

Meno a priezvisko:
Škola:
Predmet:
Školský rok/blok:
Skupina:
Trieda:
Dátum:

Škola pre mimoriadne nadané deti a Gymnázium
Fyzika

Teória

Elektrický prúd v polovodičoch

Elektrický prúd v polovodičoch; Vodivosť polovodičov ; Závislosť odporu polovodiča od teploty, termistor; Vlastné a nevlastné polovodiče

1.0 Polovodiče

Existencia polovodičov bola teoreticky predpovedaná v 20. rokoch 20. storočia, prvé polovodičové súčiastky boli vyrobené až po druhej svetovej vojne. Od tej doby sa ich výroba neustále zdokonaľovala a dnes sú súčasťou skoro všetkých elektronických zariadení.

Podľa merného elektrického odporu môžeme materiály rozdeliť na:

1. Kovy - $\rho \in (10^{-8}; 10^{-6}) \Omega m$, najlepším vodičom je striebro s $\rho_{Ag} = 1,6 \cdot 10^{-8} \Omega m$
2. Polovodiče - $\rho \in (10^{-6}; 10^8) \Omega m$
3. Izolanty - $\rho \in (10^8; \infty) \Omega m$, najlepším izolantom je diamant: $\rho_{diamant} = 3 \cdot 10^{16} \Omega m$

Pri porovnaní merného odporu najlepšieho vodiča (striebra) a najlepšieho izolantu (diamant) zistíme, že sa odlišujú o 24 rádov (!). Vo fyzike prakticky neexistuje iná charakteristika materiálov, ktorá by mala takto široký interval.

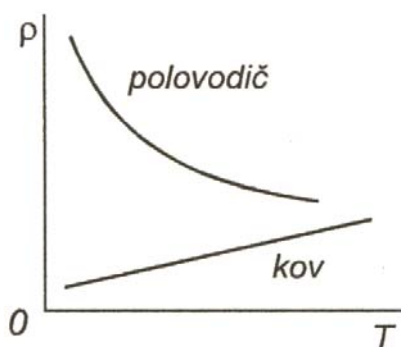
Delenie podľa merného odporu je najlepšie pre rozdelenie materiálov na vodiče, polovodiče a izolanty.

Druhým kritériom, pomocou ktorého je možné definovať polovodič, je teplotná závislosť odporu:

1. Kovy – s rastúcou teplotou rastie merný odpor (a teda aj odpor)
2. Polovodiče – s rastúcou teplotou väčšinou merný odpor (a teda aj odpor) klesá

Za polovodiče považujeme z pevných látok napríklad: kremík, germánium, selén, telúr, uhlík (grafit), sulfid kademnatý, gálium arzenid,

Polovodiče sú skupina látok, ktoré sa svojimi elektrickými vlastnosťami odlišujú od vodičov aj nevodičov. Ak merný odpor vodiča je okolo $10^{-8} \Omega m$ až $10^{-6} \Omega m$ a merný odpor nevodičov väčší ako $10^6 \Omega m$, merný odpor polovodičov pri bežných teplotách je $10^{-6} \Omega m$ až $10^8 \Omega m$.



Hodnota merného odporu nie je jediným kritériom pre zaradenie materiálu medzi polovodiče. Dôležitejšia je závislosť merného odporu látky od teploty. Merný odpor kovov s teplotou rastie takmer lineárne, pritom koncentrácia voľných elektrónov v kovoch od teploty nezávisí. Merný odpor polovodičov s rastúcou teplotou exponenciálne klesá.

Možno to vysvetliť tak, že v polovodiči sa s rastúcou teplotou zväčšuje koncentrácia voľných elektrónov.

Pri teplote blízkej $0K$ má kov prakticky toľko voľných elektrónov ako pri teplote $300K$. Polovodiče a nevodiče pri teplote blízkej $0K$ voľné elektróny prakticky neobsahujú. Preto polovodiče i nevodiče pri nízkych teplotách nevedú elektrický prúd. Pri zvyšovaní teploty sa valenčné elektróny uvoľňujú, ich koncentrácia rastie, preto merný odpor klesá. Mechanizmus vodivosti je pri polovodičoch a nevodičoch rovnaký. Rozdiel je iba v energii ΔE potrebnej na uvoľnenie valenčných elektrónov. Energia ΔE sa nazýva **aktivačná energia**. Polovodiče sú látky, pre ktoré je $\Delta E < 3eV$ ($3eV \doteq 4,8 \cdot 10^{-19} J$). Látky, pre ktoré je $\Delta E \geq 3eV$ sú nevodiče (napríklad diamant má $\Delta E = 5,4eV$, $NaCl$ približne $\Delta E = 10eV$). Pri teplote $300K$ je v $1m^3$ kovu rádovo 10^{28} voľných elektrónov, v polovodiči rádovo 10^{18} (v závislosti od hodnoty ΔE), v nevodiči zanedbateľne málo.

