

ELEKTRICKÝ PROUD V LÁTKÁCH

Elektronová vodivost

Elektrický proud v kovech

Zákony pro elektrický proud v kovech

Elektrický proud v polovodičích

Elektrický proud v kapalinách

Zákony elektrického proudu v kapalinách

Elektrický proud v plynech a jeho zákonitosti

Elektronová vodivost kovů

Kovy vedou elektrický proud prostřednictvím volných elektronů, vysvětlení podává **teorie elektronové vodivosti kovů**. Podle této teorie tvoří elektrický proud v kovech pouze tzv. vodivostní elektrony, které vykonávají v kovu tepelný pohyb. Střední rychlost tohoto pohybu je řádově $10^5 - 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, s teplotou se téměř nemění.

V elektrickém poli o intenzitě \vec{E} působí na každý vodivostní elektron síla $\vec{F} = -e\vec{E}$, kde e je velikost náboje elektronu. Působením této síly získávají elektrony unášivou rychlost a pohybují se ke kladnému pólu zdroje. Ve vodiči vzniká stejnosměrný proud. Velikost unášivé rychlosti je $10^{-6} - 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Získanou hybnost předávají vodivostní elektrony krystalové mříži kovového vodiče a tím si vykládáme existenci elektrického odporu kovového vodiče. Elektrický proud v kovech je usměrněný pohyb vodivostních elektronů. Kovy jsou velmi dobrými vodiči elektrického proudu.

Závislost elektrického proudu I na elektrickém napětí U za předpokladu konstantní teploty udává Ohmův zákon.

Ohmův zákon pro část obvodu: $I = \frac{U}{R}$, kde R je elektrický odpor vodiče. Jeho jednotkou je ohm, Ω . Veličina $G = \frac{1}{R}$ je elektrická vodivost. Ohmův zákon pro uzavřený obvod: $I = \frac{U_e}{R_i + R}$, kde U_e je elektromotorické napětí zdroje. R_i vnitřní odpor zdroje a R odpor vnější části obvodu. Veličina $R_e = R_i + R$ je celkový odpor obvodu. Elektrické napětí U se nazývá svorkové napětí zdroje, $U = IR$. Závislost elektrického odporu kovového vodiče na jeho geometrických rozměrech, teplotě a látce, z které je vodič, udávají vztahy:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad R = R_0(1 + \alpha \Delta t),$$

$$(\text{resp. } R = R_0(1 + \alpha \Delta T)).$$

kde ρ je měrný elektrický odpor (s jednotkou $\Omega \cdot \text{m}$) a α teplotní součinitel elektrického odporu (s jednotkou K^{-1}). Veličina $\gamma = \frac{1}{\rho}$ je měrná elektrická vodivost (s jednotkou $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$).

Při sériovém spojení rezistorů se celkový odpor rovná součtu odporů jednotlivých rezistorů, $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$.

Při paralelním spojení rezistorů se převrácená hodnota celkového odporu rovná součtu převrácených hodnot odporů jednotlivých rezistorů,

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

První Kirchhoffův zákon (pro uzel stejnosměrného obvodu): Při konstantním proudu je algebraický součet proudů pro daný uzel roven nule.

Druhý Kirchhoffův zákon (pro smyčku stejnosměrného obvodu): V uzavřeném obvodu s konstantním proudem je součet elektromotorických napětí zařazených zdrojů roven součtu úbytků napětí.

Elektrickou práci W ve vnější části obvodů s konstantním proudem vypočítáme ze vztahu $W = UIt = R I^2 t$.

Práci elektrického zdroje vypočítáme ze vztahu $W_z = U_e I t$.

Výkon konstantního proudu ve vnějším obvodu je dán vztahem $P = R I^2$.

Výkon zdroje v uzavřeném obvodu je: $P_z = U_e I = (R + R_i) I^2$. Teplo Q , které přijme vodič s procházejícím proudem, je rovno elektrické práci, tj. $Q = UIt$.

