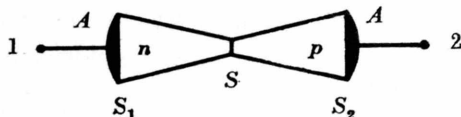


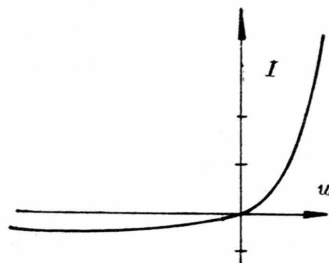
**5.6. Polovodičové diódy a tranzistory.** Spoločným princípom polovodičových diód je poznatok, že elektrická vodivosť vedenia, v ktorom sa stýka polovodič s vhodným kovom alebo polovodič typu  $p$  s polovodičom typu  $n$ , je veľmi závislá od smeru elektrického prúdu vo vedení.

Za účelom čo najlepšieho pochopenia funkcie polovodičovej diódy majme na mysli vedenie, v ktorom za sebou nasledujú kov  $A$ , polovodič typu  $p$ , polovodič typu  $n$  a opäť kov  $A$  (obr. 5.20). Pokiaľ vedenie nie je ešte pripojené k svorkám vonkajšieho zdroja prúdu a jeho teplota je všade rovnaká, kovy  $A$  na oboch koncoch vedenia majú rovnaké elektrické potenciály, lebo vedenie sa skladá len z vodičov 1. triedy. Keď teda kontaktné potenciály v stykových plochách  $S_1$ ,  $S$  a  $S_2$  označíme  $\pi_1$ ,  $\pi_0$  a  $\pi_2$ , je správna rovnica  $\pi_1 + \pi_0 + \pi_2 = 0$ . Predpokladajme, že  $S_1 = S_2 \gg S$ . V tom prípade po pripojení svoriek 1 a 2 k svorkám vonkajšieho zdroja prúdu, medzi ktorými je napätie  $u$ , je splnená rovnica

$$u = \pi_1 + \pi + \pi_2 = \pi - \pi_0$$



Obr. 5.20.



Obr. 5.21.

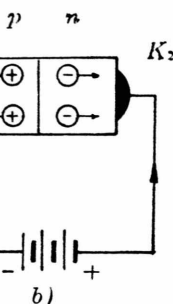
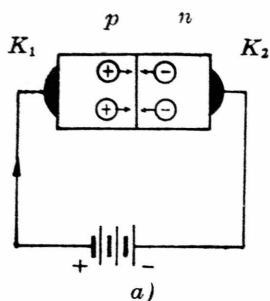
lebo veľmi malá prúdová hustota v plochách  $S_1$  a  $S_2$  nemôže mať prakticky nijaký vplyv na kontaktné potenciály  $\pi_1$  a  $\pi_2$ . Možno ale aj inakšie zariadiť, aby prúd nemal vplyv na kontaktné potenciály  $\pi_1$  a  $\pi_2$ .

Závislosť prúdu  $I$  od napätia  $u$ , čiže prakticky od zmeny  $\pi - \pi_0$  kontaktného potenciálu na tzv.  $p-n$  prechode, nazýva sa jeho *volt-ampérovou charakteristikou* (obr. 5.21) a zariadenie *polovodičovou diódou*. Jeden z polovodičov práve popísanej úplnej polovodičovej diódy, najlepšie polovodič typu  $n$ , môže byť nahradený aj kovovým hrotom.

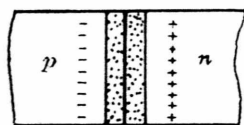
Z charakteristiky  $p-n$  prechodu, nazývanej aj charakteristikou na tomto prechode založenej polovodičovej diódy, vyplýva, že diódou prechádza podstatne silnejší prúd, keď polovodič typu  $p$  je pripojený ku kladnému a polovodič typu  $n$  k zápornému pólu vonkajšieho zdroja prúdu, ako v prípade obrátenom.

Kvalitatívny výklad tohoto tzv. *diódového efektu* podávajú obr. 5.22a, b.

Voľný kladný elektrický náboj predstavujúce diery v polovodiči typu  $p$  aj záporný náboj nesúce voľné elektróny v polovodiči typu  $n$  sú elektrickým poľom v polovodičoch vytvoreným hnané k ich spoločnému rozhraniu, kde sa vzájomne neutralizujú. V dôsledku toho v okruhu v zapojení podľa obr. 5.22a môže byť aj dosť silný elektrický prúd, umožnený dobrou elektrickou vodivosťou polovodičov s primiešaninami.