Závislosť merného odporu polovodičov od teploty sa využíva v teplotne závislých rezistoroch – termistoroch. Merný odpor polovodičov okrem teploty závisí aj od osvetlenia, prímiesí, tlaku, elektrického a magnetického poľa a tď. Pri osvetlení polovodiča môžu fotóny uvoľniť valenčné elektróny, preto sa merný odpor polovodiča zmenší. Závislosť merného odporu polovodiča od osvetlenia sa využíva v súčiastkach citlivých na svetlo – fotorezistoroch, fotodiódach a tď.

Medzi polovodiče patria niektoré chemické prvky (kremík, germánium, uhlík, selén, telúr), niektoré chemické zlúčeniny (sulfid olovnatý, sulfid kademnatý), ale aj niektoré organické látky (hemoglobín, chlorofyl). Najpoužívanejšie sú kremík a germánium.

Najcharakteristickejším znakom polovodičov je, že merný elektrický odpor polovodičov ρ so zvyšujúcou teplotou sa rýchlo znižuje (v kovoch sa naopak ρ so zvyšujúcou teplotou mierne zväčšuje).

1.1 Vznik a vedenie elektrického prúdu v polovodičoch

Existujú dva základné mechanizmy vedenia elektrického prúdu v polovodičoch:

1. **Vlastná vodivosť** – spôsobená len vlastnosťami samotného prvku, ktorý tvorí polovodič.
2. **Prímesová vodivosť** – do daného prvku sa pridávajú iné prvky, ktoré výrazným spôsobom ovplyvňujú vodivosť polovodiča. V tejto súvislosti je nutné rozlišovať medzi dvomi pojmami:
 - A. **Nečistota** – v štruktúre polovodiča sa objavuje náhodne a jej prítomnosť nie je žiadúca. Do štruktúry polovodiča sa dostáva napríklad pri tuhnutí taveniny priamo pri výrobe kryštálu polovodiča.
 - B. **Prímes** – do štruktúry polovodiča sa zabuduje cielene tak, aby požadovaným spôsobom ovplyvnila vodivosť polovodiča.

1.2 Vlastná vodivosť polovodičov

V polovodičoch existujú dva druhy vodivosti: **vlastná** a **prímesová** vodivosť. Vlastná vodivosť je elektrická vodivosť čistých polovodičov. Jej mechanizmus možno najlepšie vysvetliť na najpoužívanejšom polovodiči – kremíku.

Vlastný polovodič je polovodič, ktorý neobsahuje žiadne prímesy (do štruktúry polovodiča nebola pridaná žiadna prímes). V jeho štruktúre sa ale môžu objaviť nejaké nečistoty, tie však nebudeme v ďalšom výklade uvažovať.

Vlastná vodivosť kremíka

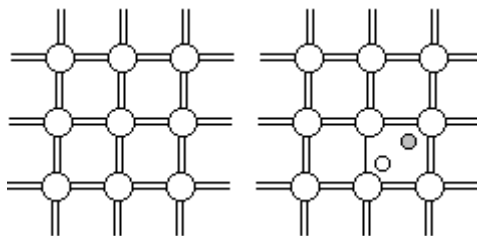
Najvýznamnejším materiálom pre výrobu polovodičových súčiastok je čistý monokryštalický kremík. Atóm kremíku má 14 elektrónov, z ktorých 10 je pevne viazaných k jadrú a zvyšné 4 vytvárajú elektrónové väzobné dvojice so štyrmi susediacimi atómami v kryštalickej mriežke. Kremík kryštalizuje v diamantovej štruktúre, tj. v plošne centrovanej kubickej sústave.

