s přímým ohřevem.

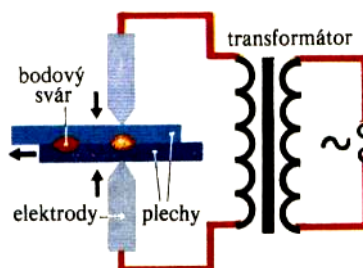


Obr.4.38. Oblouková pec s nepřímým ohřevem.

**Obloukového výboje** se užívá v obloukových pecích s přímým ohřevem (Obr.4.37.). Takto se taví některé obtížně tavitelné kovy a některé druhy ocelí. Dochází však přitom k poměrně značným ztrátám kovu (odpařování), případně k nežádoucímu znečištění kovu uhlíkem. K tavení některých drahých kovů se používá obloukových pecí s nepřímým ohřevem (Obr.4.38.). V těchto pecích se využívá sálavého tepla oblouku mezi dvěma uhlíkovými elektrodami, umístěnými poblíž povrchu kovu. Ztráty kovu jsou v tomto případě malé, ale zato spotřeba elektrického proudu je vyšší. Těchto pecí se též používá při vypalování keramických výrobků, při vypalování smaltů, apod. Asi 90 % všech elektrických pecí, používaných v průmyslu, jsou pece obloukové.

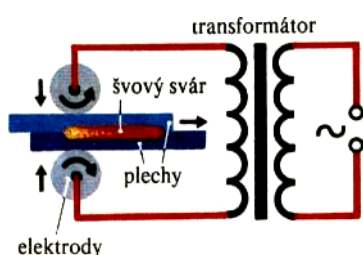


Obr.4.39a) Svařování obloukové

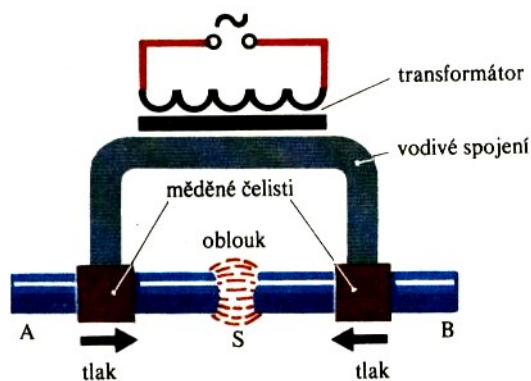


Obr.4.39 b) Bodové svařování

Tradiční je využití elektrického oblouku při **svařování**. Klasický způsob svařování je svařování obloukové (Obr.4.39a), bodové (4.39b), případně švové (4.40).



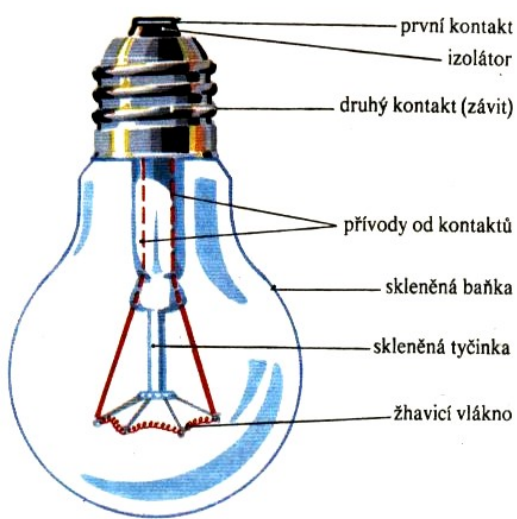
Obr.4.40. Svařování švové.



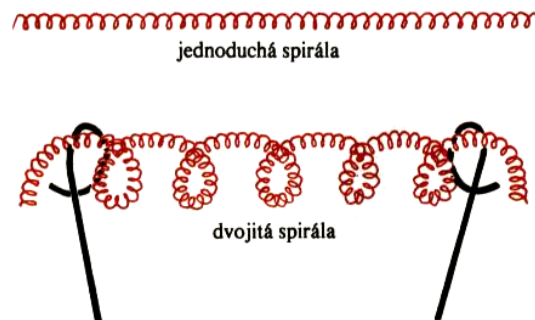
Obr.4.41. Svařování na tupo.

K odporovému svařování větších dílů se používá tzv. **svařování na tupo**. (Obr.4.41.). Chceme – li spojit např. dvě ocelové tyče A a B v bodě S, upneme je do měděných čelistí, které jsou vodivě spojeny silnými měděnými vodiči. Čelisti je možné navzájem proti sobě posouvat a regulovat tlak, kterým na sebe navzájem působí. Z obrázku vidíme, že měděné čelisti spolu s částmi tyčí tvoří jediný sekundární závit transformátoru. V tomto závitu vznikne sice jenom malé napětí ( $\sim 10$  V), ale velký proud (až  $10^5$  A). Tyče se přitlačí k sobě nejdříve pouze malým tlakem, takže protékající proud rozžhaví konce tyčí. Ty pak od sebe mírně oddálíme, takže mezi nimi vznikne elektrický oblouk a tyče se začnou tavit. Poté tyče k sobě stlačíme velkým tlakem, snížíme proud a ukončíme svařování. Odporové svařování je několikanásobně výkonnější, než svařování plamenem, nebo elektrickým obloukem.

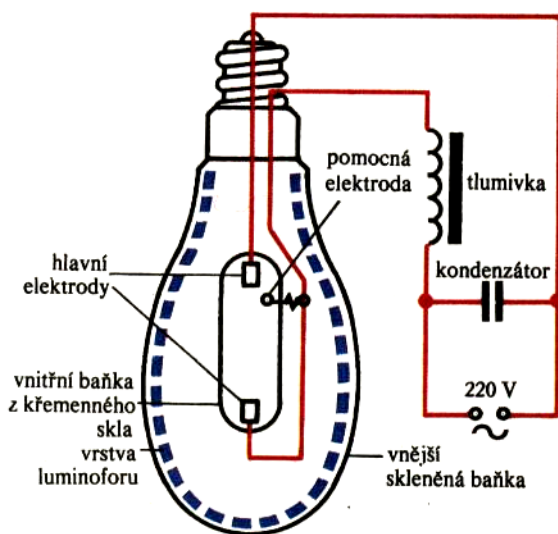
Přestože klasická **žárovka** (Obr.4.42.) již začíná pomalu mizet do sbírek technických muzeí, zmíníme se o ní krátce, neboť hrála v minulosti významnou roli v rozvoji lidské civilizace (je zařazena mezi 10 největších vynálezů lidstva). Nejdůležitější částí žárovky je žhavicí vlákno (Obr.4.43.), které je zhotoveno z velmi tenkého wolframového drátku (průměr drátku je 0,02 mm, tj. asi polovina průměru lidského vlasu). Tak malý průměr vlákna je důvodem pro to, aby vlákno mělo velký ohmický odpor (při pokojové teplotě činí cca 800 Ω). Vlákno má tvar jednoduché, nebo dvojité spirály, což umožňuje snadnější zahřátí vlákna a tím další růst odporu. Žárovky mají různý výkon (15 W, 25 W, 40 W, 60 W, 75 W, 100 W, atd.). Baňky žárovek jsou vzduchoprázdné, svítící vlákno má teplotu cca 2100 °C. Výkonnější žárovky jsou plněny dusíkem, nebo vzácnými plyny. Životnost žárovek je za běžného provozu asi 1000 hodin, v exponovaných podmínkách (časté zapínání a vypínání, otřesy) může klesnout na pouhých 100 hodin.



Obr.4.42. Žárovka



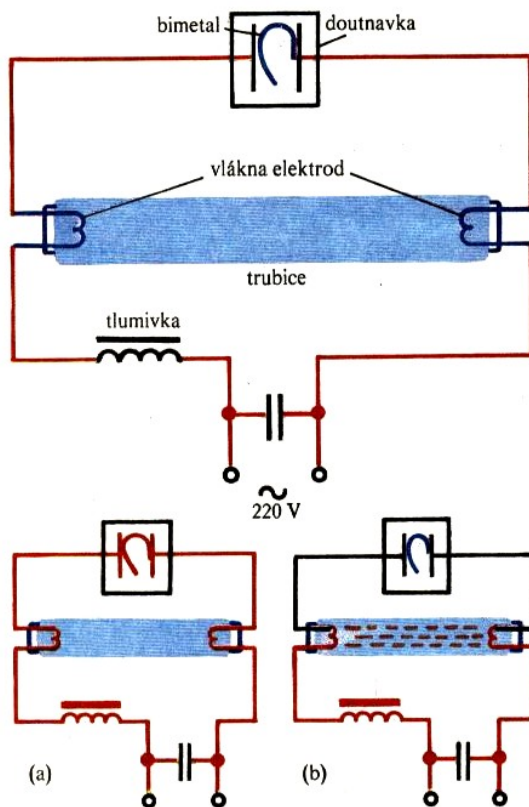
Obr.4.43. Spirála žárovky



Obr.4.44. Rtuťová výbojka.



**Rtuťové a sodíkové výbojky.** Pro osvětlení ulic se používají výbojky, plněné rtuťovými a sodíkovými parami. Tyto výbojky jsou ekonomičtější, než klasické žárovky. Spektrum jejich světla se však liší od denního světla více, než spektrum klasických žárovek. Schéma **rtuťové výbojky** je uvedeno na Obr.4.44. Výbojka se skládá ze dvou baňek. Vnější baňka je skleněná a její stěny jsou pokryty vrstvičkou luminoforu – fluorescenční látky, která po ozáření ultrafialovým světlem vydává světlo viditelné. Vnitřní baňka je vyrobena z křemičitého skla a jsou v ní zataveny dvě hlavní a jedna pomocná elektroda s ohmickým odporem v sérii a je vyplněna argonem s malým množstvím kapalné rtuti. Součástí rtuťové výbojky je i tlumivka, která udržuje v prvních okamžicích po zapojení proudu potřebné napětí na elektrodách. V obvodu je zařazen i kondenzátor, který zlepšuje účinnost obvodu. Po připojení výbojky na střídavé napětí vznikne mezi hlavní a pomocnou elektrodou nejdříve doutnavý výboj ve zředěném argonu, teplem tohoto výboje se kapalná rtuť postupně vypařuje a v určitém okamžiku (za 3 až 5 minut) vznikne mezi hlavními elektrodami doutnavý výboj v parách rtuti. Světlo výboje postrádá červenou barvu spektra a navíc má ultrafialovou složku a není tedy bílé, ale nazelenalé (z toho důvodu je potřebný luminofor na vnější baňce).



Obr.4.45. Zářivka

**Sodíková výbojka** má podobnou konstrukci jako výbojka rtuťová, ale není u ní potřebný luminofor. Vnitřní baňka je naplněna neonem a obsahuje malé množství pevného sodíku. Sodíkové výbojky mají ještě větší účinnost, než výbojky rtuťové a jejich životnost je asi 3000 hodin. Žlutooranžové světlo se liší svým spektrálním složením od světla denního a zkresluje tedy barevnost předmětů. Proniká však dobře mlhou a dýmem a proto se tyto výbojky používají k osvětlování letištních ploch, nádraží a ulic.

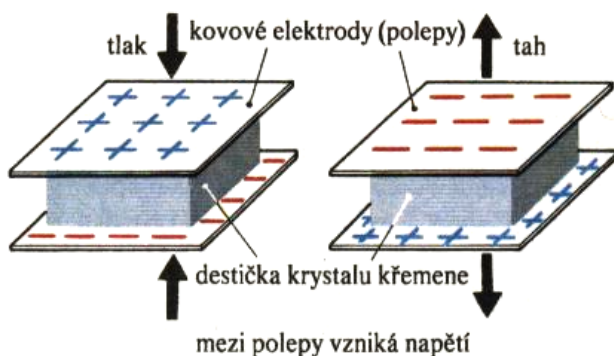
**Zářivka** je v podstatě rtuťová výbojka, jejíž konstrukce je poněkud upravena (Obr.4.45.). Skleněná trubice zářivky je naplněna většinou argonem a rtuťovými parami, vnitřní stěny trubice jsou pokryty luminoforem. Tlumivka a kondenzátor mají stejný účel, jako v případě rtuťové výbojky. Navíc je zde tzv. startér, což je malá doutnavka, jejíž jednu elektrodu tvoří bimetal, který zapíná a vypíná proud, procházející wolframovými vlákny elektrod, umístěných na opačných koncích trubice zářivky.

Připojíme – li zářivku na střídavé napětí 220 V, zářivka se ihned nerozsvítí, neboť její zápalné napětí je asi 400 V. Elektrický výboj vznikne nejdříve v doutnavce startéru, jejíž zápalné napětí je nižší, než 220 V. Uvolněným teplem se spojí kontakty bimetalového spínače, obvodem začne protékat proud, ten rozžhaví vlákna elektrod, termoemisí se z nich uvolní elektrony, které ionizují plyn uvnitř trubice. Současně se ale začne ochlazovat bimetalový spínač, protože při spojených kontaktech výboj doutnavky zanikl. Když se spínač ochladí natolik, že se kontakty rozpojí, vznikne na tlumivce samoindukční napětí, které na okamžik vzroste přibližně na 500 V a takové napětí způsobí elektrický výboj v trubici. Od tohoto okamžiku začne proud procházet jenom mezi elektrodami zářivky, protože tlumivka (odpor) sníží napětí na svorkách elektrod na 110 V a toto napětí stačí udržet výboj v trubici, nestačí však zapálit doutnavku a tím ohřát bimetalový spínač, protože doutnavka je konstruována tak, aby její zapalovací napětí bylo větší, než 170 V.

Z právě popsané činnosti zářivky plyne, že pokud se zářivka nerozsvítí, je zřejmě vadný startér. Pokud se zářivka nerozsvítí a na koncích trubice svítí jen rozžhavené elektrody, znamená to, že se kontakty startéru sice spojily, ale zůstaly spojeny i po vychladnutí a výboj v trubici nemůže vzniknout. V takovém případě je třeba zářivku vypnout, aby se nepřepálila wolframová vlákna a rovněž vyměnit startér.

#### 4.9. Ostatní jevy.

**Piezelektrický jev.** Vyřízneme – li z krystalu křemene destičku a na její protilehlé stěny připevníme kovové elektrody (polepy), pozorujeme, že při stlačování a uvolňování destičky vznikají na polepech elektrické náboje (Obr.4.46.). Tento tzv. piezelektrický jev se v minulosti hojně využíval při konstrukci gramofonové přenosky, stále se využívá při konstrukci krystalového mikrofону, piezelektrického zapalovače plynu a zejména při konstrukci generátorů ultrazvukových kmitů (lze tak vytvořit kmity o frekvenci až  $10^6$  Hz). Rovněž různá tlaková čidla a čidla, měřící mechanické napětí např. na povrchu namáhaných součástí jsou vyrobena z piezelektrických krystalů.

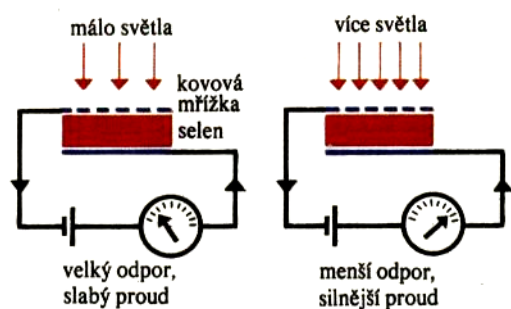


Obr.4.46. Piezelektrický jev.

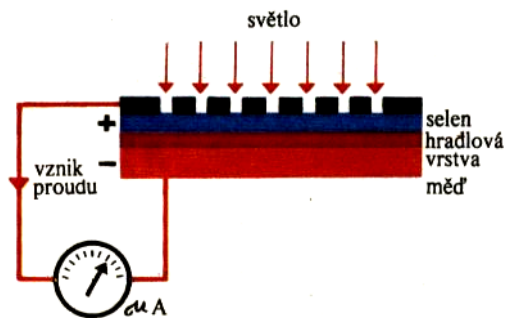
**Fotoefekt.** Osvětíme – li některé látky, pak tyto buď mění elektrický odpor, nebo ze svého povrchu uvolňují elektrony. (podstata fotoefektu). Dopadá – li světelné záření např. na

selen, tak se z valenčních orbitů jeho atomů uvolní elektrony, které však nejsou emitovány z povrchu selenu, ale zůstanou uvnitř (tzv. vnitřní fotoefekt). Výsledkem je pokles elektrického odporu selenu s rostoucí intenzitou osvětlení (Obr.4.47). Elektronické prvky, které využívají tohoto jevu se nazývají fotoelektrické odpory (pokles odporu může činit až 3 řády).

Jiný fotoelektrický jev pozorujeme u zařízení, které se nazývá **fotočlánek** (někdy též **hradlový článek**). Na Obr.4.48. je uvedeno schéma jednoho z prvních fotočláneků, fotočláneku selenového. Na základní měděné destičce je nanášena tenká vrstvička látky, citlivé na světlo (selen) a na ní je nanášena velmi tenká, polopropustná vrstvička zlata, nebo platiny.

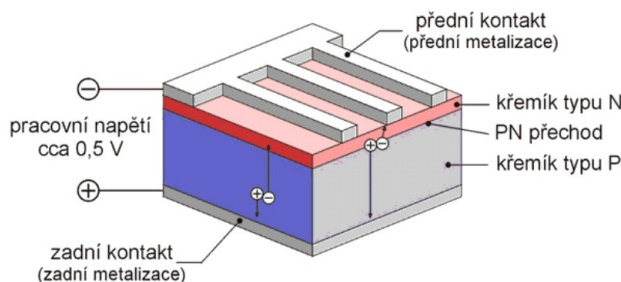


Obr.4.47. Vnitřní fotoefekt



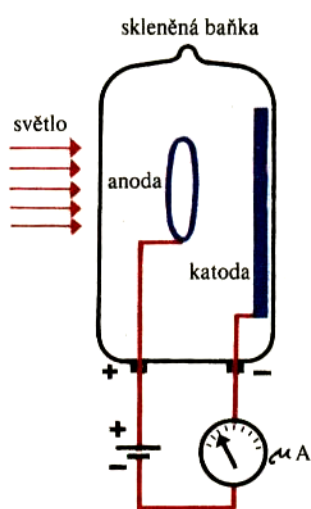
Obr.4.48. Hradlový článek.

