

dvoch vyjadrení prúdu I dostávame $G = \frac{1}{R + R_v}$, takže prúd vo vodivom spojení bodov A a B , podľa vzorca (a), je vo všeobecnosti

$$I = \frac{u_0 - e}{R + R_v} \quad (b)$$

Vnútny odpor siete R_v môžeme určiť tak, že volíme $e = 0$, $R = 0$, takže je $R_v = u_0/I_0$, kde I_0 je tzv. prúd na krátko.

2.5. Elektrónová a dierová vodivosť polovodičov. Pevné látky možno podľa ich elektrickej vodivosti rozdeliť do troch skupín: na vodiče, nevodiče a polovodiče. Merná elektrická vodivosť pevných vodičov, medzi ktoré patria kovy a elektricky vodivé modifikácie uhlíka, pohybuje sa okolo 10^6 až 10^7 ohm $^{-1}$ m $^{-1}$. Merná vodivosť dobrých nevodičov (izolátorov) býva 10^{-8} až 10^{-13} ohm $^{-1}$ m $^{-1}$. Merná elektrická vodivosť polovodičov sa pohybuje v širokých hraniciach asi od 10^{-8} ohm $^{-1}$ m $^{-1}$ až do 10^6 ohm $^{-1}$ m $^{-1}$. V dnešnej elektrotechnickej a fyzikálnej praxi z polovodičov sa používajú najmä prvky germánium, kremík a selén a okrem toho rôzne kyslíčniky a sírniky kovov.

Polovodiče a niektoré ich vlastnosti boli známe a používané už aj v minulom storočí, napríklad závislosť elektrickej vodivosti selénu od osvetlenia sa využívala na konštrukciu prístrojov na meranie intenzity osvetlenia. Sústavný výskum polovodičov nastal však až v dvadsiatich rokoch nášho storočia, keď sa zistilo, že niektoré polovodiče možno použiť na konštrukciu veľmi citlivých usmerňovačov striedavých prúdov aj veľmi vysokej frekvencie (kryštálové detektory modulovaných rozhlasových elektromagnetických vln), iné na konštrukciu veľmi účinných usmerňovačov aj veľmi silných striedavých prúdov. Záujem o polovodiče sa ešte zvýšil r. 1948, keď bol zostrojený prvý tranzistor, čím sa rozumie z polovodičov zhotovené a preto veľmi úsporne pracujúce zariadenie nahradzujúce jednomriežkovú vákuovú elektrónku so žeravenou katódou.

Polovodiče sa od vodičov a nevodičov nelíšia len veľkosťou svojej elektrickej vodivosti, ale aj jej závislosťou od teploty a mechanizmom tejto vodivosti. Zatiaľ čo elektrická vodivosť kovov sa s rastúcou teplotou znižuje, elektrická vodivosť polovodičov, podobne ako vodivosť nevodičov, napríklad skla a iónových kryštálov, sa s rastúcou teplotou zväčšuje. Závislosťou svojej elektrickej vodivosti od teploty sa teda polovodiče podobajú nevodičom.

Najvýznamnejšou vlastnosťou polovodičov je, že ich elektrická vodivosť môže byť dvojaká: elektrónová (typu n , negatívna) a dierová (typu p , pozitívna). Vysvetlíme vec na príkladoch. Atómy chemicky štvormocného prvku germánia, ktorý sa svojimi chemickými vlastnosťami podobá kremíku, majú po 4 valenč-

ných elektrónoch. Na rozdiel od kovov, v ktorých valenčné elektróny sú voľne pohyblivé a tvoria v nich tzv. *elektrónový plyn*, v monokryštáli germánia každý atóm germánia, lepšie povedané ión tohto prvku, prostredníctvom valenčných elektrónov je zviazaný so svojimi susedmi. Na rozdiel od kovov v kryštáli germánia valenčné elektróny nie sú teda voľne pohyblivé, ale sú viazané na svoje určité miesta. Vplyvom tepelného pohybu iónov prítomných v uzlových bodoch kryštálu sa však stáva, že energia niektorých valenčných elektrónov sa zväčší, následkom čoho tieto opustia svoje pevné miesta v kryštáli a začnú sa v ňom chaoticky pohybovať tak dlho, kým si nenájdu iné voľné miesto, ktoré bolo vytvorené podobným spôsobom.