Na uvoľnenie elektrónu z tejto kovalentnej väzby je potrebné aktivačná energia, ktorá prekoná väzobnú energiu $E_v = 1,12\text{eV}$. Túto energiu musí elektrón získať naraz a sú tieto možnosti:

1. **Tepelná excitácia** – kladné ióny kryštálovej mriežky neustále kmitajú okolo svojich rovnovážnych polôh. Vďaka tomuto pohybu môže elektrón získať energiu, ktorá stačí na prekonanie väzbovej energie. Pri izbovej teplote ($T \approx 300\text{K}$) je energia tepelných kmitov $E \approx 0,025\text{eV}$ a uvoľňuje sa týmto spôsobom veľmi „málo“ elektrónov. S rastúcou teplotou sa ich počet zväčšuje.
2. **Svetelná excitácia (vnútorný fotoefekt)** – elektrón môže energiu získať dopadom elektromagnetického žiarenia (aj svetla). Žiarenie má energiu, ktorá je priamo úmerná jeho frekvencii. Energia viditeľného svetla sa pohybuje v intervale 1,5-3,1 eV. Viditeľné svetlo môže spôsobiť excitáciu elektrónu, resp. jeho vytrhnutie z kryštalickej mriežky atómu.
3. **Excitácia silným elektrickým poľom** – pri izbových teplotách nepripadá tento spôsob excitácie do úvahy, pretože by bola potrebná elektrická intenzita takej veľkosti, ktorá by daný materiál zničila (došlo by k elektrickému pierazu materiálu).

Ak dôjde k uvoľneniu elektrónu ($\odot$), začne sa pohybovať v kryštáli. Na jeho pôvodnom mieste vznikne prázdne miesto, ktoré sa javí tak, že má kladný náboj a tiež sa môže v kryštáli pohybovať. Táto kvázičastica (objekt, ktorý sa správa ako častica) sa nazýva **diera** ($\ominus$). Pohyb diery sa odohráva v kryštáli tak, že na chýbajúce miesto po uvoľnení elektrónu sa dostane iný elektrón a diera opäť vznikne inde (a tak sa vlastne diera presunula na iné miesto v kryštáli).

Proces vzniku páru elektrón – diera sa nazýva generácia páru elektrón – diera. Ku generácii je nevyhnutné dodať energiu. Túto energiu možno dodať niektorým z vyššie uvedených spôsobov.



Štruktúru polovodiča zakresľujeme len v rovine – v skutočnosti sa jedná o trojrozmerný útvar.

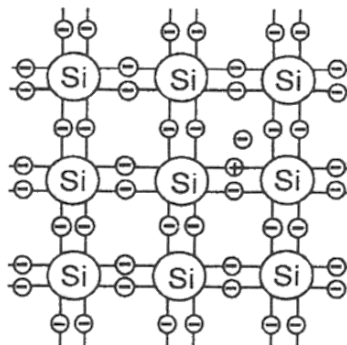
Ak dôjde k stretnutiu elektrónu a diery, stratí elektrón časť svojej energie a zapojuje sa opäť do väzobnej dvojice. Tomuto procesu hovoríme **rekombinácia**. Pri rekombinácii sa uvoľňuje energia. V polovodiči sa pri stálnej teplote udržiava dynamická rovnováha medzi generáciou a rekombináciou.

Ak zapojíme polovodič do elektrického obvodu, vzniká v ňom elektrické pole, ktoré spôsobuje usporiadaný pohyb diery v smere elektrickej intenzity a voľných elektrónov v opačnom smere. Výsledný elektrický prúd je súčtom prúdu elektrónov a diery: $I = I_e + I_d$. Hustota elektrónov sa s rastúcou teplotou zväčšuje, preto merný elektrický odpor klesá na rozdiel od kovov, kde je hustotavoľných elektrónov konštantná a merný odpor sa s rastúcou teplotou zväčšuje. V kovoch totiž nedochádza k uvoľňovaniu ďalších elektrónov z väzby mriežky.

Tento typ vodivosti sa nazýva vlastná vodivosť.

Kremík

Kremík je prvok IV. skupiny periodickej sústavy, preto každý atóm kremíka je v monokryštáli viazaný kovalentnou väzbou so štyrmi susednými atómami kremíka. Pri teplotách blízkyh $0K$ sú valenčné elektróny viazané, preto je kremík nevodič. Ak valenčný elektrón získa aktivačnú energiu $\Delta E = 1,12eV = 1,8 \cdot 10^{-19} J$, stane sa voľným. Po uvoľnenom elektróne ostane voľné miesto, ktoré sa správa ako fiktívna kladne nabitá častica – **diera**, ktorá sa tiež môže pohybovať, teda prispieva k elektrickej vodivosti kremíka.