Obr. 5.22.



Obr. 5.23.

Predstavme si teraz, že sme tie isté stýkajúce sa polovodiče typu  $p$  a  $n$  pripojili ku svorkám zdroja jednosmerného elektrického prúdu obrátene, ako je to znázornené na obr. 5.22b. V tom prípade diery v polovodiči typu  $p$  aj voľné elektróny v polovodiči typu  $n$  sú elektrickým poľom hnané od spoločného rozhrania. V dôsledku toho blízke okolie rozhrania sa stáva elektricky málo vodivým a okruhom môže prechádzať už len slabý elektrický prúd. Je umožnený tým, že aj polovodič, v ktorom neboli umelým zásahom, t. j. primiešaním cudzieho prvku, vytvorené diery alebo voľné elektróny, sa vyznačuje lepšou vodivosťou ako dobré nevodiče, lebo diery a voľné elektróny môžu v ňom vznikáť aj vplyvom tepelného pohybu iónov a elektrónov.

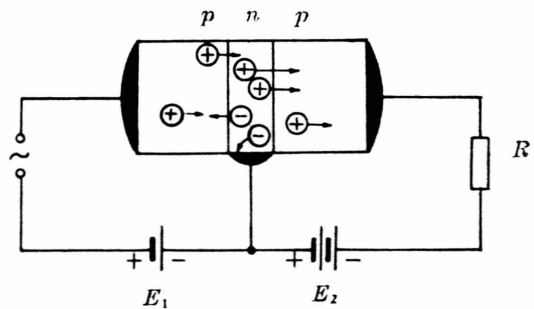
Dobre si je uvedomiť, že keď elektródy polovodičovej diódy sú pripojené ku svorkám zdroja prúdu v závernom zmysle, t. j. tak, že cez diódu môže prechádzať len slabý prúd, rozhranie obidvoch diód tvoriacich polovodičov predstavuje nabitý kondenzátor, lebo odchod kladných dier od rozhrania v polovodiči typu  $p$  značí, že sa tam hromadí záporný náboj, a podobne odchod voľných elektrónov v polovodiči typu  $n$  spôsobuje, že tam ostáva v prebytku kladný náboj (obr. 5.23). Za týchto okolností elektricky málo vodivé okolie rozhrania sa nazýva závernou vrstvou a uplatňuje sa ako nedokonalé dielektrikum v obyčajnom kondenzátore, ktorého elektrická vodivosť nie je zanedbateľne malá. Pretože kondenzátor prepúšťa striedavý prúd tým lepšie, čím je jeho frekvencia väčšia (pozri čl. 6.10), kondenzátoru podobné vlastnosti rozhrania polovodičov v polovodičových diódach ohraničujú ich upotrebitelnosť ako usmerňovačov prúdov smerom k vysokým frekvenciám.

Elektrický odpor v súčasnej dobe zhotovovaných polovodičových diód v priepustnom smere pohybuje sa za obyčajnej teploty v intervale  $10^{-1}$  až

10 ohmov, zatiaľ čo v závernom smere môže dosahovať  $10^5$  až  $10^6$  ohmov. Vnútorňý odpor polovodičových diód najmä v závernom smere sa však s rastúcou teplotou rýchle znižuje. Príčinou toho je stále mohutnejšie vznikanie voľných elektrónov zo základnej hmoty polovodičov a tým aj dier v závernej vrstve diódy pri zväčšenej teplote, takže dióda prepúšťa potom elektrický prúd stále lepšie a lepšie aj v závernom smere. To však značí, že polovodičová dióda dobre usmerňuje elektrický prúd len vtedy, keď jej teplota je ešte dosť nízka. Polovodičové diódy používané na usmerňovanie silnejších prúdov musia byť preto dobre chladené.

Polovodičové diódy sa používajú v rádiotechnike na detekciu modulovaných striedavých elektrických prúdov o vysokej frekvencii, na zásobovanie rôznych prístrojov a zariadení jednosmerným prúdom a v energetike na usmerňovanie striedavých prúdov priemyselnej frekvencie aj o veľmi veľkej intenzite. Najstaršou konštrukciou polovodičovej diódy je už asi päťdesiat rokov starý a v zdokonalenej podobe aj dnes ešte používaný *kryštálový detektor*, skladajúci sa napríklad z polovodičového kryštálu sírnika olovnatého PbS, ktorého sa jemne dotýka zahrotený pružný kovový drôtik.