Pretože v objemovej jednotke kryštálu germánia alebo iného podobného polovodiča je v každom okamžiku určitý počet takýchto prechodne voľných elektrónov, vyznačujú sa polovodiče aj za obyčajnej teploty podstatne lepšou elektrickou vodivosťou ako dobré izolátory, aj keď je ona omnoho menšia ako elektrická vodivosť kovov. Na rozdiel od nevodičov počet voľných elektrónov v objemovej jednotke aj chemicky čistého polovodiča je teda pomerne dosť veľký a s rastúcou teplotou sa rýchle zväčšuje. S teplotou sa preto zväčšuje aj elektrická vodivosť polovodičov. Podobný vplyv ako zvýšenie teploty má na niektoré polovodiče vhodné osvetlenie, čím je vysvetlená značná závislosť niektorých polovodičov od osvetlenia.

V kovoch je počet voľných elektrónov pri každej teplote veľmi veľký, lebo všetky valenčné elektróny jednotlivých atómov sú voľné. Ich rýchly a chaotický pohyb vo vnútri kryštálovej mriežky spolu s tepelným pohybom iónov v uzlových bodoch mriežky predstavujú prekážku pre usporiadaný pohyb elektrónov za pôsobenia vonkajšieho elektrického poľa. Pre túto príčinu sa elektrická vodivosť kovov s rastúcou teplotou znižuje. Vplyv teploty na pohyb voľných elektrónov v polovodičoch je rovnaký ako pri kovoch. Zvýšením teploty sa i v polovodičoch sťažuje ich pohyb za účinku vonkajšieho poľa, čo teda samo o sebe má záporný vplyv na elektrickú vodivosť polovodičov. Ale keďže s rastúcou teplotou sa v polovodičoch rýchle zväčšuje počet voľných elektrónov, vplyv teploty na elektrickú vodivosť polovodičov je opačný ako pri kovoch.

Majme na mysli opäť ešte monokryštál chemicky čistého germánia. Keď sa v ňom na niektorom mieste uvoľnil valenčný elektrón, vytvorilo sa na tomto mieste voľné miesto pre elektrón, tzv. *diery*, a je tam súčasne prebytok kladného náboja. Uvoľnenie elektrónu z atómovej väzby značí teda vznik dvoch nábojov v kryštáli polovodiča, záporného (negatívneho, n) elektrónu a kladnej (pozitívnej, p) diery. Pre pochopenie mnohých vlastností polovodičov je veľmi dôležité si uvedomiť, že nielen uvoľnené valenčné elektróny, ale aj nimi zanechané diery sú v polovodiči voľne pohyblivé, lebo veľmi ľahko sa stane,

že takéto voľné miesto zaujme valenčný elektrón susedného atómu, čím sa diera posunie v opačnom smere. Keď v polovodiči nie je vytvorené elektrické pole pomocou vonkajších zdrojov, kladné diery sa pohybujú v polovodiči práve tak chaoticky (pozri obr. 2.9) ako voľné elektróny. Za účinku vonkajšieho poľa vznikne však čiastočne usporiadaný pohyb nielen voľných elektrónov proti smeru intenzity vonkajšieho poľa, ale aj dier v smere poľa, práve taký, akým je pohyb záporných a kladných iónov v roztokoch elektrolytov. Pri polovodičoch možno teda hovoriť napr. o difúznej rýchlosti voľných elektrónov a dier alebo o ich pohyblivosti a podobne.



Obr. 2.9.

V monokryštáli chemicky čistého polovodivého prvku je vždy práve toľko negatívnych voľných elektrónov ako pozitívnych dier. Elektrická vodivosť takéhoto kryštálu je súčasne elektrónová (typu n) aj dierová (typu p) a je pomerne malá. Je veľmi významné, že primiešaním malého množstva iného prvku možno túto rovnováhu porušiť a vytvoriť polovodič, v ktorom niektorá z obidvoch týchto vodivostí podstatne prevláda nad druhou, čiže vytvoriť polovodič prevažne typu n alebo p .