Dopadne – li světlo na vrstvičku selenu, vzniknou v něm volné elektrony. Mezi selenem a mědí se vytvoří tzv. hradlová vrstva (obdoba PN přechodu v polovodičích), v níž dochází k přechodu volných elektronů do mědi. Tím se měď nabije záporně, mezi mědí a kovovou mřížkou vznikne elektrické napětí a při vodivém spojení začne obvodem protékat elektrický proud (poměrně slabý). Nástupcem hradlového článku je v současné době intenzivně zkoumaný **fotovoltaický článek**. Ten může být v blízké budoucnosti velmi slibným zdrojem elektrické energie pro lidstvo. V současné době se více jak 85 % všech fotovoltaických článků vyrábí technologií tlustých vrstev, tj. jako velkoplošné PN diody. Jejich výroba je dosti náročná a nákladná a proto jsou intenzivně hledány jiné levnější technologické postupy (technologie tenkých vrstev a různé nekeramické technologie). Princip činnosti fotovoltaického článku je velmi podobný principu článku hradlového, pouze místo slovního spojení „hradlová vrstva“ použijeme „PN přechod“ (Obr 4.49a.). V posledních několika letech vzniklo i v ČR velké množství solárních elektráren (zejména díky státním dotacím na proud z nich získaný – Obr.4.49b.)

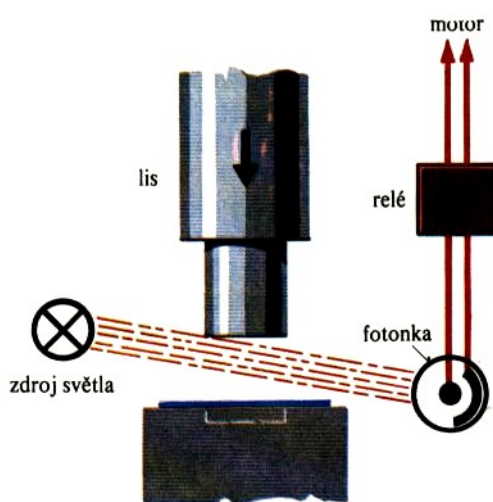


Obr.4.49 a) Princip činnosti fotoelektrického článku. b) Fotoelektrický článek v praxi.

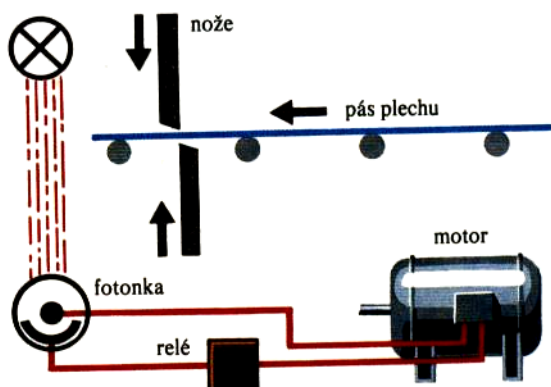
Dopadá –li světlo na povrch alkalických kovů (cesium, draslík, sodík, atd.), pak tyto látky emitují ze svého povrchu volné elektrony (na rozdíl od vnitřního fotoelektrického jevu, kdy zůstaly uvnitř látky). Situace je znázorněna na Obr.4.50 a funkce tzv. **fotonky** je z tohoto obrázku zřejmá. Využití fotonky je názorně vidět z Obr.4.51 – ochrana před pracovním úrazem. Má – li pracovník ruku v pracovním prostoru lisu, je proud světla přerušen a spínací zařízení lisu je vypnuto. Jiný příklad využití fotonky je uvedeno na Obr.4.52 –automatické stříhání plechů. Světlo dopadá ze zdroje na fotonku, která je zapojena v obvodu, ovládajícím pohyb stříhacích nožů. V situaci na obrázku jsou nože oddáleny. Jestliže pás pohyblivého se plechu přeruší světelný tok, fotorelé pohyb válců na okamžik zastaví, současně se zapojí motor, ovládající nože, nože plech přestříhnou a celý děj se znovu opakuje. Podobně fungují zařízení na udržování hladiny ve sklářské peci, k zapínání a vypínání pouličního osvětlení při soumraku a svítání, k automatickému otvírání a zavírání dveří při vstupu lidí do různých budov či výtahů.



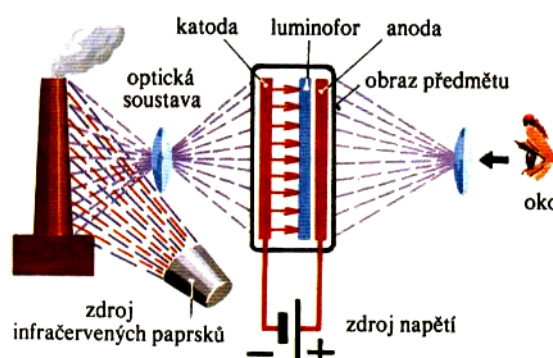
Obr.4.50. Schéma fotonky.



4.51. Jedno z možných využití fotonky v praxi.



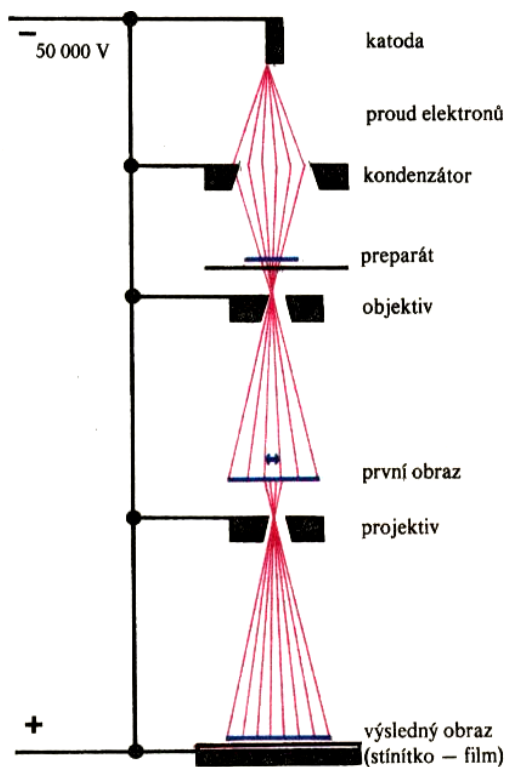
Obr.4.52. Využití fotonky při automatickém stříhání plechů.



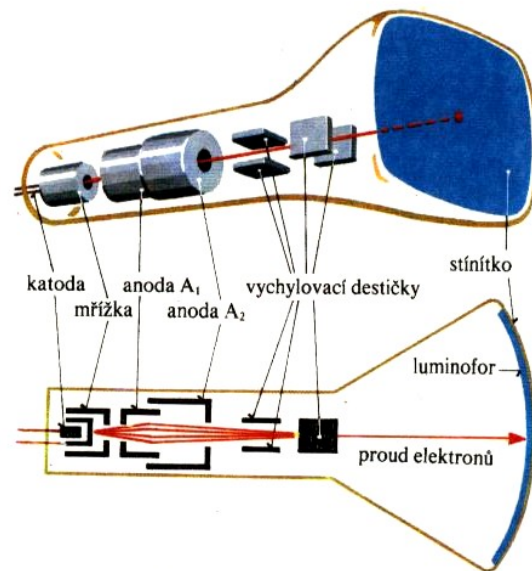
Obr.4.53. Přeměna infračerveného záření na viditelné světlo.

K fotoemisi elektronů ve fotonce dochází i při ozáření infračervenými paprsky. Na tom je založen přístroj, umožňující „vidět“ infračervené záření. Schéma takového přístroje je uvedeno na Obr.4.53.. Fotonku na tomto obrázku tvoří baňka ve tvaru dutého válce, katodu tvoří fotocitlivá vrstvička, na průsvitné anodě je nanesena vrstvička luminoforu. K elektrodám je připojen zdroj stejnosměrného napětí. Infračervené záření, odražené od předmětu (nebo jím přímo vydávané) dopadá na katodu, ze které účinkem vnějšího fotoefektu vylétují elektrony. Z míst více osvětlených se uvolňuje více elektronů, z míst méně ozářených méně elektronů. Účinkem elektrického pole mezi elektrodami se uvolněné elektrony urychlí, dopadají na anodu a na různých místech se luminofor rozzáří úměrně množství dopadajících elektronů (vytvoří se tak obraz předmětu).

Převratným vynálezem, který posunul naše znalosti téměř ve všech vědních oblastech o notný kus kupředu, byl a je **elektronový mikroskop**. V něm jsou světelné paprsky nahrazeny proudem elektronů, neboť vlnová délka je podle závěrů kvantové mechaniky tím kratší, čím je větší hmotnost částic a jejich rychlost. Proto můžeme pomocí elektronového mikroskopu dosáhnout zvětšení až  $10^6$  krát. Zdrojem proudu elektronů je kovová katoda, která po nažhavení vysílá elektrony. Ty jsou urychlovány elektrickým polem o napětí desítek tisíc voltů. Proud elektronů prochází tzv. elektronovou čočkou, kterou tvoří elektrické pole zvláštního kondenzátoru, nebo magnetické pole cívky. Taková čočka zaručí zvětšení a soustředí elektrony na preparát a postupně vznikne výsledný obraz (Obr.4.54.). Celý systém je uložen v evakuované válcové nádobě.



Obr.4.54. Elektronový mikroskop.

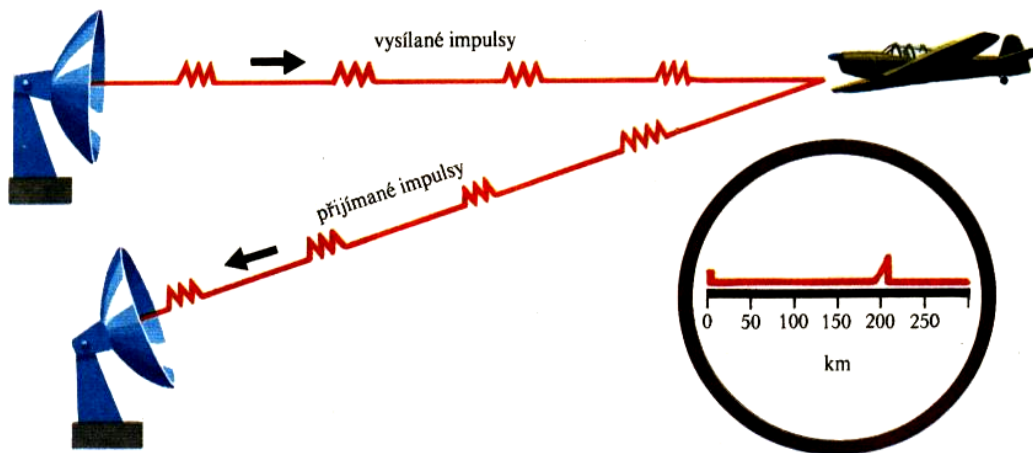


Obr.4.55. Elektrostatická obrazovka.

Dalším významným přístrojem, který znamenal a ještě znamená významný přínos pro vědu i zábavu, je **obrazovka** (Obr.4.55.). Zdrojem elektronů je zde opět žhavená katoda. Elektrony z ní vylétující jsou (poněvadž se v paprsku odpuzují) fokusovány do úzkého svazku pomocí mřížky a anody zvláštního tvaru a nakonec vychylovány ve směru horizontálním i

vertikálním pomocí elektrostatických vychylovacích destiček (elektrostatické vychylování je často nahrazováno magnetickým). Elektrostatické vychylování se používá u osciloskopů a elektromagnetické u běžných obrazovek starších televizorů.

Elektromagnetické vlny se chovají jako světlo, to znamená, že se odrážejí od pevných látek. Na tomto principu byl zkonstruován v 30. letech minulého století přístroj, který znamenal zásadní převrat v leteckých bojích 2. světové války a je stále zdokonalován – *radar*. Princip činnosti radaru je znázorněn na Obr.4.56.. Radar nám umožňuje určit směr, vzdálenost a rychlost předmětu tak, že změříme časový rozdíl, který potřebuje elektromagnetická vlna k tomu, aby překonala vzdálenost od místa vyslání k předmětu a po jejich odražení k návratu zpět.



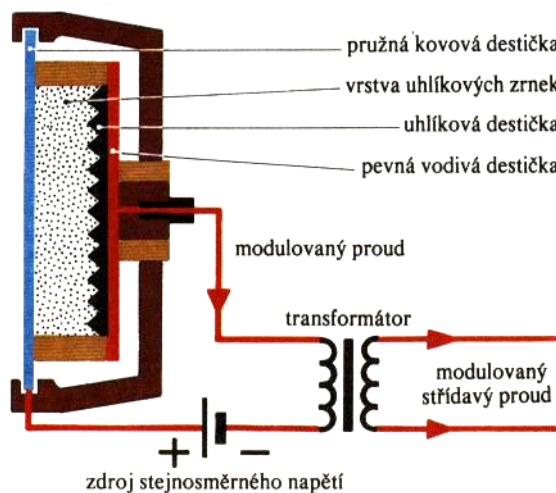
Obr.4.56. Princip činnosti radaru.

**Mikrofon.** Jako první byl zkonstruován mikrofon uhlíkový (Edison) – Obr.4.57. Jeho činnost je následující: zvukové vlny jsou ve své podstatě změny tlaku vzduchu, šířící se podélně od zdroje zvuku. Tyto vlny dopadnou na pružnou membránu mikrofonu a rozechvějí ji v rytmu vysílaného zvuku. Zrnka uhlíku se stlačují ve stejném rytmu jako membrána a ve stejném rytmu se mění i elektrický odpor uhlíkové vrstvy. Změna odporu znamená i změnu napětí v primárním okruhu transformátoru. Tak vznikne v sekundárním obvodu střídavý proud, modulovaný podle dopadajících zvukových vln. Uhlíkové mikrofony jsou velmi citlivé, avšak částečně zkreslují přijímaný zvuk a mají též šum. Proto se používají tam, kde příliš nezáleží na věrnosti přenosu zvuku (telefon). Dokonalejší je *mikrofon elektromagnetický* (Obr.4.58.). Jeho základní součástí je cívka, pohybující se volně v úzké vzduchové mezeře mezi póly permanentního magnetu. Dopadají – li zvukové vlny na membránu, která je spojena pevně s cívkou, membrána se rozkmitá a spolu s ní i cívka, ve které se díky magnetickému poli permanentního magnetu začne indukovat elektrický proud, modulovaný v rytmu dopadajícího zvuku. *Mikrofony krystalové* (Obr.4.59.) využívají piezoelektrického jevu, o kterém jsme se již zmínili.

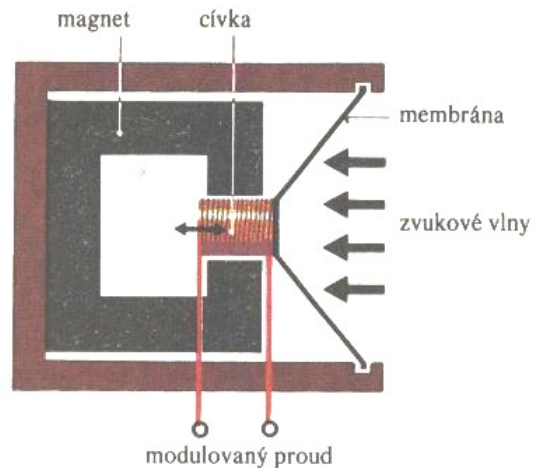
**Reproduktor** je svým způsobem opačně fungující mikrofon. *Telefonní sluchátka* (Obr.4.60.) jsou založena na principu elektromagnetu. Na pólových nástavcích permanentního magnetu jsou nasunuty dvě cívky s mnoha závity tenkého drátu. Těsně nad pólovými nástavci je upevněna kruhová membrána z pružného ocelového plechu, silného 0,4 mm. Prochází – li cívkami modulovaný elektrický proud, vzniká v mezeře mezi nástavci a membránou měnící se magnetické pole, které rozkmitá membránu v rytmu zvuku. *Elektromagnetický reproduktor* (Obr.4.61.) se skládá z cívky, pevně spojené s papírovou zvukovou membránou ve tvaru kužele. Volný pohyb cívky v mezeře udržuje středící membrána. Modulovaný proud,

protékající cívkou, způsobí, že cívka, nasazená na permanentním magnetu se rozkmitá a spolu s ní se rozkmitá i membrána.

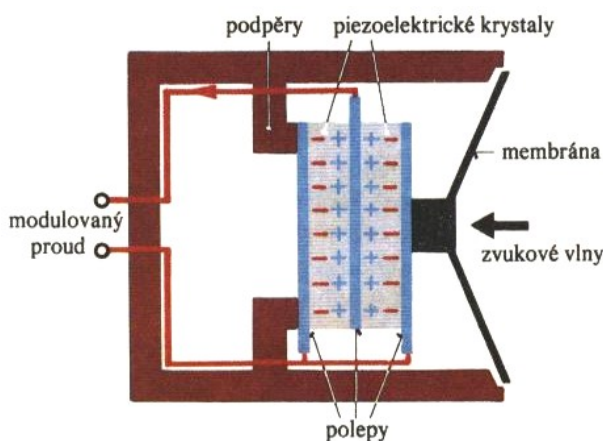
Průměrný kmitočtový rozsah vnímaných zvuků je u člověka v mezích 20 Hz – 16 000 Hz. Neexistuje žádný reproduktor, který by pokryl celou tuto oblast, neboť zvuk, vydávaný reproduktorem závisí na jeho geometrických rozměrech – malý reproduktor nemůže vydávat zvuky s nízkou frekvencí. Proto chceme – li vnímat kvalitní zvuk (např. hudbu), musíme vytvářet reproduktorové soustavy z několika reproduktorů.