Tento dej sa nazýva **generácia páru elektrón-diera**. Čím má polovodič vyššiu teplotu, tým viac párov vznikne. Súčasne v polovodiči prebieha aj opačný proces. Voľný elektrón zaujme miesto diery, zanikne voľný elektrón aj diera. Tento proces sa nazýva **rekombinácia**. Pri danej teplote sa vždy vytvorí dynamická rovnováha medzi vznikajúcimi a zanikajúcimi pármí. Pre koncentráciu voľných elektrónov (a tiež dier) v čistom polovodiči platí vzťah

$$n(T) = A(T) \cdot e^{\frac{\Delta E}{2kT}}$$
, kde $k = 1,38 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$ je Boltzmanova konštanta, $A(T)$ je veličina závislá na teplote. Napríklad v čistom kremíku je pri teplote $300K$ v $1m^3$ rádovo 10^{16} párov elektrón-diera. Pretože v $1m^3$ kremíka je rádovo 10^{28} atómov, znamená to, že elektrón uvoľní asi jeden atóm z 10^{12} atómov. Vodivosť čistých polovodičov, ktorá je vyvolaná generáciou párov elektrón-diera, sa nazýva **vlastná (intrinzická) vodivosť**. Pre vlastnú vodivosť je charakteristická rovnaká koncentrácia voľných elektrónov a dier. Čistý polovodič sa nazýva aj vlastný polovodič.

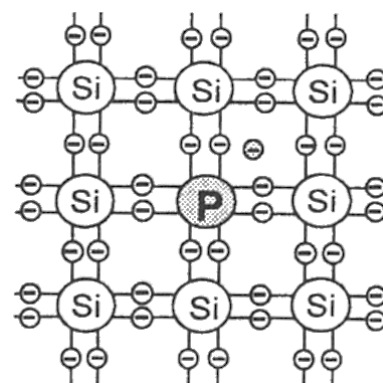
Prímesové polovodiče

Väčšie využitie ako čisté polovodiče majú **prímesové polovodiče**. Sú to polovodiče, ktorých vodivosť je určená prímesami.

Prímesové polovodiče sú polovodiče, ktoré obsahujú prímesy – atómy iného prvku.

Energia, ktorá je nutná k odtrhnutiu elektrónu od atómu prvku, podstatným spôsobom ovplyvňuje vlastnosti polovodičov. Cudzí atóm sa môže vyskytovať v:

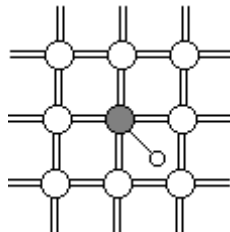
1. **Substitučnej polohe** – nahradí vlastný atóm v jeho polohe v kryštalickej mriežke.
2. **Intersticiálnej polohe** – cudzí atóm sa nachádza mimo kryštalickú mriežku, mimo tzv. uzlové body.



V polovodičoch sa využíva substitučná poloha, pretože pri umiestnení do intersticiálnej polohy sa mení aj objem polovodiča. S rastúcim objemom klesá objemová hustota vodivostných častíc (počet na jednotku objemu), čo sa výrazne prejaví na vodivosti polovodiča. K výrazným zmenám vlastností polovodiča dochádza totiž už pri koncentrácii 1 atómu cudzieho prvku na 10^8 atómov čistého prvku (väčšinou kremíku).

V kremíku sa ako prímiesy používajú prvky III. a V. skupiny. Ak atóm prvku z V. skupiny, napríklad fosfor, arzén, antimón, zaujme miesto atómu kremíka, štyri valenčné elektróny sa zúčastnia na kovalentnej väzbe a jeden sa uvoľní.

Ak pridáme do kremíka (zo IV. skupiny periodickej tabuľky prvkov), prvok z piatej (P, As, Sb, ...), podieľajú sa len štyri z piatich valenčných elektrónov na kovalentnej väzbe s kremíkom. Piaty elektrón je viazaný slabo, môže sa uvoľniť a začať sa pohybovať kryštálom.

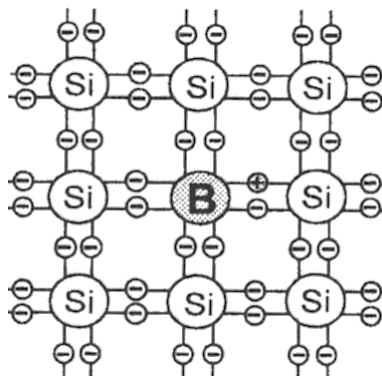


Prvky V. skupiny sa stávajú nepohyblivými kladnými iónmi a nazývajú sa **donor (darca)** – dávajú k dispozícii jeden **elektrón**. V takto upravenom kryštále prevažujú elektróny – sú **väčšinovými (majoritnými)** nositeľmi náboja. **Diery** sú **menšinovým (minoritným)** nosičom náboja. Takto sme vytvorili polovodič s **elektrónovou vodivosťou**, ktorý sa nazýva **polovodič typu N**.