Keď napríklad v kryštálovej mriežke polovodivého prvku sa niektorý jeho atóm nahradí atómom, ktorý má o jeden elektrón viac valenčných elektrónov, jeden z týchto elektrónov v kryštáli danej štruktúry je prebytočný pre vytvorenie väzieb so susednými atómami. Takéto elektróny sa pomerne ľahko odtrhujú od svojich atómov, čím v polovodiči vzniká i za obyčajnej teploty pomerne mnoho voľných, záporný (*negatívny*) náboj nesúcich elektrónov, a to bez toho, že by v polovodiči vznikali súčasne pohyblivé pozitívne diery. Polovodič nadobúda tým elektrickú vodivosť typu n .

Keď sa naopak niektorý atóm polovodivého prvku nahradí atómom, ktorý má o jeden elektrón menej valenčných elektrónov ako atómy základnej polovodivej hmoty, vzniká v polovodiči voľné miesto pre elektrón, čo má za následok vznik pohyblivých *pozitívnych* dier bez toho, že by vznikli v polovodiči súčasne voľné elektróny. Polovodič nadobúda tým elektrickú vodivosť typu p .

Z chemicky štvormocného polovodivého germánia možno získať polovodič typu n pridaním malého množstva päťmocného fosforu, arzenu alebo antimónu

a polovodič typu p pridaním malého množstva trojmocného bóru, hliníka, india a pod.

Počet voľných nositeľov elektrického náboja v polovodičoch s primiešaninami závisí od ich množstva. Je veľmi dôležité, že pridaním ich dostatočného množstva možno zväčšiť mernú elektrickú vodivosť v pomere až $1 : 10^6$ v porovnaní s vodivosťou chemicky čistého základného polovodiča. Touto svojou vlastnosťou sa polovodiče tiež líšia od kovov, ktorých elektrickú vodivosť kovové primiešaniны znižujú.

Primiešaniны, ktoré polovodiču udeľujú elektrickú vodivosť elektrónovú, nazývajú sa *donormi*; primiešaniны, ktoré viažu voľné elektróny, takže vyvolávajú vznik dier, nazývajú sa *akceptormi*. Mechanizmus vedenia elektrického prúdu v polovodivých kysličníkoch a sírnikoch býva zložitejší ako v polovodivých prvkoch, ale aj vodivosť týchto látok je vždy alebo typu n , alebo typu p .

Úlohy na cvičenie

1. Priestor medzi dvoma súosovými valcovými plochami s polomerami r_1 a r_2 , dĺžky l , je vyplnený materiálom s merným odporom ρ . Aký veľký je odpor medzi valcami?

$$\left(R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{r_2}{r_1} \right)$$

2. Odvoďte závislosť prúdu od času pri vybíjaní kondenzátora kapacity C cez odpor R , keď počiatočné napätie na kondenzátore je $u_0!$ $\left(I = \frac{u_0}{R} e^{-t/CR} \right)$

3. Aký veľký má byť odpor bočníka, aby sa ním rozsah ampérmetra s vnútorným odporom $0,2 \Omega$ zväčšil 5-krát? ($R = 0,05 \Omega$)

4. Voltmeter s vnútorným odporom $3\,000 \Omega$ má rozsah do 150 V . Aký prúd tečie voltmetrom pri jeho plnej výchylke a aký predradený odpor musíme zapojiť, aby sa rozsah prístroja zväčšil na 600 V ? ($I = 0,05 \text{ A}$, $R = 9\,000 \Omega$)

5. Vypočítajte závislosť napätia u na kondenzátore kapacity C od času t po jeho pripojení k svorkám zdroja jednosmerného prúdu cez odpor R , ak elektromotorická sila zdroja prúdu je $u_0!$ [$u = u_0(1 - e^{-t/CR})$]

3. GALVANICKÉ ČLÁNKY A TERMOČLÁNKY

3.1. Kontaktné potenciály. Predstavme si, že v priestore sa nachádza niekoľko kovových telies rovnakej teploty tak, že sa vzájomne nedotýkajú. Aj keď v čase $t = 0$ ani jedno z nich nebolo ako celok nositeľom elektrického náboja, po dostatočne dlhom čase to už tak nie je. Príčinou je schopnosť kovov — vo všeobecnosti aj iných látok — pri každej teplote vysielat (*emitovat*) do svojho