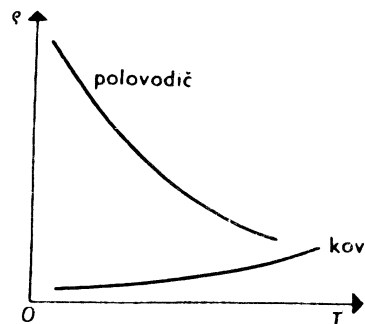
Účinnost zdroje η_z můžeme vyjádřit vztahy:

$$\eta_z = \frac{W}{W_z} = \frac{P}{P_z} = \frac{R}{R_i + R}$$

Vodivost polovodičů

Polovodiče jsou látky, jejichž měrný odpor se pohybuje za normální teploty v rozmezí řádů $10^{-2} \Omega \cdot \text{m}$ až $10^9 \Omega \cdot \text{m}$. Při nízkých teplotách jsou prakticky nevodivé, jsou izolanty. Do skupiny polovodičů patří např. uhlík (grafit), křemík, germanium, selen, telur, tj. prvky IV. skupiny Mendělejevovy tabulky a některé sloučeniny, a to i organické. Charakteristická vlastnost polovodičů – měrný odpor s teplotou klesá. Srovnání s kovy – měrný odpor kovů s rostoucí teplotou roste (viz obr. 1). Teplotní závislost odporu polovodiče se v praxi využívá v **termistorech**.

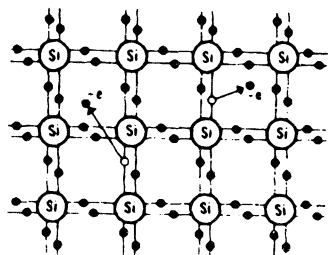
Termistor je jednoduchá polovodičová součástka (NiO , Fe_3O_4 , UO_2 apod.) a dvou elektrických přívodů. Lze jimi zprostředkovaně měřit teplotu látky s velkou přesností (až 10^{-3} K).



Obr. 1

Vlastní vodivost polovodiče

je založena na tom, že při vyšší teplotě mohou kmity atomů mřížky polovodiče vyvolat porušení vazeb mezi atomy. Poruší-li se některá vazba, vzniknou volné elektrony a současně s nimi díry. Jde o **generaci páru díra–volný elektron** (obr. 2). Díra je název absence elektronu ve vazbě mezi atomy. Má kladný náboj z přebytku kladného náboje jádra proti obalu. Zánik páru díra–volný elektron se jmenuje rekombinace.

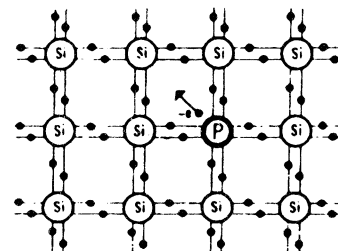


Obr. 2

Není-li polovodič v elektrickém poli, je pohyb děr a volných elektronů pouze chaotický. Je-li v něm elektrické pole, pohybují se díry ve směru \vec{E} a volné elektrony proti směru \vec{E} . Výsledný elektrický proud $I = I_e + I_d$, kde I_e nazýváme elektronovým proudem a I_d proudem děrovým. V praxi se mnohem častěji užívá **nevlastní (příměsové) vodivosti**. Rozlišujeme polovodiče typu N a polovodiče typu P.

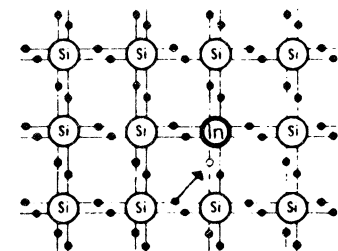
Polovodiče typu N (obr. 3)

Je polovodič s elektronovou vodivostí, negativní vodivostí N. Vznikne vpravením vícevalentního atomu do krystalické mřížky polovodiče. Například nahradíme některý atom čtyřmocného křemíku pětímocným atomem fosforu (substituční atom). Fosfor má pět valenčních elektronů. Při jeho zabudování do krystalové mřížky se čtyři



Obr. 3

Lze získat též polovodič s děrovou vodivostí neboli polovodič typu P. Zabuduje-li se do krystalu mřížky křemíku atom trojmocného prvku např. indiu In (obr. 4), chybí mu jeden valenční elektron na plné obsazení kovalentní vazby se čtyřmi atomy Si. Vznikne díra bez vzniku volného elektronu. Vodivost způsobená děrami se nazývá děrová vodivost polovodiče. Vodivost je pozitivní (kladná), proto jde o typ P.