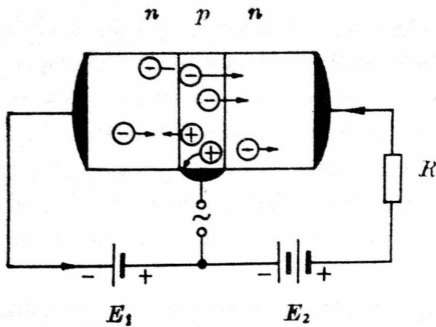
Princíp činnosti *tranzistora*, polovodičovej triódy, objasníme na jednom z používaných zapojení, ktoré podáva *obr. 5.24*. Na tomto obrázku znázornená polovodičová trióda sa skladá z troch polovodičových vrstiev, ktoré sa stýkajú plošne, pričom pomerne najtenšia stredná vrstva má vodivosť typu *n* (elektrónovú) a obidve krajné vrstvy vodivosť typu *p* (dierovú), takže trióda je typu *p—n—p*. Dva konštantné zdroje  $E_1$  a  $E_2$  vonkajšej elektromotorickej sily sú k elektródam tranzistora pripojené tak, že stredná a pravá vrstva predstavujú polovodičovú diódu v zapojení, s ohľadom na zdroj  $E_2$ , *závernom*, zatiaľ čo ľavá a stredná vrstva diódu v zapojení, s ohľadom na zdroj  $E_1$ , *priepustnom*. V takto zvolenom zapojení okruhom elektromotorickej sily  $E_2$ , aj keď je dosť veľká, prechádza len slabý prúd, málo závislý od odporu  $R$  v okruhu, lebo v rozhraní strednej a pravej vrstvy tranzistora je vytvorená tenká záverná zóna o veľkom ohmickej odpore.



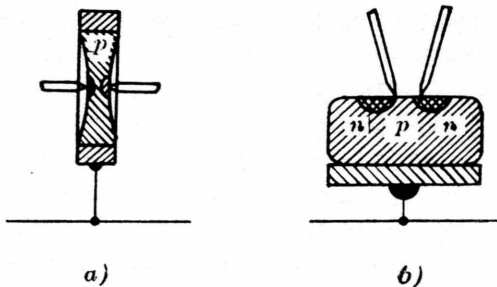
Obr. 5.24.

Úlohou ľavej polovodičovej vrstvy je vháňať (injektovať) do strednej vrstvy tranzistora voľne pohyblivé elektrické náboje opačného znamienka, než ako sú vlastné voľné náboje tejto vrstvy, v tranzistore podľa *obr. 5.24* teda diery. Pri

malej hrúbke strednej vrstvy väčšina dier do nej injektovaných dostane sa až k rozhraniu strednej a pravej vrstvy tranzistora a putuje potom v poslednej vrstve už nerušené až k elektróde, ktorá sa jej dotýka. Pretože v tejto elektróde diery zanikajú, ako by sa v nej zbierali, elektróda, ktorá sa dotýka pravej vrstvy tranzistora znázorneného na obr. 5.24, nazýva sa *kolektor*. Z analogických príčin ľavej polovodivej vrstvy tranzistora sa dotýkajúca elektróda, ktorá sa uplatňuje tak, akoby, v našom prípade, emitovala diery predstavujúce kladný voľný náboj, nazýva sa *emitér*. Stredná elektróda tranzistora sa nazýva *základnou*



Obr. 5.25.