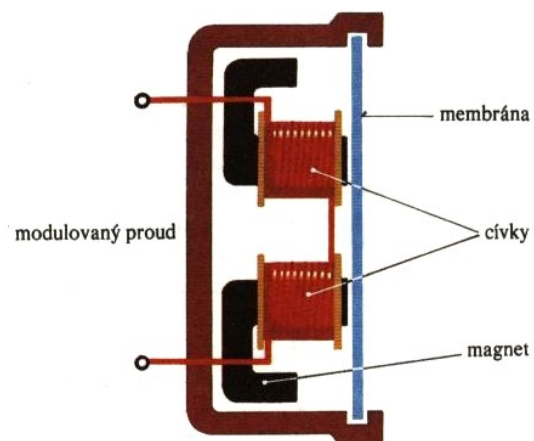
Obr.4.57. Uhlíkový mikrofon.



Obr.4.58. Elektromagnetický mikrofon.



Obr.4.59. Piezoelektrický mikrofon



Obr.4.60. Telefonní sluchátka.

#### 4.10. Šíření elektromagnetických vln

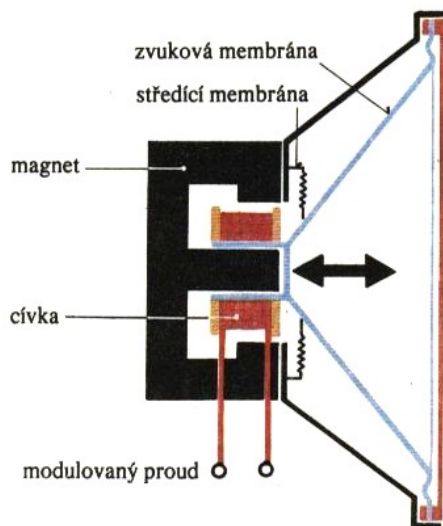
Z důvodů historických uvedeme i schéma a stručný popis přístroje, který sehrál velkou roli při přenosu zpráv – **telegrafu**. Jeho schéma je na Obr.4.63. (tzv. Morseův telegraf). Stiskneme – li telegrafní klíč, spojí se kontakty, uzavře se obvod a elektromagnet přitáhne kotvu. Psací hrot napíše potom na odvíjející se papír čárku nebo tečku Morseovy abecedy. Přenosu zpráv pomocí telegrafu se již nepoužívá. Telegraf byl nahrazen přenosem zvuku i obrazu pomocí elektromagnetických vln (Obr.4.62.). **Dlouhé vlny** se šíří od vysílače podél

povrchu Země, snadno se ohýbají podél terénu a mohou překonávat značné vzdálenosti. Jsou však dosti rušeny např. jiskřením elektrických spotřebičů, nebo atmosférickými poruchami.

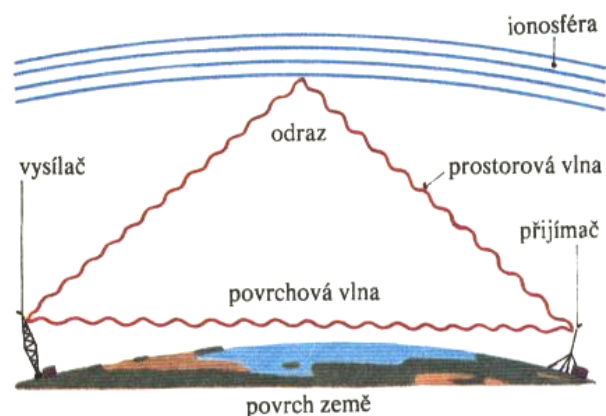
**Střední vlny** mají podobné vlastnosti jako vlny dlouhé, ale jejich dosah je menší. Jsou však méně rušeny.

**Krátké vlny** se šíří převážně tak, že se odrážejí od ionosféry (vrstvy ionizovaného vzduchu ve výšce 80-100 km) Může se tak stát, že je nezachytí přijímače nepřilíš vzdálené, ale naopak je zachytí přijímače na druhém konci Zeměkoule (zejména používá – li radioamatér Morseovy abecedy).

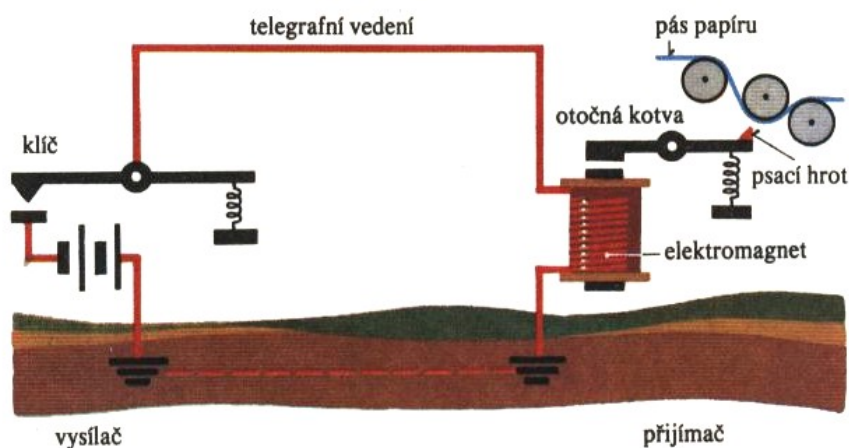
**Velmi krátké vlny** (VKV) pronikají ionosférou a neodrážejí se od ní. Ani podél povrchu Země se nešíří příliš daleko, dá se zhruba říci, že pouze na dohled. Proto je zachytíme jenom v nepřilíš velké vzdálenosti od vysílače. Někdy to může být výhoda – na jedné frekvenci může vysílat i několik vysílačů, dostatečně od sebe vzdálených. Současný televizní i rádiový přenos je uskutečňován pomocí frekvenčně modulovaných (FM) VKV. Chceme – li vysílat na větší vzdálenosti, musíme používat retranslačních stanic, nebo spojových satelitů.



Obr.4.61. Elektromagnetický reproduktor.



Obr.4.62. Šíření radiových vln.



Obr.4.63. Morseův telegraf



#### 4.11. Využití elektrického proudu v medicíně.

Tak jako každý obor lidské činnosti, je i medicína závislá na činnosti různých přístrojů a většina z nich využívá elektrického proudu.

**Franklinizace** je druhem léčby, který propagoval významný státník a vědec B. Franklin (je známa z filmu „Postřižiny“). Pomocí přístroje, vytvářejícího vysoké napětí (až  $10^5$  V), ale velmi malý proud, řádově  $\mu\text{A}$  (indukční elektrika, Teslův transformátor) se vytvoří vysokofrekvenční výboj, trvající pouze velmi krátký okamžik, asi  $5 \cdot 10^{-5}$  s. Výboj vyvolá ionizaci vzduchu a vznikne ozón, který podráždí vegetativní nervový systém. Výsledkem je povzbuzení tvorby krve, úprava krevního tlaku, chuti k jídlu a kvality spánku.

**Galvanizace.** Vycházíme – li z podobnosti živé tkáně s elektrolytem (poměrně složitým), ve kterém probíhají elektrické děje, můžeme dojít k závěru, že vhodnou aplikací stejnosměrného proudu můžeme léčit některé nemoci. V případě galvanizace používáme poměrně velkých elektrod a stejnosměrného proudu, obvykle nepřerušovaného. Maximální intenzita elektrického proudu bývá v rozmezí 5 – 30  $\mu\text{A}$  při napětí až 100 V. Doba aplikace proudu bývá až 60 min. Léčbu lze provádět i ve vodní lázni (hydrogalvanizace). Stejnosměrný proud vyvolá v organismu mírné zvýšení teploty, prokrvení tkání a transport iontů.

**Elektrolytická chirurgie.** Tato metoda slouží například k odstranění bradavic a k depilaci. Používá se stejnosměrného proudu o intenzitě 2 – 12 A, který se nechá působit asi 10 minut. Anodou je poměrně velká elektroda, která se přiloží kdekoliv. Katoda má formu jehly, která se zapíchne do bradavice. Vlivem elektrického proudu se vytvoří u katody alkalické prostředí, které vede k bobtnání a místnímu odumření tkáně. Bradavice posléze uschne, aniž zanechá viditelnou jizvu.

**Iontoforéza.** Tato metoda využívá opět stejnosměrného elektrického proudu ke vpravování léčiv do těla. Používá se dvou elektrod, z nichž menší je tzv. elektroda aktivní a druhá, velká se přikládá na libovolné místo těla. Obě elektrody jsou obaleny gázou, namočenou do fyziologického roztoku, na aktivní elektrodu navíc přidáme roztok s lékem, který chceme vpravit do tkáně. Při iontoforéze se používá napětí od 100 do 150 V a hustota proudu poblíž aktivní elektrody cca  $0,5 \text{ mA/cm}^2$ . Iontoforéza umožňuje vpravovat léky na místo jejich určení, pokud je poblíž povrchu těla (např. klouby), aniž procházejí trávicím traktem.

**Faradizace** je druhem elektroléčby, při kterém se používá střídavého proudu různé frekvence (5 – 500 Hz) a různého tvaru pulzu (sinusový, obdélníkový, exponenciální). Napětí lze měnit od 2 V do 200 V a intenzita proudu do 30 mA. Elektrody jsou podobné, jako v případě galvanizace. Touto metodou se léčí zejména poruchy některých druhů nervů a léčení ochrnutých svalů.

**Elektrošok.** Při aplikaci střídavého proudu o frekvenci kolem 50 Hz, napětí 100 V a intenzitě 300 mA na ústřední nervovou soustavu dojde u člověka ke křečovým záchvatům epileptického typu. Doba aplikace proudu je velmi krátká, 0,1 s – 1,5 s, přičemž doba trvání následného šoku je mnohem delší. Pacient ihned ztrácí vědomí a dochází u něho ke ztrátě paměti. Tato metoda bývá obvykle až to poslední, co lékaři zkoušejí (používá se u těžkých duševních poruch, jako je mani-deprese a schizofrenie). V poslední době je nahrazována jinými metodami.

**Elektrospánek.** Umělý spánek lze navodit užitím příslušných léků (hypnotik), ty však mohou mít po delším užívání neblahý vliv na játra a trávicí soustavu. Umělý spánek lze navodit použitím mírně kolísajícího galvanického proudu o intenzitě 0,2 mA – 1,5 mA při napětí 100 V.

**D'arsonvalizace.** D'Arsonvald pozoroval již v roce 1891, že střídavé proudy o frekvenci vyšší, než 10 000 Hz nedráždí nervovou soustavu, ani nevyvolávají křeče svalů. Pozorovány jsou pouze tepelné účinky těchto proudů. Při této metodě se užívá vysokofrekvenčních tlumených kmitů o frekvenci  $5 \cdot 10^5$  Hz (na principu Teslova transformátoru). Primární cívka oscilačního obvodu přístroje se skládá z několika závitů o tak velkém průměru, že se dovnitř vejde člověk (nebo alespoň některá končetina), aniž se závity dotýká. Druhou cívku tohoto Teslova transformátoru tvoří pacientovo tělo. Fyziologicky vyvolává d'arsonvalizace teplo, hluboké dýchání, pozitivní změny krevního tlaku, lehkou elektronarkózu a někdy i slabé křeče.

**Diatermie.** Teplo, vzniklé při d'arsonvalizaci není příliš velké, neboť se jedná o kmity tlumené. Chceme – li živou tkáň prohrát více, musíme použít některou z následujících metod tzv. diatermie:

1. Teplo, vzniklé v ohmickém odporu tkání (frekvence od 300 kHz do 1 MHz) – tzv. *klasická diatermie*.
2. Teplo, vzniklé v tkáních, jakožto nedokonalých izolátorech (v dokonalém dielektriku teplo nevzniká). K tomu se používá frekvence proudu od 15 MHz do 300 MHz – tzv. *diatermie v kondenzátorovém poli*.
3. Teplo, vzniklé v tkáních v důsledku vířivých proudů. K tomu je třeba použít frekvencí od 10 MHz do 50 MHz.
4. *Mikrovlnná (radarová) diatermie* (frekvenční rozsah 300 MHz – 3000 MHz)

**Elektrochirurgie.** Tepla, vzniklého působením vysokofrekvenčních proudů lze použít k chirurgickému rozrušení tkáně. Elektrický proud o frekvenci  $10^6$  Hz a výkonu 100 W – 150 W, koncentrovaný do okolí malé elektrody (hrotu, skalpelu) způsobí ohřátí na teplotu asi  $80^\circ\text{C}$ . Druhá elektroda je poměrně velká. Elektrochirurgické metody lze rozdělit následovně:

1. *Elektrotomie* – řez je prováděn jiskrami, které tkáň hladce spalují. Elektroda má tvar jehly, nebo skalpelu.
2. *Elektrokoagulace* – elektroda se přiloží na místo, kde má dojít ke koagulaci tkáně a zapne se vysokofrekvenční proud. Tkáň koaguluje na přesně vymezeném místě. Elektroda má tvar malé destičky, nebo kuličky.
3. *Elektrokarbonizace* – delším působením jiskry na jednom místě, dojde k zuhelnatění povrchových tkání.

Výhody elektrochirurgie:

- jednoduchá technika
- metoda sama částečně znecitlivuje,
- krvácení z malých cév se samo zuhelnatěním zastaví,
- ránu není třeba příliš dezinfikovat,
- jizvy jsou nenápadné,
- protože tkáň nádorů je citlivější na teplotu, než tkáň zdravá (zdravá snáší teplotu i nad  $50^\circ\text{C}$ , zasažená zhoubným bujením asi o  $5^\circ\text{C}$  nižší), je možné usmrcení i těch nádorových buněk, které se nacházejí poblíž řezu.

*Poznámka:* v posledních letech jsou elektrochirurgické metody nahrazovány operacemi pomocí laseru.

**Elektrokardiografie.** Impulzem pro stah jakékoliv buňky je změna elektrického napětí mezi vnějškem a vnitřkem buňky. Srdeční sval a buňky v něm musejí pracovat velmi koordinovaně, aby mohl vypudit krev do celého těla. Přístrojem, který je schopen zaznamenat změny elektrického napětí v srdci na povrchu těla, se nazývá elektrokardiograf (EKG). EKG pracuje na principu srovnání záznamů časového průběhu napětí u srdce zdravého a nemocného. Můžeme jím diagnostikovat takové nemoci a poruchy srdce, jako je infarkt myokardu, různé druhy arytmií, plicní embolie a jiné změny na srdci. Princip přístroje není příliš složitý, pomocí vodivého gelu se připevní na pacientovo tělo 10 elektrod a výsledkem

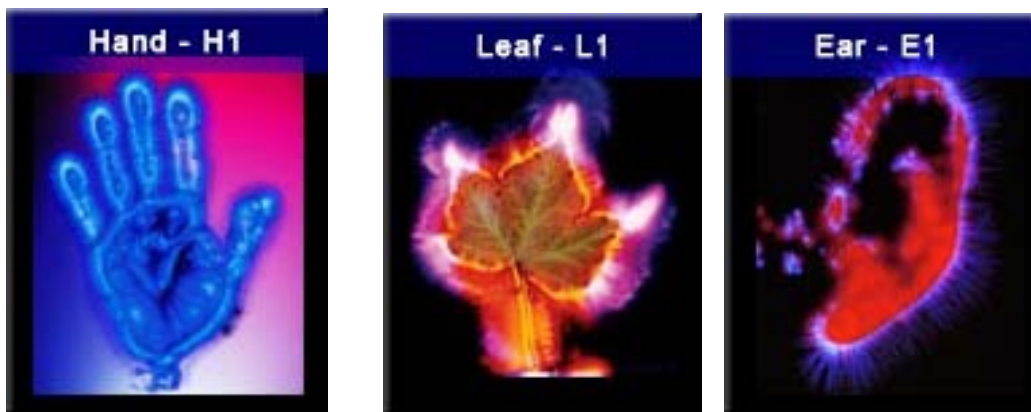
měření je elektrokardiogram – časový záznam napětových pulzů z jednotlivých elektrod. Zkušený lékař je pak schopen poznat, zda je srdce zdravé, nebo zda je nemocné (a o jakou nemoc se pravděpodobně jedná).

**Elektroencefalografie.** V případě elektroencefalografie (EEG) se jedná o diagnostickou metodu, vhodnou pro vyšetřování takových poruch a nemocí mozku, jako je epilepsie, mozková příhoda, meningitida, otřes mozku, poruchy spánku, atd. Způsob vyšetřování pacienta je podobný, jako u EKG, ale poněvadž je mozek nepoměrně složitější než srdce, je i encefalograf patřičně složitější a závěry i zkušeného lékaře jsou kvalitativní (nelze přesně rozhodnout, ve které části mozku došlo k poruše, ani o jaké porušení či nemoc se přesně jedná). Navíc, elektrické signály mozku jsou slabší, než tomu bylo u EKG, činí řádově desítky  $\mu\text{V}$  a musí být značně zesíleny..

**Kirlianova fotografie.** V roce 1930 objevili manželé Semjon a Valentina Kirlianovi efektní a velmi zajímavý fotografický proces, jehož podstatu publikovali v roce 1961 v časopise „Russian Journal of Scientific and Applied Photography“. Jejich původní experimentální uspořádání spočívalo v tom, že fotografovaný objekt (nebo dokonce část lidského těla) byl umístěn na fotografickou desku a bylo na něj přivedeno vysoké napětí vysoké frekvence. Výsledkem byla tzv. „aura“, obklopující objekt. Ta se samozřejmě stala objektem vhodným pro rádoby objevitelská vysvětlení různých psychotroniků a šarlatánů.

Současná experimentální zařízení pro výzkum Kirlianovy fotografie zaznamenala od dob manželů Kirlianových značný pokrok. Původní černobílá fotografie byla nahrazena mnohem efektnější fotografií barevnou, přinášející řádově vyšší množství informací. Celé současné experimentální zařízení připomíná poněkud větší fotoaparát a klasický vyvolávací proces je zautomatizován. V poslední době dokonce vznikla ještě dokonalejší zařízení, umožňující celou fotografii digitalizovat a zobrazovat či dokonce zpracovávat pomocí PC .