Obr. 4

Příměsové atomy jsou buď dárce elektronů (donory) u typu N nebo jsou akceptory, příjemci vazbových elektronů, to se týká příměsí u typu P. Vcelku hovoříme o nevlastní vodivosti.

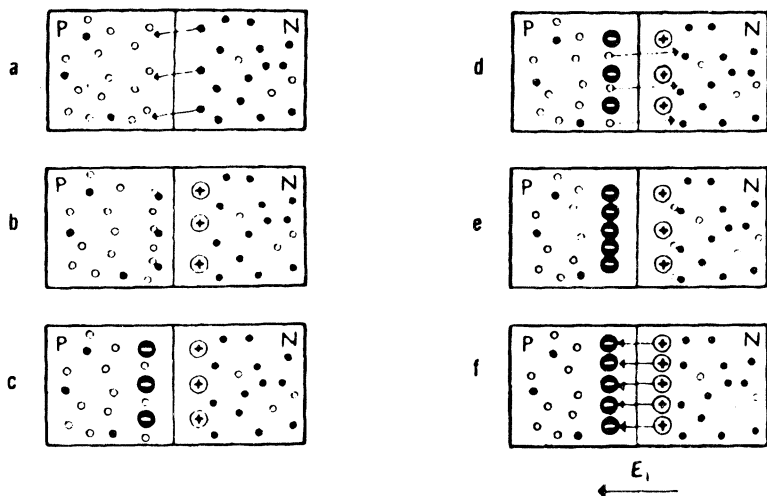
Diodový jev, vlastnosti přechodu PN

Přechod PN se v praxi vytváří v jediném kousku polovodiče, na obr. 5 je představa probíhajících dějů při vytvoření přechodu. Na přechodu PN se vytvoří oblast s malou koncentrací volně nabitých částic, která má v důsledku toho značný elektrický odpor.

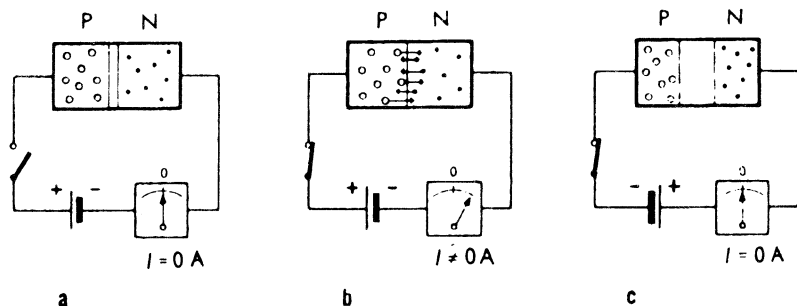
Zapojení přechodu PN do obvodu stejnosměrného proudu

Děje na přechodu PN sledujeme na obr. 6a. **Propustný směr**; kladný pól zdroje připojen na polovodič typu P, záporný na polovodič typu N. Na přechodu PN je

vytvořeno elektrické pole, které svými silami způsobuje difúzi děr a volných elektronů do přechodové vrstvy, odpor vrstvy klesá, obvodem protéká **propustný proud** (obr. 6b). **Závěrný směr** (obr. 6c), oblast ochuzována o díry a elektrony, odpor přechodu roste, protéká velmi malý proud závěrný.



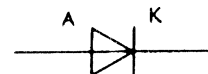
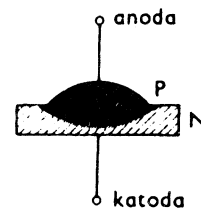
Obr. 5



Obr. 6

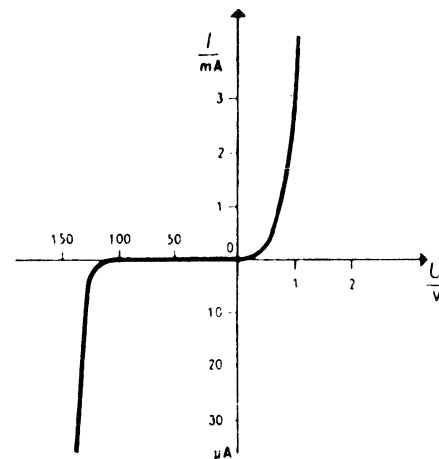
Diodový jev je závislost odporu polovodiče s přechodem PN na polaritě vnějšího napětí připojeného k polovodiči.