Elektróny prevažujú preto, že okrem uvoľnených elektrónov od prvkov z V. skupiny, sú v kryštále aj voľné elektróny vzniknuté tepelnou generáciou. Mechanizmy vlastnej vodivosti nemožno zrušiť.

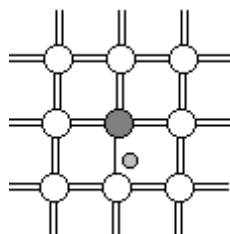
Prímes z V. skupiny teda dodá polovodiču voľné elektróny, preto sa volá **donor**. V polovodiči s donorovou prímesou je vodivosť spôsobená prevažne voľnými elektrónmi. Vodivosť spôsobená elektrónmi sa nazýva **elektrónová vodivosť**. Polovodič s elektrónovou vodivosťou sa nazýva **polovodič typu N**.

Ak atóm kremíka nahradíme atómom prvku z III. skupiny, napríklad bórom, hliníkom, gáliom, indiom, tri valenčné elektróny sa zúčastnia väzby a jedno miesto vo väzbe ostane neobsadené – vznikne diera.



Takáto prímes sa nazýva **akceptor**, lebo elektrón uvoľnený z iného atómu môže zaujať uvoľnené miesto vo väzbe. V polovodiči s akceptorovou prímesou je vodivosť spôsobená prevažne dierami. Vodivosť spôsobená dierami sa nazýva **dierová vodivosť**, polovodič s dierovou vodivosťou sa nazýva **polovodič typu P**.

Ak pridáme do kremíka prvok z tretej skupiny (B, Al, Ga, In, ...), obsadí svojimi elektrónmi len tri väzby. Po chýbajúcom elektróne, ktorý by sa podieľal na ďalšej väzbe, vznikne diera.



Táto môže byť jednoducho zaplnená preskokom elektrónu z niektorého susedného atómu kremíka. Diera sa takýmto spôsobom môže pohybovať kryštálom. Prímesy sa stávajú nepohyblivými zápornými iónmi a nazývajú sa **akceptory (príjemcovia)**. Prijímajú totiž elektróny od pôvodného prvku polovodiča.

Majoritnými nositeľmi náboja sú diery, minoritnými elektróny. Týmto spôsobom vznikol polovodič s **dierovou vodivosťou**, ktorý sa nazýva **polovodič typu P**.

Typy polovodičov si je možné zapamätať jednoducho: elektrónová vodivosť je spôsobená elektrónmi so záporným (negatívnym) nábojom a vzniká polovodič typu N; vodivosť dierová je spôsobená dierami s kladným (pozitívnym) nábojom – vzniká polovodič typu P.

Hustota voľných nosičov náboja v prímesových polovodičoch je pri nízkych teplotách konštantná. Pri zvyšovaní teploty sa začína uplatňovať tiež vodivosť vlastná, ktorá zvyšuje koncentráciu najmä minoritných nositeľov náboja. U väčšiny polovodičových súčiastok je tento jav nežiadúci, preto musia byť súčiastky chladené.

Aby sa prímesová vodivosť mohla uplatniť, musí byť koncentrácia prímesí podstatne vyššia ako koncentrácia párov elektrón-diera. Pretože pri teplote $300K$ je v $1m^3$ kremíka rádovo 10^{16} párov, prímesí musí byť o niekoľko rádov viac. Ak v kremíku pripadá atóm prímesi na 10^6 až 10^9 atómov kremíka, hovoríme, že polovodič je **slabo dotovaný**. Ak pripadá atóm na prímesi na 10^3 až 10^6 atómov kremíka, hovoríme, že polovodič je **silno dotovaný**. Na vodivosti polovodiča sa vždy podieľajú elektróny aj diery. Je to spôsobené jednak tým, že v polovodiči vždy prebieha generácia párov elektrón-diera, jednak tým, že do polovodičov sa pridávajú donorové aj akceptorové prímesi. Elektricky nabité častice s vyššou koncentráciou sa nazývajú **majoritné**, elektricky nabité častice s nižšou koncentráciou sú **minoritné**.

V homogénnych polovodičoch platí Ohmov zákon, t.j. závislosť prúdu od napätia je pri stálych podmienkach (teplota, osvetlenie atď) lineárna. Ak je polovodič nehomogénny, stáva sa voltampérová charakteristika nelineárna, teda neplatí Ohmov zákon. Práve nelineárnosť tejto charakteristiky spôsobuje, že nehomogénne polovodiče majú širšie praktické použitie ako homogénne.