Je jisté, že Kirlianova fotografie není podvod. Z fyzikálního hlediska se jedná o vysokofrekvenční korónu, známou již N. Teslovi. Skupina vědců z Drexelovy University zaujímá však k tomuto jevu mnohem skeptičtější stanovisko: aura, vznikající kolem objektu (zejména živého), umístěného do vysokofrekvenčního pole je elektrickým jevem a proto bude silně záviset na vlhkosti objektu a na složení potu. Ten zase může záviset na tom, zda je člověk nemocný apod. Je tedy potom přirozené řadit Kirlianovu fotografii mezi takové experimentální metody, jako je např. detektor lži, EKG a EEG. To ale neznamená, že bychom se neměli tímto problémem nadále zabývat. Jenom musí být náš přístup exaktní a racionální



Obr. Kirlianova fotografie a) lidské ruky b) listu c) ucha [4]

**Ochrana před úrazem elektrickým proudem.** Mimo příznivé účinky elektrického proudu na živou tkáň, může být úraz elektrickým proudem nebezpečný pro člověka, nejsou – li dodrženy zásady bezpečného zacházení s elektrickými zařízeními. Z praktického života jsou známy případy, kdy při dobrém kontaktu (např. ve vaně s vodou) došlo k úmrtí při úrazech stejnosměrným proudem při napětí 250 V a u střídavých proudů dokonce při 100 V. Je jisté, že účinky elektrického proudu jsou individuální, důležitou roli hraje zdravotní stav jedince, zejména stav srdce a ústřední nervové soustavy. Již dříve jsme se zmínili o tom, že při vysokých frekvencích člověk může snést zasažení proudem o napětí až  $10^5$  V. Většina v praxi používaných frekvencí střídavých proudů je bohužel nižší a pro člověka nebezpečná. Účinek elektrického proudu na člověka nezávisí ani tak na napětí, jako na intenzitě proudu, který tělem protéká. Z tohoto hlediska lze působení elektrického proudu na člověka rozdělit do 4 skupin:

1. Proud do 25 mA – zastavuje dýchání,
2. Proud od 25 mA do 80 mA – dochází k zastavení činnosti srdce. Stav je ireversibilní, úraz je výjimečně smrtelný.
3. Proud od 80 mA do 4 A – smrt je poměrně častá.
4. Proud nad 4 A – V tomto případě je škodlivé Jouleovo teplo a i když člověk přežije, může zemřít po několika dnech na selhání ledvin, zahlcených zplodinami z teplem poškozených svalů (myoglobin)

Smrt nastává okamžitě, jestliže i proud nižší intenzity teče přes srdce. Tehdy dojde k tzv. fibrilaci (tj. nekoordinovaným stahům) srdečního svalu . Najdeme – li postiženého elektrickým proudem, musíme nejdříve přerušit elektrický okruh a poté nasadit umělé dýchání. Máme – li možnost, použijeme defibrilačního přístroje (kondenzátor, nabitý na vysoké napětí se vybije přes srdeční krajinu).

## Literatura.

- [1] Opava, Z.: *Elektrina kolem nás*. Albatros Praha 1985.
- [2] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.: *Fyzika*. VUTIUM Brno, PROMETHEUS Praha, 2000
- [3] Putilov, K.A.: *Kurs fyziki II*, Fizmatgiz 1959.
- [4] Encyklopedie Wikipedia
- [5] Serway, R.A.: *Physics*. Sanders College Publ. 1996.

## 5. Demonstrační pokusy z elektřiny a magnetismu.

Demonstrační pokusy jsou nedílnou součástí přednášek z fyziky. Závěry mnoha didaktických výzkumů potvrzují tuto skutečnost a proto jim věnujeme pozornost i v našem příspěvku. Jak jsme již několikrát uvedli, je kniha autorů Halliday, D. Resnick R., Walker, J.: *Fyzika*, cenná právě tím, že je v ní uvedeno mnoho praktických příkladů využití fyzikálních jevů v technické praxi a při vysvětlování různých jevů v přírodě. Jsou v ní uvedeny i mnohé demonstrační pokusy a to zejména jako pokusy motivační, nutící čtenáře zamyslet se na probíranými problémy.

Protože studenti fyzikálních kombinací na Pedagogické fakultě Masarykovy University jsou připravováni jako budoucí učitelé fyziky na základní škole a na nižších stupních gymnázia, je jim po celou dobu studia zdůrazňován význam pokusů při výkladu látky. Během svého studia absolvují studenti i speciální kurz fyzikálních pokusů. Přesto se my, jejich učitelé dozvídáme, že z různých důvodů praktické povahy, ale někdy i z důvodu pohodlnosti učitelé ve svých hodinách pokusy neprovádějí, což je jistě velká škoda.

Doufáme, že přehled některých pokusů z elektřiny bude studentům – budoucím učitelům, sloužit jako inspirace pro jejich další práci a pro další rozvíjení této stránky výuky. Uvádíme zde pouze ty pokusy, které lze nazvat „klasickými“, tj. lze je snadno připravit, nebo vyrobit a většina z nich bývá i ve školních sbírkách. Jako velmi vhodný doplněk doporučujeme videodeokurz [4,5].

### 5.1. Elektrostatika.

#### **Pokus 1. Vlastnosti elektrického náboje.**

*Potřeby:* Elektrické kyvadélko, tyč ebonitová a skleněná.

*Provedení:* K nezelektrovanému kyvadélku přiblížíme ebonitovou tyč. Kulička je přitažena k tyči, dotkne se jí a přijme záporný náboj. Poté bude od tyče odpuzována. Nato k ní přiblížíme zelektrovanou skleněnou tyč. Kulička, která byla od ebonitové tyče odpuzována, bude ke skleněné tyči přitahována.

#### **Pokus 2. Vlastnosti elektrického náboje**

*Potřeby:* 2 kyvadélka, tyč skleněná a ebonitová.

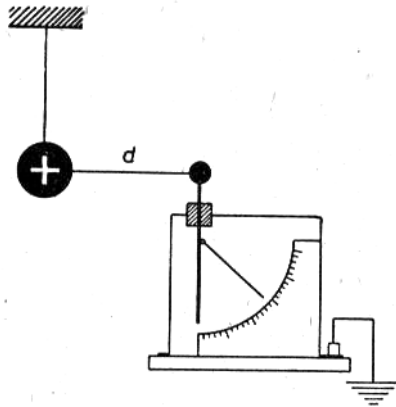
*Provedení:* Zavěsíme dvě stejně velké kuličky (polystyrén, pokrytý tenkou kovovou vrstvou) na hedvábné závěsy, 30 – 40 cm dlouhé.

- každé kuličky se dotkneme jinou tyčí (jedné ebonitovou a druhé skleněnou).  
Pozorujeme vzájemné přitahování kuliček.
- Kuličky vybijeme (dotykem) a poté se jich dotkneme touž tyčí. Pozorujeme odpuzování kuliček.

Pokus má stejný výsledek i v případě, že povrch kuliček není metalizovaný.

**Závěr pokusů 1 a 2:** Existují dva druhy elektrických nábojů, které se chovají opačně. Podle dohody označujeme elektrický náboj na skleněné tyči jako kladný a na ebonitové jako záporný (skutečnost je opačná). Tělesa souhlasně nabitá se navzájem odpuzují, tělesa nesouhlasně nabitá se navzájem přitahují.

**Poznámka:** na principu odpuzování souhlasných nábojů pracuje demonstrační přístroj, zvaný *elektroskop* (nebo též *elektroměr*) (Obr.5.1.)



Obr.5.1. Elektroskop

Pevný kovový plátek i pohyblivý proužek staniolu získají po dotyku stejný elektrický náboj. Výchylka staniolového proužku je úměrná velikosti náboje, předaného elektroskopu a je kvalitativně indikována na stupnici přístroje. Elektroskop lze vybit dotykem rukou.

### **Pokus 3. Postupné nabití vodiče.**

*Potřeby:* kovová kulička na izolované tyčince, zdroj (indukční elektrika, nebo Van de Graafův generátor, elektroskop.

*Postup:* kovovou kuličkou na izolační tyčince (*elektrickou lžičkou*) se dotkneme např. záporného pólu indukční elektriky. Náboj, který získala, přeneseme na elektroskop, který indikuje výchylku. Totéž opakujeme několikrát a výchylka elektroskopu bude postupně narůstat. Po dosažení určité velké výchylky, začneme přenášet stejným způsobem opačný (kladný) náboj a budeme pozorovat pokles výchylky elektroskopu.

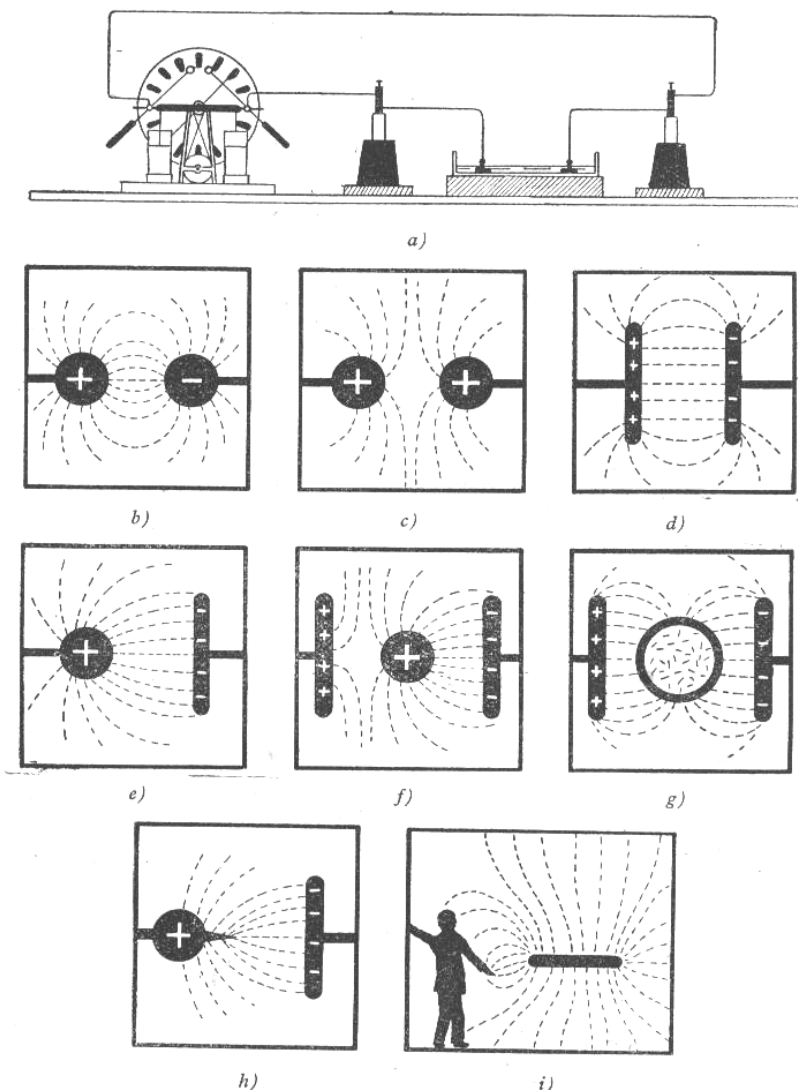
*Závěr:* Elektrické náboje jsou dělitelné a lze je přenášet. Sčítají se algebraicky.

### **Pokus 4. Znázornění elektrického pole siločarami.**

*Potřeby:* indukční elektrika, miska s rovným dnem, ricinový a parafinový olej, krupice. 2 Holtzovy svorky, dobře izolované od pracovního stolu, různé tvary elektrod, připojené kolmo na dráty, upevněné v Holtzových svorkách.

*Postup:* do misky nalijeme olej s vysokou viskozitou tak, aby tloušťka vrstvy oleje byla asi 5 mm. Elektrody různých tvarů, připojíme na opačné póly indukční elektriky (Obr.5.2) a vložíme do oleje. Na povrch oleje nasypeme řídkce mezi elektrody pomocí jemného sítko krupici. Začneme otáčet kolem indukční elektriky a pozorujeme orientaci krupičných zrněk ve směru siločar elektrostatického pole. Celý proces je díky vysoké viskozitě oleje pomalý. Takto můžeme demonstrovat tvar elektrostatického pole mezi různými geometrickými útvary. Chceme – li přejít k jinému obrazci, rozhrneme zrna krupice dřevěnou tyčinkou a vyměníme elektrody. Po jisté době tento postup nestačí a proto slijeme olej do kádinky, necháme usadit krupici a pokus znovu zopakujeme s jinými elektrodami.

*Závěr:* elektrické siločáry začínají v kladných a končí v záporných nábojích. Pokud jsou náboje souhlasné, siločáry se neprotínají (odpuzují).



Obr.5.2. Znázornění elektrostatického pole pomocí siločar.

### **Pokus 5. Směr siločar.**

*Potřeby:* deskový kondenzátor, kulička na hedvábném vlákně.

*Postup:* zavěsíme kladně nabitou kuličku do elektrického pole mezi kladně a záporně nabitými deskami. Kulička je odpuzována od kladné desky k desce záporné.

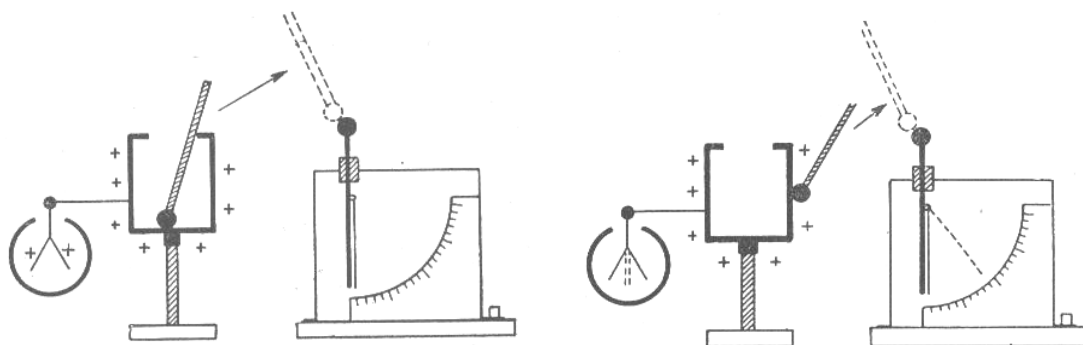
*Závěr:* směr siločary je totožný se směrem pohybu volného kladného náboje v elektrickém poli (tedy se směrem intenzity elektrického pole).

### **Pokus 6. Sídlo elektrických nábojů a jejich hustota.**

*Potřeby:* válcová kovová nádoba (Faradův pohár), dutá koule, elektrická lžička, elektroskop, indukční elektrika, skleněná a ebonitová tyč.

*Postup:* Faradův pohár, izolovaný od podložky nabijeme indukční elektrikou. Elektrickou lžičkou se dotkneme vnitřku poháru. Poté se dotkneme elektroskopu a přesvědčíme se, že na lžičce nebyl žádný náboj (elektroskop se nevychýlil). Naopak, dotkneme – li se vnější strany válce, zjistíme, že je na něm uložen elektrický náboj (Obr.5.3).

*Závěr:* elektrický náboj se vždy rozmístí na povrchu kovových předmětů.



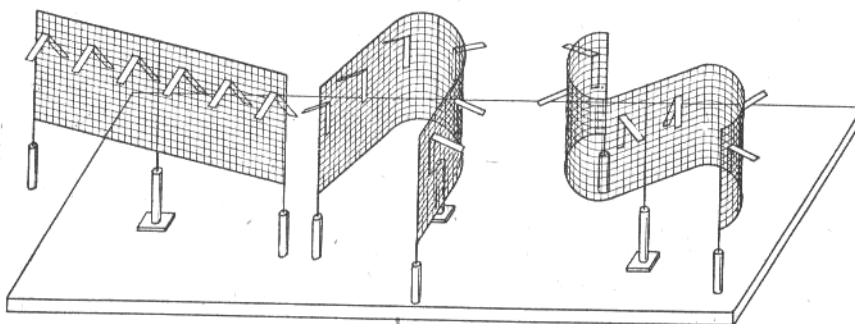
Obr.5.3. Demonstrace umístění náboje na vodiči.

**Pokus 7. Důkaz rozložení náboje na vodiči pomocí Kolbeovy síťky.**

*Potřeby:* hustá kovová síťka na izolovaných podstavcích, lehké papírové proužky dvou barev.

*Postup:* hustou drátěnou síť s nalepenými lehkými papírovými proužky (každá barva na jedné straně síťky) umístíme na stole z dielektrického materiálu. Podle Obr.5.4. Síťku různě naformujeme a poté nabijeme pomocí indukční elektriky. Sledujeme, které papírové proužky jsou od síťky odpuzovány.

*Závěr:* elektrický náboj se vždy rozmístí na povrchu kovových předmětů.



Obr.5.4. Kolbeova síťka

**Pokus 8. Pohyb nabitých částic ve směru siločar.**

*Potřeby:* indukční elektrika, 2 dobře izolované stoličky, 2 „bublifuky“.

*Postup:* dva studenti se postaví na dvě izolované stoličky a k opasku každého z nich připevníme vodič od jednoho pólu indukční elektriky. Pokud neotáčíme elektrikou, jsou studenti, stejně jako bublinky neutrální a bublinky létají chaoticky. Jakmile začneme otáčet kolem indukční elektriky, létají bublinky proti sobě zhruba ve směru siločar (kladně nabitě k záporné elektrodě a naopak).

*Závěr:* náboje (lehké elektricky nabitě předměty) se pohybují ve směru siločar (ve směru intenzity elektrického pole).