Polovodičová dioda je polovodič s přechodem PN (obr. 7a, b a schematická značka).



Obr. 7

Závislost proudu v polovodičové diodě na napětí se jmenuje **voltampérová charakteristika diody** (obr. 8).



Obr. 8

Tranzistor

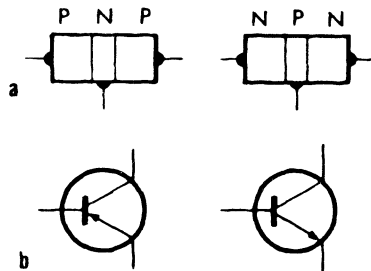
Tranzistor je polovodičová součástka, obsahující dva přechody PN.

Fyzikální podstata tranzistoru

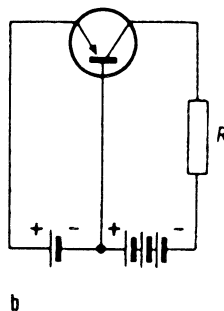
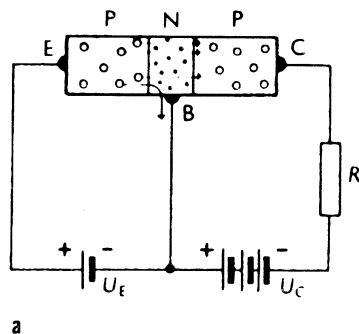
Tranzistor je tvořen krystalem polovodiče s třemi oblastmi s vodivostí typu P, typu N a znovu P; pak jde o tranzistor typu PNP, popřípadě NPN (obr. 9a, b).

Průřez tranzistorem PNP je na *obr. 11*. Základní destička, prostřední oblast mezi dvěma přechody je **báze** tranzistoru, další dvě oblasti se jmenují kolektor C a emitor E.

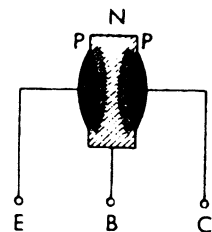
Zapojení tranzistoru (*obr. 10a, b*) má emitorový obvod a kolektorový obvod.



Obr. 9



Obr. 10



Obr. 11

Vysvětlení tranzistorového jevu

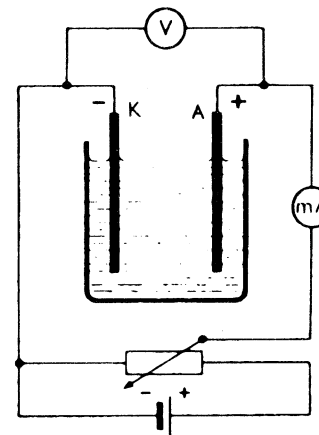
Zdroje napětí jsou připojeny do obvodů tak, že PN přechod mezi emitemorem E a bází B je zapojen v propustném směru, zatímco přechod mezi bází B a kolektorem C v závěrném směru. Při tomto zapojení prochází emitemorem poměrně velký proud (ně-

kolik mA), kdežto kolektorem by měl procházet jen nepatrný závěrný proud (*obr. 10a, b*). Ve skutečnosti je však kolektorový proud téměř stejně velký jako proud emitorový. Je tomu tak proto, že oba přechody PN jsou velmi blízko sebe, takže většina děr vstupujících z emitoru do báze difunduje až do blízkosti přechodu PN báze–kolektor, kde jsou přitahovány kolektorem. Téměř všechny emitorový proud se tak dostane tenkou bází do kolektoru. Změna emitorového proudu vyvolá obdobnou změnu kolektorového proudu. Kolektorový proud je tedy ovládán proudem emitorovým.