Obr. 5.26.

elektródou a s ňou spojená polovodiivá vrstva základnou vrstvou alebo aj *bázou*. Pretože v našom prípade ľavá a stredná vrstva tranzistora predstavujú diódu zapojenú, s ohľadom na zdroj  $E_1$ , v priepustnom smere, jej vnútorný odpor za tohoto stavu je malý. Pre túto príčinu malá zmena signálového, na emitér privedeného napätia  $u$  je spojená s pomerne veľkou zmenou prúdu v okruhu prvých dvoch vrstiev tranzistora. To má za následok pomerne značné zväčšenie počtu voľných, do strednej vrstvy tranzistora injektovaných nábojov a tým prakticky rovnako veľkú zmenu intenzity prúdu v okruhu ems.  $E_2$ , v ktorom je aj odpor  $R$ . Takto pôsobením malej zmeny napätia na emitéri nastáva podstatne väčšia zmena napätia na vysokohmovom odpore  $R$ , takže zariadenie sa uplatňuje ako zosilňovač napätia, podobajúci sa vákuovému tranzistoru v zapojení podľa obr. 5.19b. Ešte viac sa tomuto zapojeniu podobá zapojenie tranzistora typu  $n-p-n$  podľa obr. 5.25, kde zdroje vonkajšej ems. sú k elektródam polovodičového tranzistora rovnako pripojené ako pri vákuovom tranzistore a aj signál sa privádza na základnú elektródu, ktorá podobne ako mriežka vákuového tranzistora je medzi ostatnými dvoma elektródami tranzistora.

Nevýhodou tranzistorov, ktorými sme sa zaoberali, je ich určitá zotrvačnosť, zapríčinená tým, že voľné do bázy injektované náboje postupujú cez ňu prakticky len difúziou, teda nie dosť rýchle, čím je ohraničená ich upotrebitelnosť pre zosilňovanie rýchle sa meniacich signálov. Konštrukcia a technológia

výroby tranzistorov sa však stále zdokonaľuje. V tejto súvislosti treba ešte poznamenať, že pre zosilňovanie signálov o vysokej frekvencii sa s obľubou používajú tranzistory tvorené jediným polovodivým kryštálom germánia s objemom len niekoľko málo  $\text{mm}^3$ , s vodivosťou napríklad typu  $p$ , v ktorom vhodným technologickým postupom boli vytvorené dve oblasti s vodivosťou typu  $n$ . Kryštál sám tvorí bázu a jeho oblasti s opačnou vodivosťou sa pružne dotýkajú dva kovové hroty, predstavujúce emitér a kolektor, ako je to znázornené na obr. 5.26. Takýmito tranzistorami možno zosilňovať vysokofrekvenčné signály až asi do 100 megahertzov.

V porovnaní s vákuovými elektrónkami nedoceníteľnou prednosťou všetkých tranzistorov je veľká úspornosť ich prevádzky, lebo nemajú elektródu žeravenú elektrickým prúdom a aj prúdy v kolektoroch väčšiny tranzistorov bývajú veľmi malé. Veľkou prednosťou všetkých tranzistorov sú aj ich malé rozmery a malá váha, takže aj nimi vystrojené zariadenia sú malé a ľahké.

**5.7. Merný náboj elektrónu.** Z definície intenzity elektrického poľa vyplýva, že na bodový náboj  $q$  účinkuje v elektrickom poli intenzity  $\mathbf{E}$  elektrická sila

$$\mathbf{f}_e = q\mathbf{E} \quad (1)$$

Podľa vzorca (4.2.2) na bodový náboj  $q$ , ktorý sa v magnetickom poli s indukciou  $\mathbf{B}$  pohybuje rýchlosťou  $\mathbf{v}$ , účinkuje magnetická sila

$$\mathbf{f}_m = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2)$$

V priestore, ktorý je súčasne poľom elektrickým aj magnetickým, účinkuje teda na bodový náboj  $q$ , ktorý sa v tomto poli pohybuje rýchlosťou  $\mathbf{v}$ , celková sila

$$\mathbf{f} = q\mathbf{E} + q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (3)$$

Sily určené vzorcami (1), (2) a (3) sa používajú pri niektorých fyzikálnych meraniach, hlavne však pri konštrukcii najrôznejších fyzikálnych aj technických zariadení. V tomto a nasledujúcom článku budeme sa zaoberať metódami merania merného náboja elektrónu a plyných iónov.

Merný náboj elektrónu je definovaný vzorcom

$$\sigma_e = \frac{e}{m} \quad (4)$$

v ktorom  $e$  je náboj elektrónu a  $m$  jeho hmotnosť. Podobnými vzorcami sú definované aj merné náboje iónov.

Predstavme si, že elektrón pohybujúci sa rýchlosťou  $\mathbf{v}$  vstúpil do homogénneho magnetického poľa s indukciou  $\mathbf{B}$  v smere na indukčné čiary kolmom.