**Pokus 9. Sršení náboje z hrotu. Elektrický vítr.**

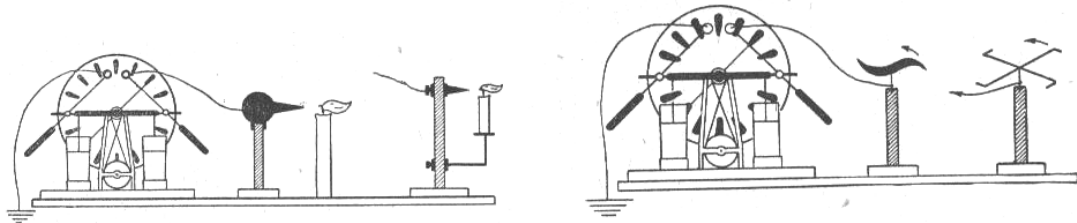
*Potřeby:* vodič s hrotem na izolujícím podstavci, indukční elektrika, svíčka, spojovací vodiče.

*Postup:* na hrotech může být intenzita elektrického náboje tak vysoká, že dojde k ionizaci okolního vzduchu. Jeden pól indukční elektriky spojíme s hrotem a druhý pól uzemníme.



U hrotu dochází k pohybu iontů ve směru od ostří (Obr.5.5), což dokumentuje plamen svíčky, umístěný do vhodné vzdálenosti od hrotu.

Iontový vítr můžeme dokázat též pokusem s Franklinovým kolečkem, tj. na vertikálním izolovaném stativu nasazenou vrtulkou ve tvaru písmene *S* s ostrými hroty, nebo vodič ve tvaru svastiky (obdoba Segnerova kola). U každého hrotu vzniká proud iontů ve směru od ostří a vrtulka se roztočí opačným směrem. Postavíme – li kdekoliv poblíž otáčejícího se *S* elektroskopy, všechny se elektrostatickou indukcí nabijí.



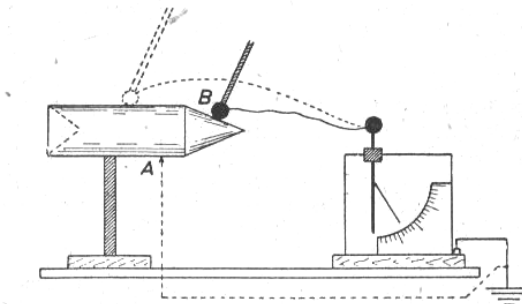
Obr. 5.5. Důkaz sršení náboje z hrotu.

**Pokus 10. Měření potenciálu na povrchu vodiče.**

*Potřeby:* elektrometr, elektrostatická lžička, vodič libovolného tvaru, spojovací vodiče.

*Postup:* elektrometr uzemníme a elektrostatickou lžičkou se dotýkáme nabitého vodiče různého tvaru. Zjistíme, že výchylka elektroskopu se nemění při posouvání elektrostatické lžičky po povrchu vodiče.

*Závěr:* všechny body nabitého vodiče mají stejný potenciál (Obr.5.6.).



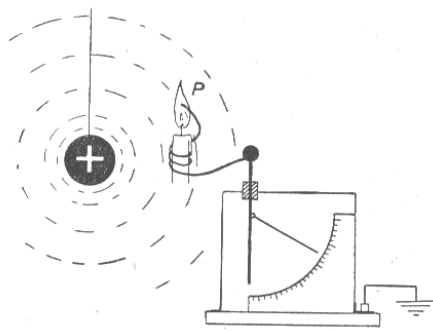
Obr.5.6. K měření potenciálu na povrchu vodiče.

**Pokus 11. Potenciál v nehomogenním elektrickém poli.**

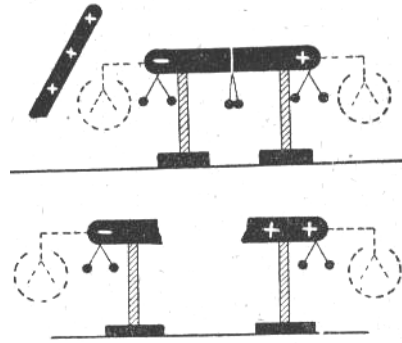
*Potřeby:* kulový vodič, izolující závěs, svíčka, dlouhý vodič, izolovaný elektroskop.

*Postup:* dostatečně dlouhý izolovaný vodič spojíme s uzemněným elektroskopem. Konec drátu zasahuje do plamene hořící svíčky. Protože je obal elektroskopu uzemněn, měří jeho výchylka potenciál v bodě P vzhledem k Zemi. Pokud by plamen nehořel, indukoval by se na kovovém hrotu vodiče elektrický náboj a rušil by měřené pole. Plyny plamene jsou částečně vodivé a odvádí náboj, indukovaný na hrotu. Touto sondou tedy můžeme kvalitativně proměřit elektrické pole Země.

*Závěr:* Země se chová jako záporně nabitá koule



Obr.5.7. Měření elektrického potenciálu v nehomogenním elektrickém poli.



Obr.5.8. Nabíjení těles pomocí elektrostatické indukce.

### **Pokus 12. Vodič v elektrickém poli.**

*Potřeby:* elektroskop, deskový kondenzátor, silná kovová deska, indukční elektrika.

*Postup:* připojíme svorky elektroskopu k deskám kondenzátoru a ten nabijeme pomocí indukční elektriky. Vsuneme – li mezi desky kondenzátoru silnou kovovou desku, aniž se dotkneme desek kondenzátoru, klesne napětí, měřené elektroskopem. Vzdálíme – li desku, bude elektroskop ukazovat původní výchylku..

*Závěr:* na kovové desce vznikne elektrostatickou indukci elektrické pole opačného směru, než je pole kondenzátoru a odečítá se od něho.

### **Pokus 13. Jev elektrostatické indukce.**

*Potřeby:* 2 elektroskopy, tyč se zaoblenými konci, kterou lze rozdělit na dvě části (Obr.5.8.), ebonitová tyč, skleněná tyč, mylá kyvadla na tyči.

*Postup:* Přiblížíme – li se k tyči (aniž se jí dotkneme) zelektrovanou tyčí, ukáže elektroskop (kyvadla) výchylku. Vzdálíme – li zelektrovanou tyč, nastane neutrální stav. Rozdělíme – li tyč v okamžiku zelektrování na dvě části, oddělíme od sebe náboje různého znaménka. Je třeba si uvědomit, že výsledek tohoto pokusu se liší od předcházejících pokusů v tom smyslu, že v elektrometru zůstal náboj opačný.

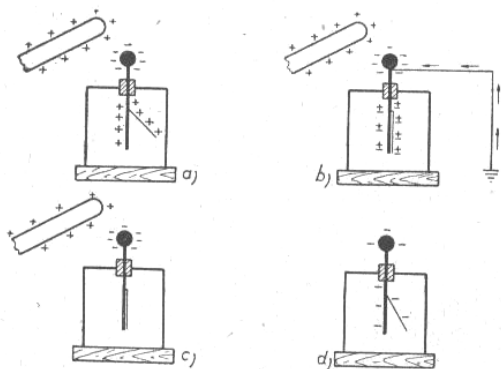
*Závěr:* tělesa lze nabíjet nejen dotykem, ale i pomocí elektrostatické indukce.

### **Pokus 14. Nabíjení vodiče elektrostatickou indukci.**

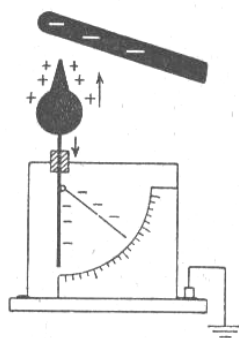
*Potřeby:* elektrometr, tyč ebonitová a skleněná.

*Postup:* přiblížíme – li se zelektrovanou ebonitovou tyčí k elektrometru, dojde k němu k přerozdělení náboje podle Obr.5.9. Vzdálíme – li tyč, výchylka zmizí (náboj se vyrovná). Nyní se znovu přiblížíme tyči a dotykem odvedeme náboj z elektrometru. Po oddálení tyče (i prstu) se na elektrometru objeví znovu výchylka, způsobená opačnými náboji.

*Závěr:* elektrostatickou indukci lze nabíjet vodiče.



Obr.5.9. Nabíjení elektrostatickou indukcí.



Obr.5.10. Účinek hrotu (sání)

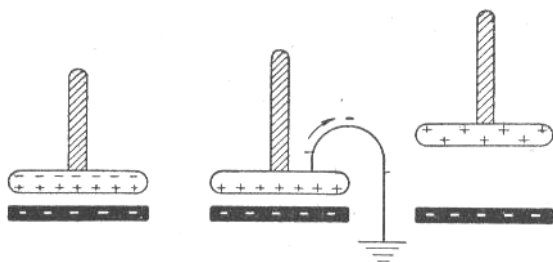
**Pokus 15. Účinek hrotu (sání).**

*Potřeby:* elektrometr, hrot, ebonitová a skleněná tyč.

*Postup:* k elektrometru, na který jsme nasadili hrot, přiblížíme elektrovanou tyč. Náboj, indukovaný na hrotu, z něho vysrší a odpuzovaný souhlasný náboj na elektrometru zůstane (Obr.5.10).

*Poznámka a závěr:* je třeba si uvědomit, že výsledek tohoto pokusu se liší od pokusu 15 v tom smyslu, že na elektrometru zůstal náboj opačný.

**Poznámka. Elektrofor** (nosič náboje) je jednoduché zařízení, umožňující jednoduše získat větší množství elektrického náboje. Skládá se z ebonitové desky, na jedné straně polepené papírem (izolací). Desku položíme izolovanou stranou na stůl a druhý povrch třeme sestí, nebo flanelem. Poté položíme na horní stranu ebonitové desky zinkový konduktor (kulatou zinkovou desku s izolovaným ebonitovým držadlem. Deska je uzemněna (Obr.5.11). Na zinkové desce, položené na desce ebonitové, se indukuje elektrický náboj a jeho záporná složka je odvedena do země. Takto získaný kladný náboj můžeme přenést na jiné místo. Celý děj se dá mnohokrát opakovat a tím získat větší množství náboje.



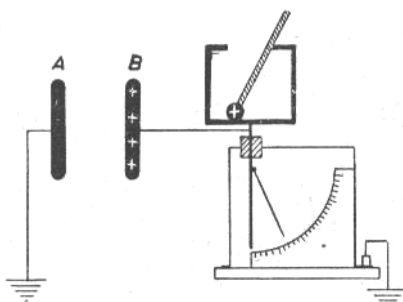
Obr.5.11. Elektrofor.

**Pokus 16. Kapacita deskového kondenzátoru.**

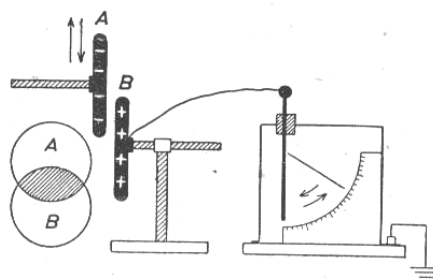
*Potřeby:* deskový kondenzátor, elektroskop, Faradayův pohár, elektrická lžička, indukční elektrika, izolační podklad.

*Postup:* sestavíme pokus podle Obr.5.12. Na elektroskop nasadíme Faradayův pohár a elektrickou lžičkou přenášíme do poháru postupně stejný náboj  $Q$ , získaný např. z indukční elektriky, nebo elektroforu. Do jednoduché tabulky bynášíme závislost potenciálu  $U$  (výchylka elektroskopu) na celkovém náboji  $Q$ .

*Závěr:* Napětí na kondenzátoru je přímo úměrné náboji na jeho deskách.



Obr. 5.12. Vlastnosti elektrického kondenzátoru.



Obr.5.13. Závislost kapacity kondenzátoru na velikosti plochy  $S$ , překrývajících se desek

**Pokus 17. Závislost kapacity kondenzátoru na jeho geometrických parametrech.**

*Potřeby:* deskový kondenzátor, elektroskop, indukční elektrika.

*Postup 1:* desky nabitého kondenzátoru spojíme s elektroskopem. Zvětšujeme – li vzdálenost desek, roste napětí  $U$ , aniž dodáváme na kondenzátor náboj (kapacita kondenzátoru klesá). Vrátíme – li desky do původní vzdálenosti, bude i výchylka elektroskopu původní.

*Závěr:* kapacita kondenzátoru klesá s rostoucí vzdáleností desek

*Postup 2:* desku, která není spojena s elektroskopem, posouváme nahoru nebo dolů, doleva nebo doprava (při téže vzdálenosti od druhé desky – Obr.5.13.). Tím se mění velikost překrývající se společné plochy obou desek. Opět pozorujeme růst napětí mezi deskami a tedy dochází k poklesu kapacity kondenzátoru.

*Závěr:* Kapacita kondenzátoru je úměrná velikosti společné plochy  $S$ , překrývajících se desek (podstata ladícího kondenzátoru).

**Pokus 18. Závislost kapacity kondenzátoru na dielektriku mezi jeho deskami.**

*Potřeby:* deskový kondenzátor, elektroskop, indukční elektrika, desky o různé dielektrické konstantě (sklo, ebonit, slída, pertinax, PVC, papír, atd.). Desky z různých materiálů musí mít stejnou tloušťku a alespoň pro jeden materiál bychom měli mít k dispozici desky o různé tloušťce.

*Postup:* kondenzátor nabijeme a výchylku elektroskopu zapíšeme. Do prostoru mezi deskami kondenzátoru (Obr.5.12.) vkládáme desky stejné tloušťky z různých materiálů a zapisujeme výchylky elektrometru. Poté provedeme stejný pokus s deskami různé tloušťky ze stejného materiálu.

*Závěr:* kapacita kondenzátoru je přímo úměrná velikosti dielektrické konstanty a při stejné dielektrické konstantě je nepřímo úměrná tloušťce vrstvy dielektrika.

**Pokus 19. Polarizace dielektrika a elektrostatická indukce.**

*Potřeby:* model deskového kondenzátoru, elektroskop, indukční elektrika, vodiče, skleněná deska.

*Postup 1:* silnou skleněnou desku osušíme (např. ji zahřejeme) a vsuneme ji mezi desky kondenzátoru, které k ní přitlačíme. Poté kondenzátor nabijeme a napětí, změřené elektroskopem zapíšeme. Vysuneme – li desku z prostoru kondenzátoru, vzroste na něm napětí (Pokus 18). Skleněnou desku položíme na izolační podložku a kondenzátor vybijeme. Poté vložíme skleněnou desku zpět do prostoru mezi deskami kondenzátoru,

kteře k ní opět přitiskneme. Z výchylky elektroskopu zjistíme, že na kondenzátoru je opět napětí. Celý děj můžeme několikrát opakovat. V tomto případě je pole v dielektriku způsobeno a udržováno náboji, které přešly z desek kondenzátoru na oba povrchy dielektrické desky (nejedná se tedy o elektrostatickou indukci, jak by tomu bylo v případě, kdybychom skleněnou desku nahradili permanentním elektretem).

**Závěr:** sídlem energie elektrostatického pole je dielektrikum. Pole, které vzniklo na povrchu dielektrika se na něm udrží, neboť náboje se nemohou volně pohybovat a vyrovnávat.

**Postup 2:** Varianta pokusu, využívající tzv. Leydenské lahve. Tato rozkladná Leydenská láhev se skládá ze dvou kovových nádob, oddělených dielektrikem (Obr.5.14.). Složenou Leydenskou láhev nabijeme tak, že kuličkou, která je spojena s vnitřním polepem, se dotkneme některého pólu indukční elektriky (vnější polep držíme v ruce). Po nabití Leydenskou láhev rozložíme tak, že vyjmeme nejdříve vnitřní kovovou nádobku a položíme ji na stůl, takže se vybije. Poté vyjmeme skleněné dielektrikum a postavíme ho na izolovanou podložku. Vnější kovovou nádobku také postavíme na stůl (je již vybita – drželi jsme ji v ruce). Poté láhev opět sestavíme. Vyvíječem (rozdvojenou elektrickou lžičkou) se přesvědčíme, že mezi kovovými nádobkami přeskóčí jiskra – láhev se vybila.

**Závěr:** stejný jako v případě 1.



Obr.5.14. Leydenská láhev

## 5.2. Elektrický proud.

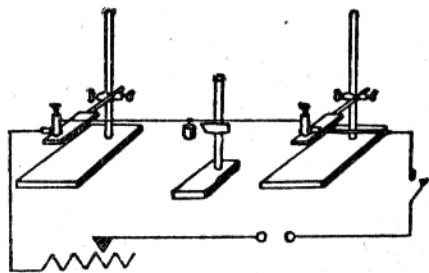
### **Pokus 20. Tepelné účinky elektrického proudu.**

**Potřeby:** 2 Holtzovy svorky, závažíčko, zdroj proudu o napětí cca 12 V (stejnoseměrný, nebo střídavý), posuvný reostat ( $10 \Omega$ , 5 A), vypínač, vodiče, dráty z Cu, nikelinu, případně jiného odporového materiálu (1 – 2 m dlouhé, o průměru cca 0,5 mm), žárovka.

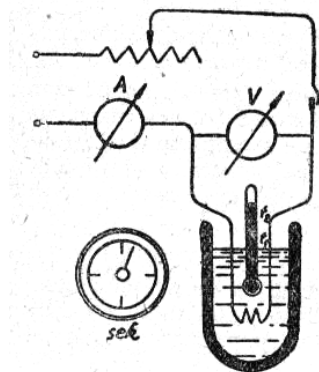
**Postup:** elektrický obvod sestavíme ze zdroje, reostatu a měděného drátu, umístěného mezi Holtzovými svorkami (Obr.5.15). Reostatem nastavíme proud na hodnotu asi 4 A. Zjistíme, že měděný drát bude pouze mírně teplý, nikelinový bude horký a speciální odporový drát, využívaný pro vinutí vařičů, bude žhnout. Kromě tepelných účinků budeme pozorovat i změnu geometrických rozměrů, tj. zejména délky ohřátého drátu (pokles závažíčka).

**Závěr:** průchodem elektrického proudu vodičem vzniká Jouleovo teplo a dochází k prodloužení vodiče. Obě veličiny závisí jak na intenzitě proudu, tak na velikosti ohmického odporu vodiče.

**Poznámka:** prodloužení ohřátého drátu se využívá například při konstrukci tepelných elektrických měřicích přístrojů.



Obr.5.15. Tepelné účinky elektrického proudu.