Kolektorový proud bývá o něco menší než proud emitorový, protože některé díry, přecházející z emitoru do báze, se do kolektoru nedostanou. V bázi rekombinují, čímž přispívají k proudu procházejícímu přívodem báze. Bázev proud je při tom podstatně menší než kolektorový a emitorový proud.

Elektrický proud v kapalinách

V kapalinách zprostředkují elektrický proud volně pohyblivé kationty a anionty. Vznik volných kationtů a aniontů rozkladem sloučeniny v rozpouštědle se nazývá elektrolytická disociace. Elektrolytickou disociací vzniká vodivý roztok, elektrolyt. Elektrolyty jsou vodné roztoky solí (CuSO_4 , NaCl , KCl), kyselin (HNO_3 , H_2SO_4) a zásad (NaOH , KOH).



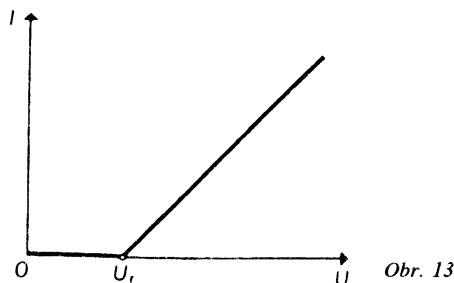
Obr. 12

Proud v elektrolytu

Ionty elektrolytu a molekuly rozpouštědla vykonávají chaotický pohyb. Vložíme-li do elektrolytu dvě elektrody a připojíme ke svorkám zdroje stejnosměrného napětí, vzniká uvnitř elektrolytu, mezi elektrodami elektrické pole. Elektrické síly působí na kationty a anionty a uvádějí je do pohybu tak, že kationty se pohybují ke katodě a anionty k anodě. Tento uspořádaný pohyb iontů v elektrickém poli mezi elektrodami

je elektrický proud v elektrolytu, v kapalině. Směr proudu je konvencí určen jako směr pohybu kationtů (obr. 12).

Graf závislosti elektrického proudu na napětí u elektrolytů (obr. 13).



Obr. 13

Připojíme-li k elektrodám malé napětí, začne obvodem protékat malý proud, který vzápětí zaniká. Trvalý proud v elektrolytu začne procházet, až když překročíme hodnotu rozkladného napětí U_r . Potom je proud lineární funkcí napětí a platí: $U = U_r + RI$, kde R je odpor elektrolytu, který je při konstantní teplotě rovněž konstantní. Při elektrolytickém vedení proudu platí Ohmův zákon.

Faradayovy zákony elektrolyzy

Elektrolyza je děj, při němž průchodem elektrického proudu elektrolytem dochází k látkovým změnám. Uspořádaný pohyb iontů v elektrolytu končí na elektrodách, kde ionty odevzdávají náboje a vylučují se na povrch elektrod jako atomy nebo molekuly nebo chemicky reagují s materiálem elektrody nebo s elektrolytem. Při elektrolyze se na katodě vždy vylučuje vodík nebo kov. Výsledky elektrolyzy daného roztoku závisí na materiálu, z něhož jsou elektrody.

1. Faradayův zákon:

Hmotnosti látek vyloučených na elektrodách jsou přímo úměrné celkovému elektrickému náboji, který přenesly ionty při elektrolyze. Matematicky vyjádřeno:

$$m = AQ = AIt$$

Veličina A se nazývá elektrochemický ekvivalent látky; pro danou látku je to charakteristická konstanta, jednotkou je kilogram na coulomb ($\text{kg} \cdot \text{C}^{-1}$), A lze vyjádřit

$$\text{vztahem: } A = \frac{1}{F} \frac{M_m}{v},$$

přičemž je F Faradayova konstanta; $F = 9,652 \cdot 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$, v je valence iontu, M_m je molární hmotnost iontu, A patří do materiálových charakteristik látky. Platí-li

$$m = AQ \text{ a } A = \frac{1}{F} \frac{M_m}{v}, \text{ platí též}$$

$$m = \frac{M_m}{Fv} Q$$

2. Faradayův zákon:

Hmotnosti různých prvků (nebo radikálů) vyloučených při elektrolyze týmž nábojem jsou chemicky ekvivalentní (2. Faradayův zákon).