Obr.5.16. Ověření Jouleova zákona

### **Pokus 21. Ověření Jouleova zákona.**

*Potřeby:* ampérmetr, voltmetr, tepelný elektrický spotřebič (elektrický odpor, žárovka, ponorný vaříč), reostat.

*Postup:* sestavíme obvod podle Obr.5.16. Kvůli bezpečnosti používáme při měření napětí cca 12 V. Elektrické spotřebiče umístíme do vodní lázně v izolované nádobě (kalorimetru, Dewarově nádobě). Během měření zapisujeme hodnoty proudu, napětí a času. Výsledek porovnáme s hodnotou výkonu spotřebiče, uvedenou na štítku.

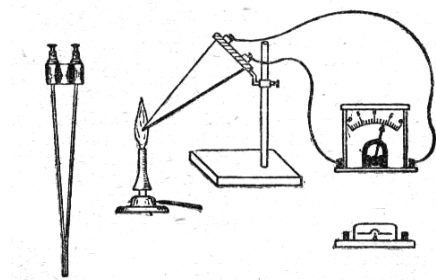
*Závěr:* Elektrická práce (Jouelovo teplo) je úměrná druhé mocnině intenzity elektrického proudu, procházejícího spotřebičem a úměrná velikosti odporu  $R$  (ten změříme např. ohmmetrem).

### **Pokus 22. Světelné účinky elektrického proudu, elektrický oblouk.**

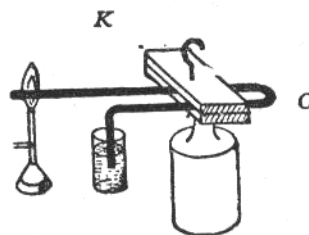
*Potřeby:* 2 uhlíky (postačí uhlíky z vybitého monočláčku), 2 Holtzovy svorky, zdroj proudu (40 – 60 V, 6 A), tmavé sklo, svářečské brýle, tenký měděný drát, reostat, silný magnet, vodiče, ampérmetr, voltmetr.

*Postup:* uhlíky vyžíláme a jeden z nich zaostříme do špičky. Oblouk hoří optimálně při stejnosměrném napětí 38 – 43 V, nebo střídavém napětí 28 – 30 V. Zbývající úbytek napětí vznikne na reostatu. Uhlíky přivedeme do vzájemného kontaktu a tím zapálíme výboj. Pak je od sebe oddálíme na vzdálenost asi 5 mm. Přes tmavé sklo (brýle) pozorujeme ohyb oblouku směrem nahoru (způsobený ohřátým proudem vzduchu). Vložíme – li tenký měděný drát do oblouku, začne se tavit. Silný magnet vychyluje oblouk tak, že jej může i zhasit.

*Poznámka:* Všichni žáci i učitel musí bezpodmínečně používat k pozorování oblouku tmavé sklo, nebo ještě lépe svářečské brýle.



Obr.5.17 a) Termočlánek.



Obr.5.17.b) Termočlánek s velkým proudem.

### **Pokus 23. Termoelktrina –základní charakteristika.**

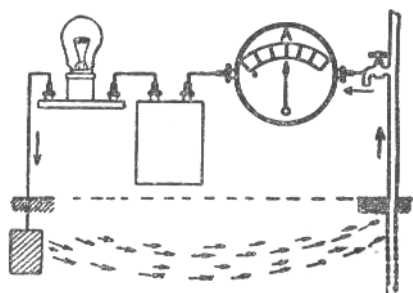
*Potřeby:* termočlánek, stojan, kahan(plynový, lihový), galvanometr s malým vnitřním odporem.

*Postup1:* sériově spojíme termočlánek a galvanoměr. Kahanem zahříváme spoj termočláнку. Měříme elektromotorické napětí termočláнку (5.17 a).

*Závěr:* elektromotorické napětí termočláнку je velmi nízké.

*Postup2:* mnohem silnější proud získáme v uspořádání podle Obr.5.17 b). Ve dvou ocelových (feromagnetických) deskách jsou vyfrézovány dvě válcové prohlubně, kterými těsně prochází do oblouku stočený silný měděný prut. Zahřejeme jeden konec oblouku a druhý budeme udržovat na stejné, nižší teplotě tak, že jej ponoříme do studené vody. Vznikne tak termočlánek, jehož dva spoje (Cu – ocel) mají různé teploty. Protože měděný prut má velký průřez, vznikne dostatečně silný proud o nízkém napětí, který vytvoří v oblouk silné magnetické pole. Toto pole zmagnetuje obě ocelové destičky tak silně, že udrží poměrně velké závaží.

*Závěr:* napětí termočláнку je sice velmi malé, ale intenzita proudu může být dostatečně vysoká.



Obr. 5.18. Země jako vodič.

### **Pokus 24. Země jako vodič, uzemňování vodičů.**

*Potřeby:* stejnosměrný zdroj (akumulátor 6 V), žárovka 6 V, 5 A s objímkou, 2 silné a dlouhé kovové kolíky (velké hřebíky), 2 svorky, spojovací vodiče.

*Postup:* obvod sestavíme podle Obr.5.18. Spojení se zemí můžeme realizovat tak, že do země zatlučeme dva kolíky a pozorujeme růst proudu v závislosti na tom, jak hluboko zatlučeme kolíky. Můžeme sledovat a popsat i závislost na stavu půdy mezi kolíky (na její vlhkosti). Jako jednoho z kolíků můžeme použít i vodovodního potrubí, nebo zemnicí desky bleskosvodu.

*Závěr:* v technické praxi se velmi často užívá uzemňování vodičů (bleskosvody, zemnicí vodič elektrického vedení, uzemňování nebezpečných zdrojů elektrického náboje, atd.).

### **Pokus 25. Zjištění hodnoty napětí vůči zemi.**

*Potřeby:* zkoušečka (doutnavka s předřazeným odporem, nebo jiný systém).

*Postup:* zkoušečky napětí lze bez nebezpečí zjistit, který pól zásuvky sítě je uzemněn. Dotkneme – li se neuzemněného pólu, protéká proud velkým odporem, doutnavkou a tělem člověka do země. Doutnavka se tímto proudem rozsvítí. Proud vzhledem k velkému odporu je tak slabý, že je pro tělo naprosto bezpečný (přesto zkoušení provádí pouze učitel). Dotkneme – li se uzemněného pólu, doutnavka nesvítí.

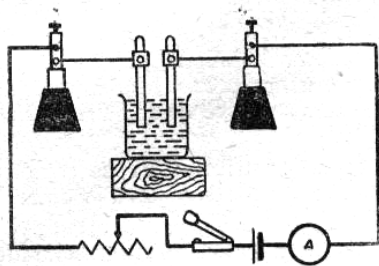
## **5.3. Elektrický proud v elektrolytech.**

### **Pokus 26. Vodivost kapalin.**

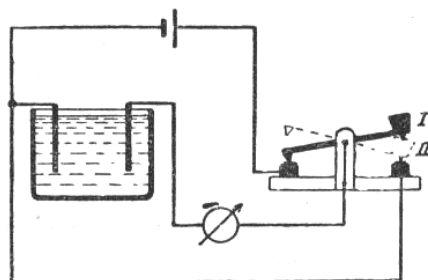
*Potřeby:* zdroj stejnosměrného proudu (6 V), Holtzovy svorky, reostat, ampérmetr, malá žárovka (2,5 V, 0,2 A) na stojánku, destilovaná voda, kyselina sírová, 2 elektrody uhlíkové, měděné, niklové, apod., kádinka, ostatní chemikálie ( $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KOH}$ , ...)

*Postup:* sestavíme obvod podle Obr.5.19. Nejprve se přesvědčíme, že čistá destilovaná voda nevede elektrický proud (na druhu elektrod v tomto případě nezáleží). Do vody za stálého míchání přidáváme jednotlivé chemikálie (vždy však jenom jednu). Sledujeme kvalitativně závislost elektrického proudu na koncentraci roztoků, případně na jejich chemickém složení. Do vody můžeme přidávat i jiné chemikálie, např. cukr, glycerín, olej, líh, apod.).

*Závěr:* čistá voda je izolátorem. Vodivost elektrolytu je složitou funkcí jeho koncentrace. Některé chemikálie, rozpuštěné ve vodě nezpůsobí její vodivost (líh, cukr, glycerín,...), jiné mají silný vliv na vodivost elektrolytu (kyseliny, hydroxidy, soli).



Obr.5.19. Základní zapojení pro studium vedení elektřiny v kapalinách.



Obr.5.20. Studium polarizace článku.

### **Pokus 27. Elektrolýza roztoku $\text{CuSO}_4$**

*Potřeby:* zdroj stejnosměrného proudu (6 V), kádinka, roztok  $\text{CuSO}_4$  (asi 1:10), 2 uhlíky z monočlánku, ampérmetr do 1 A, voltmetr, reostat, 2 Holtzovy svorky, vypínač.

*Postup:* obvod sestavíme podle Obr.5.19. Nejdříve použijeme jako anodu a katodu dvě uhlíkové elektrody. Po jisté době průchodu proudu elektrolytem zjistíme, že se na katodě vyloučila vrstvička mědi. Nyní katodu poněkud povytáhneme z elektrolytu a změním polaritu elektrod. Pozorujeme, že nejprve dochází k odstraňování mědi z bývalé katody (nynější anody) a teprve poté se na ní začnou vylučovat bublinky plynu. Zaměníme – li uhlíkové elektrody elektrodami měděnými, pozorujeme, že na katodě se bude měď



ukládat, zatímco anoda bude postupně rozleptávána (žáci tyto děje doprovodí chemickými rovnicemi příslušných reakcí).

**Poznámka:** roztok skalice modré nahradíme roztokem soli kamenné, kyseliny sírové hydroxidu draselného, aj. a zkoumat, jak se v těchto elektrolytech chovají různé elektrody.

### **Pokus 28. Polarizace článku.**

**Potřeby:** elektrody Pt (nahradíme uhlíkovými, nebo Ni elektrodami), zředěná  $H_2SO_4$  (1:5), zdroj stejnosměrného proudu (6 – 12 V), galvanometr, klíč.

**Postup:** zapojíme obvod podle Obr.5.20 a ponecháme proud chvíli procházet do okamžiku, kdy se na elektrodách začínají objevovat ve větší míře bublinky plynu (na katodě vodík, na anodě kyslík). Odpojíme – li nyní zdroj, zjistíme galvanoměrem, že mezi elektrodami je elektrické napětí – vznikl tzv. plynový (polarizační) článek, tvořený soustavou *vodík – kyselina sírová – kyslík*. Toto napětí trvá pouze tak dlouho, dokud jsou na elektrodách přítomny plyny. Spojíme – li nyní elektrody polarizačního článku vodičem přes žárovku (2 V), pozorujeme pozvolný pokles svítivosti žárovky, jak postupně mizí bublinky plynů.

**Jiná varianta pokusu:** sestavíme Voltův článek (elektrody Cu a Zn, elektrolytem opět zředěná  $H_2SO_4$ ). V tomto případě není samozřejmě potřebný žádný zdroj emn. Po ponoření elektrod do elektrolytu vznikne mezi nimi rozdíl potenciálů asi 1 V, který opět postupně klesá v důsledku polarizace článku. Vytáhneme – li měděnou elektrodu z elektrolytu a otřeme – li ji, napětí opět vzroste. Nahradíme – li měděnou elektrodu elektrodou uhlíkovou a místo roztoku kyseliny sírové použijeme roztoku salmiaku ( $NH_4Cl$ ), dostaneme článek Leclancheův. I tento článek se postupem času polarizuje a proto do elektrolytu nalijeme roztok manganistanu draselného, který okyslíčí vodík na vodu a tím odstraní polarizaci článku.

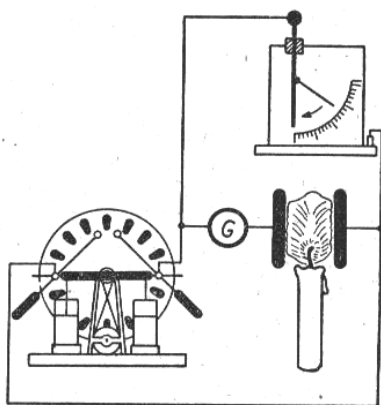
## **5.4. Elektrický proud v plynech a ve vakuu.**

### **Pokus 29. Model ionizovaného plynu.**

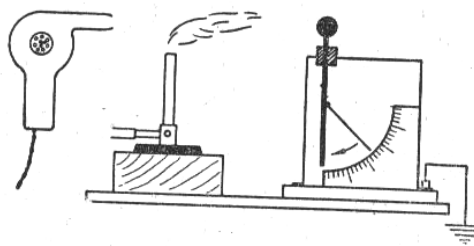
**Potřeby:** deskový kondenzátor, korkový nebo hliníkový prášek, indukční elektrika.

**Postup:** desky kondenzátoru postavíme vodorovně a spodní z nich posypeme korkovým nebo hliníkovým práškem. Desky připojíme k indukční elektrice a otáčíme klikou. Částičky se začnou pohybovat mezi deskami.

**Závěr:** pohyb částíček modeluje přibližně pohyb částic plynu mezi nabitými elektrodami.



Obr.5.21. Ionizační účinky plamene



Obr.5.22. Ionizační účinky plamene.

### **Pokus 30. Nesamostatný výboj, ionizátory.**

*Potřeby:* elektroskop, kahan.

*Postup:* do blízkosti nabitého elektroskopu umístíme plamen kahanu. Elektroskop velmi rychle ztratí náboj bez ohledu na to, zda byl nabit kladně, či záporně.

*Závěr:* ionizovaný plyn plamene a jeho záření způsobí ionizaci plynu mezi listky elektroskopu a tedy jeho rychlé vybití.

### **Pokus 31. Nesamostatný výboj, ionizátory.**

*Potřeby:* deskový kondenzátor, indukční elektrika, elektroskop, galvanometr, kahan, vysoušeč vlasů.

*Postup:* kondenzátor, spojený s elektrometrem podle Obr. 5.21 nabijeme dotykem s póly indukční elektriky. Na elektroskopu budeme pozorovat stálou výchylku. Vsuneme – li plamen kahanu mezi desky kondenzátoru tak, aby plyny, vzniklé hořením stoupaly vzhůru mezi deskami, bude výchylka elektrometru klesat.

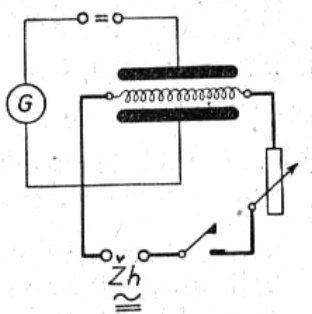
*Závěr:* plyny plamene jsou vždy ionizovány. Zároveň dochází k ionizaci atomů vzduchu mezi elektrodami světelnými a tepelnými účinky plamene. O tom, že horké plyny plamene způsobují ionizaci se přesvědčíme tak, že horký vzduch a spaliny z Bunsenova hořáku foukáme vysoušečem vlasů mezi desky elektroskopu (Obr.5.22).

### **Pokus 32. Nesamostatný výboj, ionizátory.**

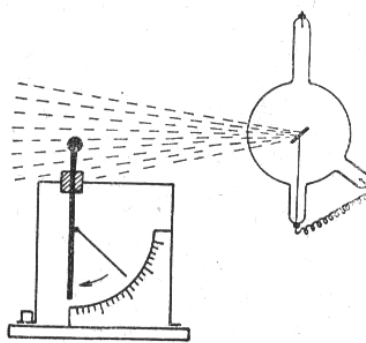
*Potřeby:* zdroj stejnosměrného proudu (napětí cca 300 V), kondenzátor, galvanometr, žhavicí zdroj, žhavené odporové vlákno, reostat.

*Postup:* obvod zapojíme podle Obr.5.23. Kondenzátor nabijeme asi na 300 V. Mezi desky kondenzátoru zavedeme tenký odporový drát, který rozžhavíme žhavicím proudem. Po rozžhavení vlákna pozorujeme na citlivém galvanometru malý proud, který je tím vyšší, čím více žhavíme vlákno.

*Závěr:* elektrony, emitované ze žhaveného vlákna jsou urychlovány elektrickým polem a ionizují neutrální atomy vzduchu.



Obr.5.23. Ionizace plynu

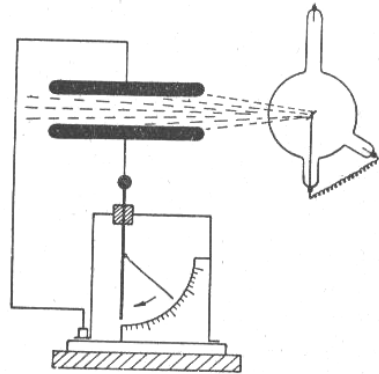


Obr.5.24. Ionizační účinky rtg (nebo uv) lampy.

### Pokus 33. Nesamostatný výboj, ionizátory.

*Potřeby:* elektroskop, kondenzátor, uv lampa, rtg lampa.

*Postup:* vzduch mezi deskami kondenzátoru můžeme ionizovat i pomocí rtg lampy, nebo uv lampy (pozor na nebezpečí!) – viz Obr. 5.24 a 5.25.



5.25. Ionizační účinky rtg a uv lampy.

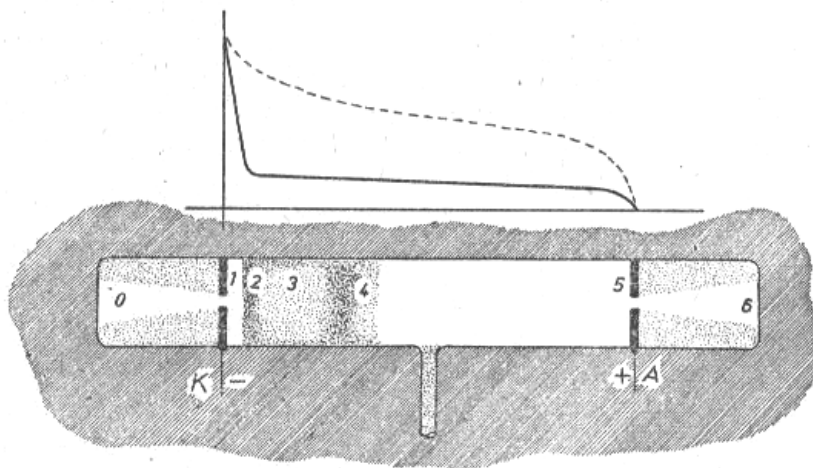
### Pokus 34. Studium katodových paprsků.

*Potřeby:* Ruhmkorffův induktor, různé vakuové trubice, permanentní magnet.

*Postup:* a) *studium doutnavého výboje.* Trubicí, vyčerpanou na tlak asi  $6,6 \cdot 10^2 \text{ Pa}$ , připojíme na Ruhmkorffův induktor. V trubici získáme tzv. doutnavý výboj (Obr. 5.26), v němž rozeznáváme následující oblasti:

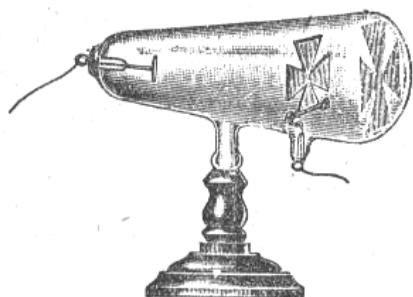
1. růžové doutnavé světlo přímo na katodě (katodová svítící vrstva),
2. první tmavý prostor (Antonův temný prostor),
- 2 – 3 . modré doutnavé světlo,
- 3 - 4. druhý tmavý prostor (Crooksův temný prostor),
- 4 – 5. červenavý rozvrstvený anodový sloupec,
- 1 – 0. světlo kanálových paprsků (kladných iontů),
- 5 – 6. světélkování katodových paprsků (elektronů).

V horní části obrázku je uveden spád napětí v trubici. Čárkovaně za normálního tlaku, plná čára při tlaku 0,02 torr.

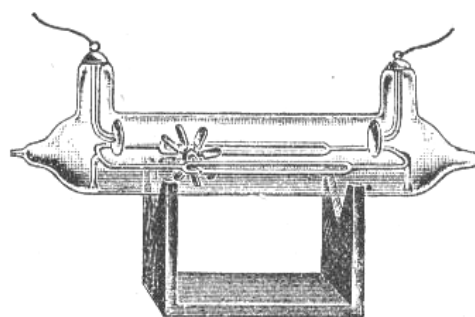


Obr.5.26. Doutnavý výboj za tlaku cca  $6,6 \cdot 10^2 \text{ Pa}$ .

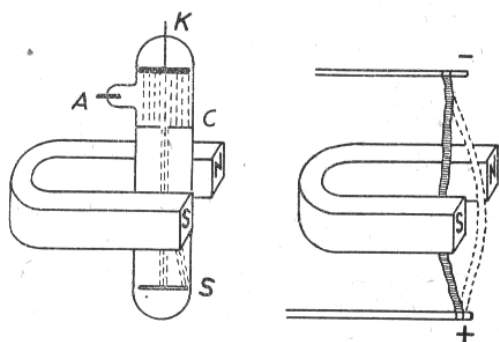
- b) *Katodová trubice s Maltézským křížem.* Tato trubice (Obr.5.27) dokumentuje vznik záření, tzv. katodových paprsků (elektronů). Pomocí permanentního magnetu můžeme dokázat, že se jedná o proud nabitých částic.
- c) *Mechanické účinky katodových paprsků.* Katodové paprsky roztočí mlýnek (Crooksův mlýnek – Obr.5.28).
- d) *Odchylka katodových paprsků v magnetickém poli.* Použijeme tzv. Braunovy trubice (Obr.5.29), v níž je clonkou vymezen úzký svazek katodových paprsků. Trubicí vložíme mezi póly permanentního magnetu. Pomocí vztahu pro Lorenzovu sílu můžeme dokázat, že se jedná o záporně nabitě částice, tedy o elektrony.
- e) *Odchylka katodových paprsků v elektrickém poli.* Na Obr.5.30 je uveden pokus, umožňující určit znaménko náboje katodových paprsků pomocí elektrické síly. Na Obr.5.32 je schematicky znázorněn tzv. Perrinův pokus, který rovněž dokazuje, že náboj katodových paprsků je záporný.



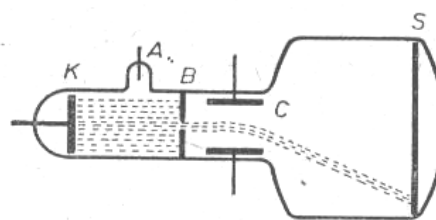
Obr.5.27. Maltézský kříž.



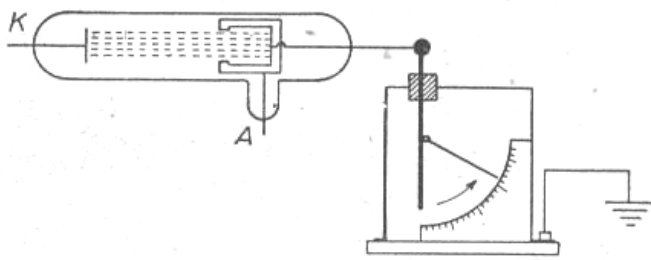
Obr.5.28. Crooksův mlýnek



Obr.5.29. Vychýlení katodových paprsků magnetickým polem.



Obr.5.30. Vychýlení katodových paprsků elektrickým polem.



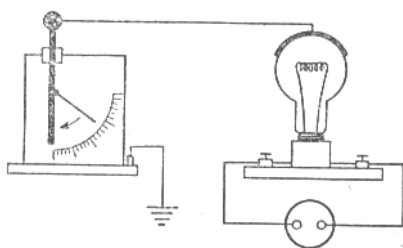
Obr.5.31. Perrinův pokus.

**Pokus 35. Emise elektronů z rozžhaveného kovu (Edisonův pokus).**

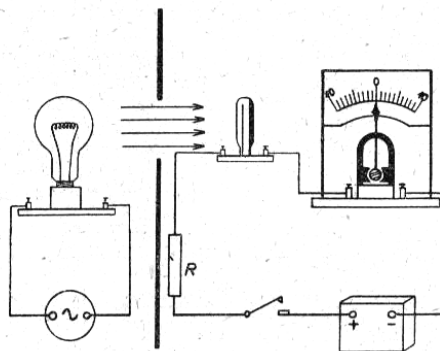
*Potřeby:* žárovka s kovovým, nebo uhlíkovým vláknem a nalepeným kloboučkem ze staniolu v objímce, elektroskop, tenký drát, skleněná a ebonitová tyč, spojovací vodiče.

*Postup:* sklo žárovky musí být suché, je vhodné natřít žárovku od staniolu až k objímce šelakem. Ke staniolu připevníme dva tenké lístky z hedvábného papíru, nebo spojíme staniol tenkým drátkem s elektroskopem (Obr.5.32). Pokud neprochází vláknem žárovky proud, nabijeme skleněnou tyčí (kladným nábojem) staniol a s ní spojený elektroskop. Jakmile zapojíme žhavicí proud, vlákno žárovky se rozžhává, lístky poklesnou, elektroskop se vybije. Elektrony, vystupující z vlákna dolétly na skleněnou vnitřní stěnu baňky, ta se nabíla záporně a tím se kladný náboj staniolu neutralizoval.

*Závěr:* rozžhavená tělesa (kovy) emitují ze svého povrchu záporně nabitě částice – elektrony.



Obr.5.32. Edisonův pokus.



Obr.5.33. Studium vlastností fotonky.

**Pokus 36. Vlastnosti fotonky.**

*Potřeby:* fotonka, citlivý galvanometr (0,2 – 1 mA), nebo mikroampérmetr, zdroj ss proudu, výkonná žárovka, různobarevná skla (filtry), spojovací vodiče.

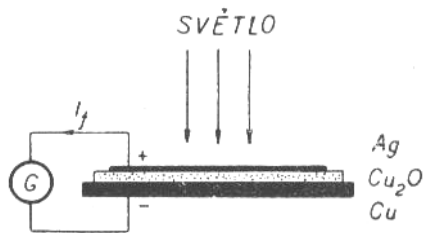
*Postup:* Zapojíme obvod podle Obr.5.33. V tomto zapojení pracuje fotonka jako proměnný odpor, jehož velikost je v úplné tmě nekonečná a s rostoucím osvětlením klesá až k jisté pro ni charakteristické hodnotě. Proměříme závislost fotoproudu na intenzitě osvětlení (přibližováním a vzdalováním od fotonky) a na barvě dopadajícího světla.

### **Pokus 37. Vlastnosti fotovoltaických článků.**

*Potřeby:* fotovoltaický (nebo hradlový selenový) článek, galvanometr, barevné filtry, různé zdroje světla, čočka.

*Postup:* článek zapojíme podle Obr.5.34. Osvětíme jej buď přímo, nebo pomocí čočky a sledujeme:

- závislost fotoproudu na intenzitě osvětlení
- závislost fotoproudu na zdroji světla
- závislost fotoproudu na barvě dopadajícího světla..



Obr.5.34. Studium fotovoltaických a hradlových článků.

## **5.5. Magnetismus, Elektromagnetická indukce.**

### **Pokus 38. Základní vlastnosti permanentních magnetů.**

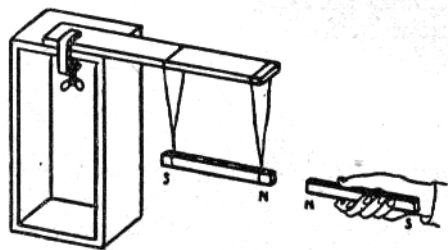
*Potřeby:* 2 tyčové magnety, podkovovitý magnet, magnetka, malé hřebíčky, železné piliny, tuhý papír, skleněná deska, dřevěná deska, rám na zavěšení magnetu, tyčinka z magneticky měkkého materiálu, dlouhé vlákno.

*Postup:* a) *póly magnetu.* Na papírovou desku nasypeme železné piliny a položíme na ni magnet. Po zvednutí magnetu vidíme, že se piliny zachytily na jeho koncích (pólech) a uprostřed nejsou žádné.

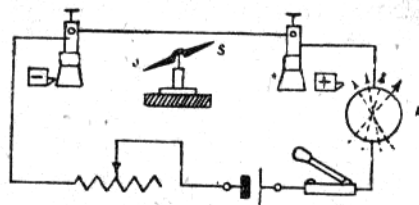
b) *směrová vlastnost magnetu.* Na dlouhý závěs, upevněný u stropu, zavěšíme permanentní magnet, upevněný v nemagnetickém (papírovém) pouzdře. Pokus provádíme v místě, kde nejsou žádné feromagnetické materiály (trubky, apod.). Magnet se zastaví ve směru sever – jih (až na malou odchylku, tzv. deklinaci, způsobenou rozdílem mezi polohou geografických a magnetických pólů Země. Deklinace je ovlivněna v některých místech např. i přítomností ložisek železné rudy pod povrchem Země.

c) *Interakce mezi póly magnetu.* Permanentní magnet zavěšíme podle Obr.5.35 a sledujeme přitahování a odpuzování pólů dvou permanentních magnetů.

d) *Magnetování materiálu.* Magnetem posouváme ledním směrem podél tyčinky z magneticky měkkého materiálu (oceli). Položíme – li poté tyčinku do železných pilin, zjistíme, že jsme tyčinku zmagnetovali. Chceme – li i odmagnetovat, musíme ji zahřát nad tzv. Curieovu teplotu, která je pro ocel cca 770 °C, tj je to teplota červeného žáru.



Obr. 5.35. Základní vlastnosti permanentních magnetů.



Obr.5.36. Magnetické účinky elektrického proudu

### **Pokus 39. Siločáry magnetického pole.**

*Potřeby:* tyčový a podkovovitý magnet, deska skleněná, nebo zhotovená z plexiskla, 2 Holtzovy svorky, 2 hliníkové tyčky (stačí i dřevěné), železné piliny.

*Postup:* skleněnou desku umístíme do vodorovné polohy pomocí nemagnetických tyčinek a Holtzových svorek. Pod desku upevníme různé permanentní magnety (tyčové a podkovovité do vzájemně různě orientovaných poloh). Desku posypeme železnými pilinami a dřevěným kladívkem ji jemně poklepeme. Piliny se uloží směru výsledného pole, vzniklého složením jednotlivých magnetických polí permanentních magnetů (ve směru siločar).

### **Pokus 40. Magnetické účinky elektrického proudu.**

*Potřeby:* zdroj stejnosměrného proudu (6 V), ampérmetr, Holtzovy svorky, silnější vodivý drát, reostat, magnetka, vypínač, silné spojovací vodiče.

*Postup.* Zapojíme obvod podle Obr.5.36. Před započítím pokusu necháme magnetku ustavit svoji orientaci ve směru sever – jih. Vodič, kterým zatím neprochází elektrický proud, orientujeme rovnoběžně s magnetkou, tj. ve směru sever – jih. Drát upevníme nad magnetkou, zapojíme proud a pozorujeme výchylku magnetky (ta se snaží zorientovat ve směru magnetického pole vodiče, tj. kolmo k němu). Při změně směru proudu ve vodiči se bude magnetka otáčet opačně. Dále můžeme sledovat závislost výchylky magnetky na intenzitě elektrického proudu, procházejícího vodičem.

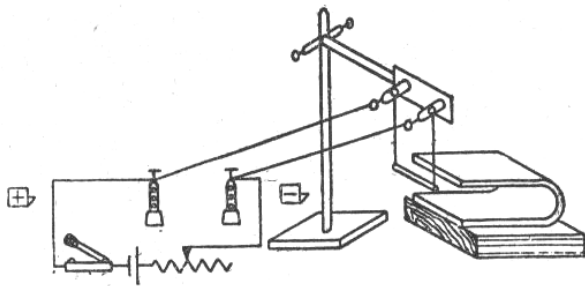
*Závěr:* kolem vodiče s proudem se indukuje magnetické pole, které je kolmé na směr elektrického proudu, procházejícího vodičem. Směr siločar je dán pravidlem pravé ruky (nebo Biotovým – Savartovým – Laplaceovým zákonem).

### **Pokus 41. Pohyb vodiče v magnetickém poli.**

*Potřeby:* permanentní podkovovitý magnet, 2 Holtzovy svorky, vodiče, reostat, zdroj proudu, stojan, vodivá tyčinka.

*Postup:* pokus sestavíme podle Obr.5.37. Zapojíme elektrický proud a tyčinka bude buď vtažena, nebo vypuzována z oblasti magnetického pole mezi póly podkovovitého magnetu (podle směru proudu, který tyčinkou prochází)..

*Závěr:* výsledek pokusu dokazuje platnost Ampérova zákona (Flemingova pravidla levé ruky).



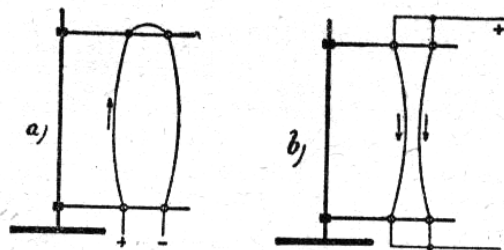
Obr.5.37. Vodič s proudem v magnetickém poli

**Pokus 42. Vzájemné působení vodičů s proudem.**

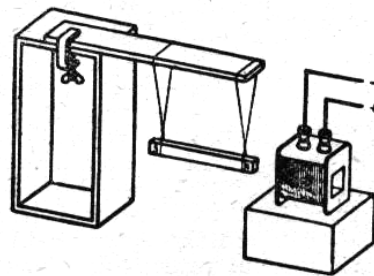
*Potřeby:* Zdroj stejnosměrného proudu (3 – 5 V), reostat, stojan (cca 1 m vysoký), dva dlouhé vodiče, spojovací vodiče, vypínač.

*Postup:* vodiče zavěsíme svisle na stojan podle Obr.5.38. Proudí – li elektrický proud vodiči proti sobě, pak se vodiče navzájem odpuzují, proudí – li stejným směrem budou se přitahovat.

*Závěr.* Současným použitím Biot, Savart, Laplaceova zákona a zákona Ampérova zdůvodníme vzájemnou interakci vodičů s proudem.



Obr.5.38. Vzájemné působení vodičů s proudem.



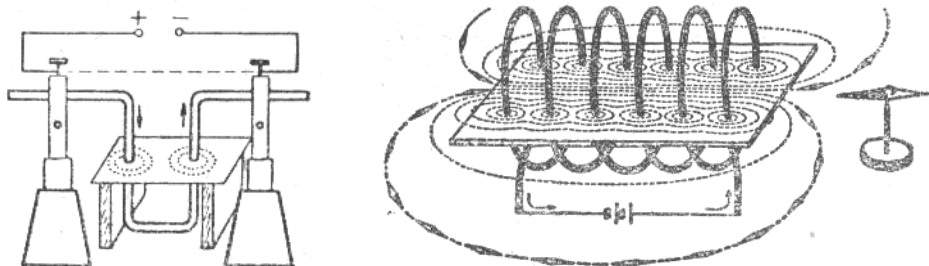
Obr.5.40. Vzájemné působení permanentního magnetu a elektromagnetu

**Pokus 43. Magnetické pole solenoidu (závitu).**

*Potřeby:* 2 Holtzovy svorky, zdroj proudu (3 – 6 V), Kartónová deska s výřezy pro závity cívky, cívka s řídkými závity silnějšího drátu, železné piliny, reostat, ampérmetr.

*Postup:* Pokus sestavíme podle Obr.5.39a ,b). Závitem i solenoidem necháme protékat proud dosti vysoké intenzity (až 8 A). Kartón posypeme železnými pilinami, které budou kopírovat tvar siločar magnetického pole závitu a solenoidu.





Obr.5.39.a) magnetické pole závitů a b) solenoidu

**Pokus 44. Síly mezi permanentním magnetem a elektromagnetem.**

*Potřeby:* Tyčový magnet, cívka (300 závitů), dřevěný stojánek se svorkami, zdroj s stejnosměrného proudu (6 V).