Elektrolytické zdroje stejnosměrného napětí: galvanický článek, suchý článek a akumulátor. Praktický význam mají suché články, které se používají k napájení tranzistorových radiopřijímačů. Kladnou elektrodou suchého článku je uhlíková tyčinka s mosaznou čepičkou. Je obalena směsí burelu MnO_2 a koksu, která působí jako depolarizátor. Takto konstruovaná elektroda se vloží do vodního roztoku salmiaku (NH_4Cl), který je zahuštěn různými přísadami; vše se vloží do zinkového válečku, který je současně katodou. Svrchu zalit asfaltem. Plochá baterie je tvořena třemi takovými články zapojenými sériově.

Olověný akumulátor je polarizační článek, který se stane zdrojem stejnosměrného elektromotorického napětí po nabití.

Kapacita akumulátoru se určuje celkovým nábojem, který je akumulátor schopen vydat při vybíjení. Měří se v coulombech, v praxi též v ampérhodinách ($1 \text{ A} \cdot \text{h} = 3600 \text{ C}$).

Užití elektrolyzy

V praxi se především užívá chemických změn, k nimž dochází na elektrodách. Vylučování kovu na katodě se užívá ke galvanickému pokovování (předmět se zavěsí jako katoda, anoda je z kovu, jímž pokovujeme, elektrolyt obsahuje sůl kovu, kterým chceme pokovovat). Říkáme, že jde o galvanostegii.

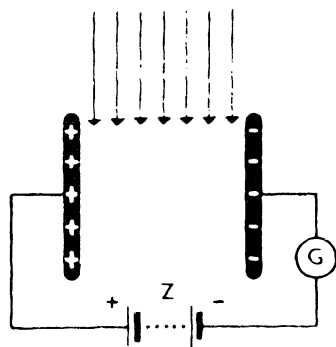
Dále se elektrolyza užívá v galvanoplastice – vytváření odlitků a matric, v elektrometalurgii. Velké využití má elektrolytický kondenzátor. V hliníkové nádobce je elektrolyt, do kterého je ponořena hliníková elektroda. Připojíme-li tuto soustavu ke zdroji stejnosměrného napětí tak, aby hliníková elektroda byla anodou, vytvoří se na ní průchodem proudu tenká vrstva oxidu hlinitého. Vrstva tloušťky asi 10^{-4} mm tvoří dielektrikum mezi anodou a elektrolytem, a proto proud klesne na nulu. Vznikl kondenzátor, u něhož hliníková elektroda je jedním a elektrolyt s nádobkou druhým vodičem.

Elektrický proud v plynech a ve vakuu

Plyny vedou elektrický proud tehdy, obsahují-li volné částice s nábojem. Elektrické vodivosti plynů se dosáhne ionizací plynu. Ionizace plynu je děj, při němž se oddělují z atomů molekul elektrony a zbytky molekul pak vytvářejí kladné ionty. Uvolněné elektrony mohou vytvořit spojením s elektricky neutrálními molekulami záporné ionty. V ionizovaném plynu se vyskytují tedy volné elektrony, kladné a záporné ionty

Ionizátory jsou zdroje energie, které tuto energii dodávají elektronům v atomech plynu (plamen svíčky, radioaktivní záření apod.). Ionizační energie je minimální energie potřebná k uvolnění elektronu z atomu; udává se obvykle v elektronvoltech (eV).

Rekombinace je děj, při němž dvojice opačně nabitých částic vytváří elektricky neutrální molekuly. Ionizace a rekombinace probíhají v plynu současně. Přebývá-li ionizace, vodivost plynu se zvětšuje, roste. Přebývá-li rekombinace, vodivost plynu klesá. Elektrický proud vzniká pouze v ionizovaném plynu a je způsoben uspořádaným pohybem volných elektronů a iontů. Říkáme mu výboj v plynu (viz obr. 14).