*Postup:* pokus sestavíme podle Obr.5.40. Podle směru proudu, procházejícího cívku je permanentní magnet buď vtahován do cívky, nebo z ní vypuzován. Studenti si ověří platnost Faradayova zákona elektromagnetické indukce a Lencova pravidla pro směr indukovaného elektrického proudu.

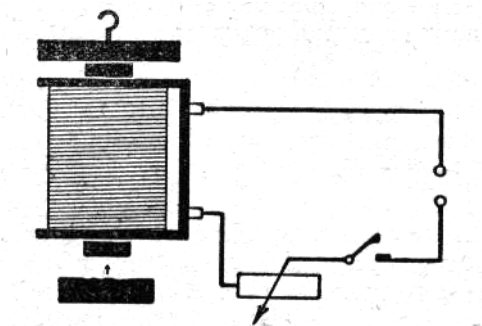
*Závěr:* cívka (elektromagnet) se chová jako permanentní magnet.

**Pokus 45. Elektromagnet a jeho vlastnosti.**

*Potřeby:* zdroj stejnosměrného proudu (6 V), cívka (300 závitů), železné jádro, reostat (10Ω), ocelové závaží, vypínač, spojovací vodiče.

*Postup:* Pokus uspořádáme podle Obr.5.41. Zjistíme, že takto vyrobený elektromagnet může unést i poměrně těžké závaží. Je třeba dbát, aby nedošlo k proudovému přetížení cívky (ochranou je reostat). Proud cívku by neměl překročit hodnotu 6 A.

*Závěr:* cívka, kterou prochází elektrický proud vytvoří tzv. elektromagnet, jehož magnetické pole je tím silnější, čím je vyšší hodnota intenzity elektrického proudu, který prochází cívku. Železné jádro v cívce zvyšuje značně magnetickou indukci elektromagnetu.



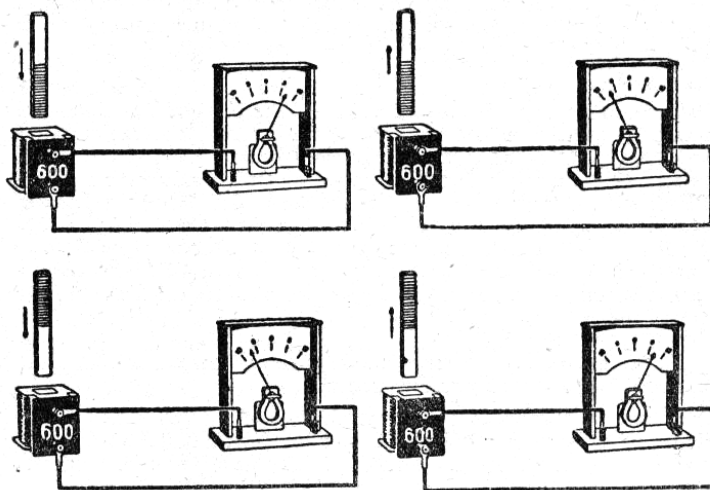
Obr.5.41. Princip průmyslového elektromagnetu.

#### **Pokus 46. Elektromagnetická indukce.**

*Potřeby:* demonstrační galvanometr s bulou uprostřed, tyčový magnet, cívky s 300, 600 a 1200 závitů, spojovací vodiče.

*Postup:* Pokus sestavíme podle Obr.5.42. Indukované emn. závisí na rychlosti zasouvání magnetu, na směru zasouvání a na počtu závitů cívky. Všechny jevy, které pozorujeme, lze alespoň kvalitativně popsat pomocí Faradayova zákona elektromagnetické indukce a pomocí Lencova pravidla.

*Závěr:* - indukované emn. roste s rychlostí změny magnetické indukce,  
- indukované emn. roste s růstem počtu závitů (roste plocha S).

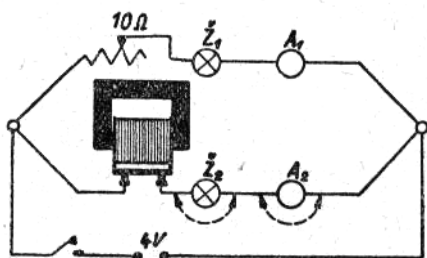


Obr.5.42. Základní pokusy, dokazující jev elektromagnetické indukce.

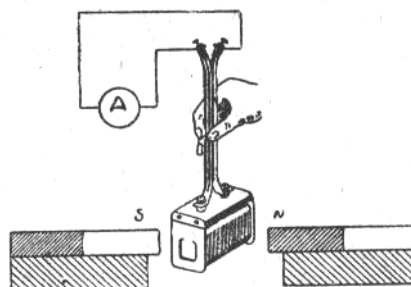
#### **Pokus 47. Vlastní indukčnost (samoindukce).**

*Potřeby:* zdroj stejnosměrného proudu (4 V), akumulátor, žárovky (3,5 V, 0,2 A), reostat, cívka s 1200 závitů a ferromagnetickým jádrem.

*Postup:* obvod sestavíme podle Obr.5.43. V jedné větvi obvodu je zapojena cívka s velkou indukčností a ve druhé je zapojen reostat, který má stejný ohmický odpor, jako je ohmický odpor cívky. Na obou větvích je tedy stejný úbytek napětí. Zapojíme elektrický proud a reostatem nastavíme odpor tak, aby obě žárovky svítily stejně jasně. Žárovka  $\check{Z}_2$  se rozsvítí později, než žárovka  $\check{Z}_1$ . Z toho plyne, že v cívce L dosáhne proud plné hodnoty později, než ve větvi s reostatem R, ač jsou oba odpory stejné a je na nich stejné napětí. Vyjmeme – li železné jádro z cívky, je vlastní indukčnost cívky menší a žárovky se rozsvítí téměř současně. Nahradíme – li žárovky ampérmetry, budeme pozorovat, že údaj ampérmetru  $A_2$  ve větvi s indukčností stoupá pomalu na plnou výchylku.



Obr.5.43. Studium samoindukce



Obr.5.44. Vznik střídavého proudu.

**Pokus 48. Vznik střídavého proudu.**

*Potřeby:* 2 tyčové magnety, cívka s 1200 závity, železné jádro, galvanometr s nulou uprostřed, spojovací vodiče, možno použít i osciloskop.

*Postup:* sestavíme pokus podle Obr.5.44. Cívkou otáčíme mezi póly magnetu a na ampérmetru pozorujeme hrubý obraz sinusoidálně se měnícího střídavého proudu. Místo ampérmetru můžeme použít osciloskop.

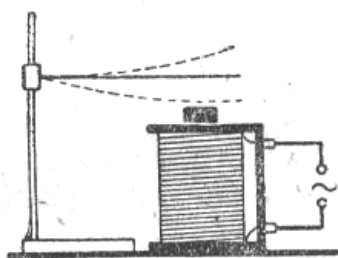
*Závěr:* při periodické změně magnetického toku (skalárního součinu magnetické indukce a vektoru plochy) vzniká střídavý proud.

**Pokus 49. Frekvence střídavého proudu.**

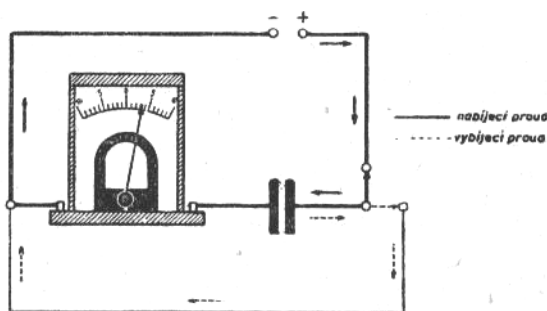
*Potřeby:* cívka s 1200 závity, ocelový pružný pásek.

*Postup:* pokus sestavíme podle Obr.5.45. Bude – li cívkou procházet střídavý proud (napětí snížíme na bezpečnou hodnotu cca 24 V), budeme pozorovat, že pružný pásek se mírně chvěje. Úpravou jeho délky posouváním ve svěráku najdeme jeho optimální délku, při níž rezonuje, tj. má maximální výchylku. V tomto případě je frekvence mechanických kmitů pásku rovna dvojnásobku frekvence střídavého elektrického proudu.

*Závěr:* pásek je přitahován k elektromagnetu při kladné a záporné půlplně střídavého proudu. Proto je rozkmitán s dvakrát větší frekvencí, než je frekvence střídavého proudu.



Obr. 5.45. Měření frekvence střídavého proudu.



5.46. Kondenzátor v elektrické obvodu.

**Pokus 50. Kondenzátor v elektrickém obvodu.**

*Potřeby:* blokový kondenzátor 2 – 8  $\mu\text{F}$ , anodová baterie (90 – 100 V), demonstrační galvanoměr přepojovač, spojovací vodiče, sada dalších blokových kondenzátorů

*Postup:* zapojíme obvod podle Obr.5.46. Při nabíjení výchylku galvanometru – zjistíme, že stejnosměrný proud protéká do té doby, než je napětí na kondenzátoru stejně velké, jako je napětí zdroje. Při vybíjení pozorujeme, že jakmile přerušíme obvod, bude ještě krátký okamžik obvodem protékat vybíjecí proud. Nahradíme – li zdroj stejnosměrného proudu zdrojem proudu střídavého, pozorujeme, že čím větší je kapacita kondenzátoru, tím větší bude proud kondenzátorem.

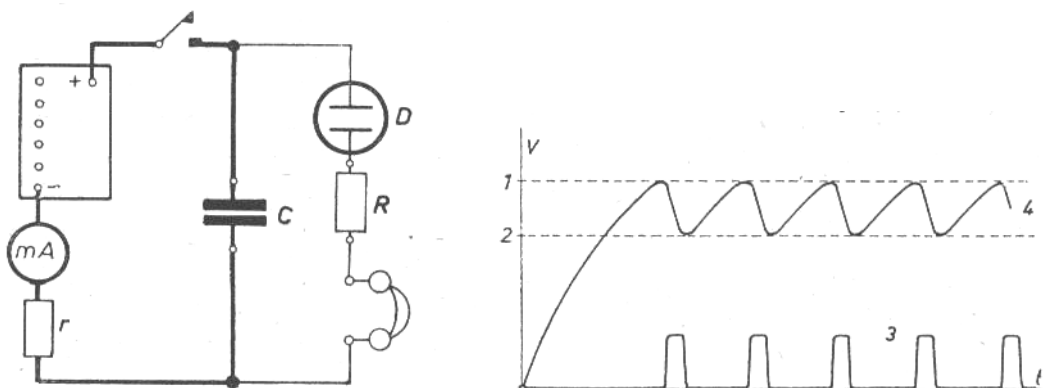
*Závěr:* stejnosměrný proud prochází obvodem s kondenzátorem vždy jenom krátký okamžik (závislý na kapacitě kondenzátoru) a to při sepnutí a přerušení obvodu. Střídavý proud prochází obvodem s kondenzátorem stále, odpor je nepřímo úměrný kapacitě kondenzátoru.

### **Pokus 51. Generátor pilovitých kmitů.**

*Potřeby:* vypínač, anodová baterie (90 – 200 V), kondenzátory 40  $\mu\text{F}$ , 20  $\mu\text{F}$ , 4  $\mu\text{F}$ , 2  $\mu\text{F}$ , miliampérmetr, osciloskop, rezistory 10  $\text{k}\Omega$ , 20  $\text{k}\Omega$ , 100  $\text{k}\Omega$ , 500  $\text{k}\Omega$ , 1  $\text{M}\Omega$ , 2  $\text{M}\Omega$ , doutnavka (zápalné napětí 90 – 100 V, ochranný odpor doutnavky (10 – 50  $\text{k}\Omega$ ), reproduktor (4000  $\Omega$ )

*Postup:* zapojení provedeme podle Ob.5.47. Nejprve zapojíme obvod bez kondenzátoru a zjistíme, při jakém napětí se doutnavka rozsvítí. Nastavíme vhodný rozsah miliampérmetru a zaznamenejme velikost proudu. Pak zvýšíme napětí asi o 10 – 20 V a připojíme kondenzátor. Pak zapojíme vypínač a nabijeme kondenzátor. Napětí na kondenzátoru začne růst a doutnavka se zapálí za několik sekund, nebo i minut (což závisí na kapacitě kondenzátoru, napětí a odporu). Po zapálení doutnavky se začne kondenzátor vybíjet obvodem přes reproduktor. Vybíjení je rychlejší při malém odporu (10 – 20  $\text{k}\Omega$ ) a pomalejší při vyšším odporu (100  $\text{k}\Omega$ ). Kondenzátor se však stále nabíjí. Je-li nabíjecí proud malý (odpor nad 500  $\text{k}\Omega$ ) doutnavka sama po čase zhasne, protože se napětí na ní neudrží nad hodnotou jejího zhášecího napětí. Je – li však nabíjecí odpor menší (pod 500  $\text{k}\Omega$ ), stačí nabíjecí proud k tomu, aby se udrželo napětí na kondenzátoru vyšší, než napětí zhášecí. Doutnavka už vůbec nezhasne, dokonce bude svítit ještě chvíli i po vypnutí vypínače. Vypneme vypínač a kondenzátor zhratem vybijeme.

Při dosti velkém odporu (kolem 1  $\text{M}\Omega$ ), při kapacitě 20  $\mu\text{F}$  a  $R$  kolem 10  $\text{k}\Omega$  zapneme vypínač. Doutnavka se rozsvítí po jisté době nabíjení kondenzátorů, ale svítí pouze chvíli (kondenzátor se rychle vybije). Vypínač necháme zapnutý a za podstatně kratší dobu se kondenzátor podruhé nabije na zápalné napětí doutnavky, doutnavka se rozsvítí, atd. Dokud je vypínač zapnut, doutnavka se pravidelně rozsvěcuje a zhasíná, vznikly tzv. *pilovité kmity*.

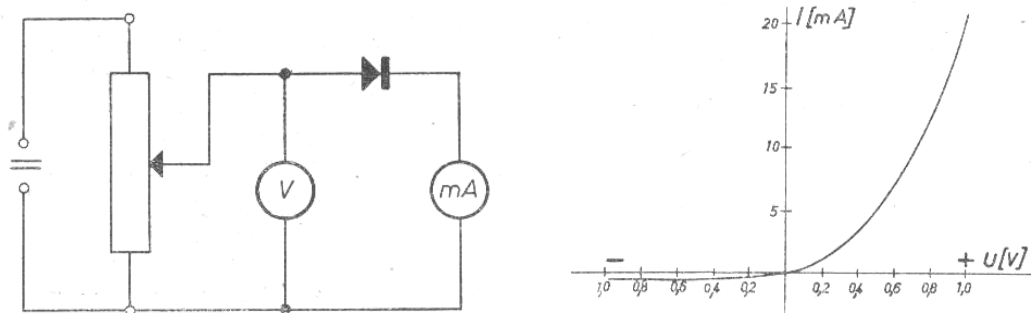


Obr.5.47. Pilovité kmity (schéma a tvar).

### Pokus 52. Charakteristika polovodičové diody.

Potřeby: reostat, zdroj stejnosměrného proudu (2 – 6 V), voltmetr, ampérmetr (oba přístroje nejlépe s nulou uprostřed), dioda, spojovací vodiče.

Postup: Obvod zapojíme podle Obr.5.48. Potenciometrem zvyšujeme napětí na diodě a zapisujeme proud diodou. Tím získáme tzv. voltampérovou charakteristiku polovodičové diody v propustném i závěrném směru. Celou úlohu lze snadno změnit tak, že využijeme osciloskop.

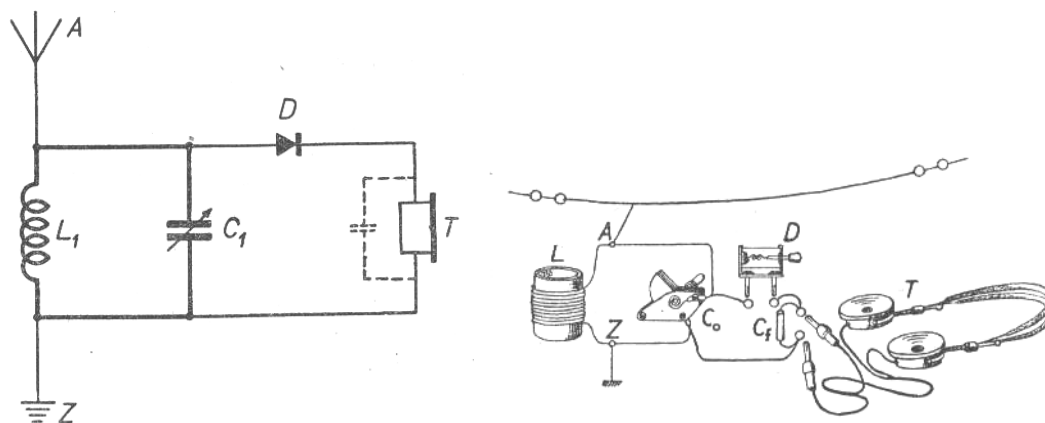


Obr.5.48. Voltampérová charakteristika polovodičové diody.

### Pokus 53. Krystalový přijímač.

Potřeby: cívka (asi 60 závitů), ladící kondenzátor, sluchátka, ladící kondenzátor, anténa, uzemnění, polovodičová dioda.

Postup: obvod sestavíme podle obr.5.49. Změnou kapacity ladícího kondenzátoru vybereme vhodnou rezonanční frekvenci (frekvenci vysílání blízké rádiové stanice)



Obr.5.49. Schéma krystalového přijímače.

## Literatura:

- [1] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.: *Fyzika*. VUTIUM Brno, PROMETHEUS Praha, 2000
- [2] *Lekcionnyje demonstracii po fizike*. Red. V.I. Petrova, Moskva, Nauka 1972
- [3] Hlavička, A.: *Pokusy z elektřiny*. SPN Praha, 1955
- [4] Trna, J.: *Fyzika v pokusech (elektrostatika)*. Directfilm, Brno 2002
- [5] Trna, J.: *Fyzika v pokusech (elektrický proud v kovech a polovodičích)*. Directfilm, Brno 2002.