Obr. 14

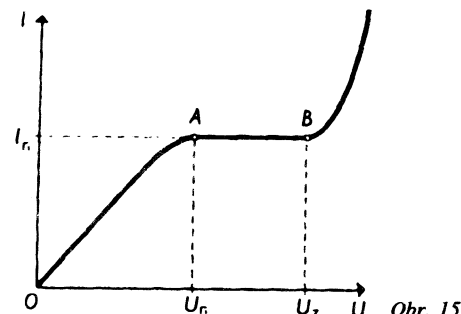
Udžuje-li se proud plynu pouze **při působení** ionizátoru, jde o výboj **nesamostatný**. **Samostatný výboj** probíhá nezávisle na ionizátoru a napětí, při němž začíná plyn vést proud samostatně, jmenuje se **zápalné napětí**. Samostatný výboj je ovlivněn silami elektrického pole, které vznikají ionty a elektrony urychluje a tyto částice mají dostatečnou energii, na **ionizaci** dalších molekul **nárazem**. Plyn se ionizuje vlastními ionty a elektrony, proto se hovoří o samostatném výboji. Výbojka je skleněná baňka (trubice), v níž jsou zataveny elektrody. Graf závislosti proudu I elektrického výboje na napětí U mezi elektrodami je voltampérová charakteristika výboje (obr. 15).

Druhy výboje

Charakter výboje závisí na chemické podstatě plynu, na jeho tlaku, teplotě, na vlastnostech a vzdálenosti elektrod apod. Vzhled a barva výboje se významně mění s klesajícím tlakem plynu ve výbojce. Při elektrickém výboji vznikají různé zvukové a světelné jevy.

Doutnavý elektrický výboj probíhá při malém proudu, je doprovázen slabým světlováním.

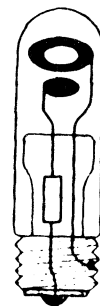
Obloukový výboj vzniká při větších hodnotách proudu, roste při něm značně teplota plynu (elektrický oblouk).



Obr. 15

Jiskrový výboj je krátkodobý a je způsoben elektronovými a iontovými lavinami.

Doutnavka (obr. 16) má dvě elektrody, plněna netečným plynem (Ne, Ar) při tlaku 3 kPa, patka je opatřena rezistorem. Doutnavý výboj vzniká při připojení doutnavky na stejnosměrné napětí. Používá se jako indikátor napětí, kontrolní světlo a jako indikátor polarity svorek zdroje stejnosměrného napětí.

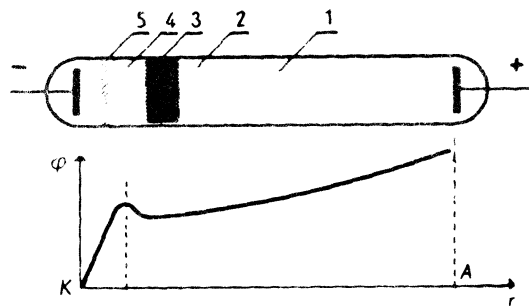


Obr. 16

Katodové záření

Zmenšujeme-li tlak vzduchu ve výbojové trubici, můžeme pozorovat změny vzhledu a barvy výboje (obr. 17). Při tlaku 500–600 kPa vzniká doutnavý výboj červené barvy vyplňující téměř celou trubici, hovoříme o anodovém světle (1). (2) je tmavý prostor, (3) modré katodové světlo, (4) slabě svítící vrstva a (5) svítící vrstva (narůžovělá). Další pokles tlaku na 2 Pa způsobí, že anodové světlo zmizí a kolem anody se objevuje žlutozelené světlování, anoda se zahřívá. Jde o katodové záření, což je tok elektronů z katody ve výbojové vyčerpané trubici.

Kinetická energie elektronů katodového záření se při interakci s látkami přeměňuje na světelnou, mechanickou či další formy energie. Praktické využití má úzký svazek katodových paprsků, elektronový paprsek.



Obr. 17

Vlastnosti a užití elektronových paprsků:

Ionizují plyny; jejich energie se při dopadu mění na energii tepelnou (užívá se při tavení a sváření elektronovým paprskem); pronikají tenkými materiály; způsobují světelnou emisi (využívá se v přístrojích jako je televizor, radiolokátor apod.); mají fotochemické účinky; vychylují se v elektrickém i magnetickém poli (televizní obrazovka) a vyvolávají rentgenové záření.