Elektrické vlastnosti pevných látek

Pohyb elektronů obrovskými rychlostmi v energetických pásech krystalu je chaotický: elektrony se pohybují všemi směry, a proto v makroskopickém měřítku nepřenášejí elektrický proud.

Přenos náboje (tedy průchod elektrického proudu) je možný pouze tehdy, pokud vnější elektrické pole udělí elektronům dodatečnou rychlost v jednom směru. To vyplývá ze zákona zachování energie - není možné, aby se přemisťovaly částice s nábojem (tj. aby elektrostatická nebo vnější síla konaly práci) bez dodání energie (např. ze zdroje elektrického napětí).

Tuto situaci lze přiblížit analogií s molekulami vzduchu. Ve vzduchu se molekuly i za úplného bezvětří pohybují střední rychlostí o velikosti zhruba $500\,\mathrm{m\,s^{-1}}$. Přesto nikdo nemá pocit, že v zavřené místnosti fouká vítr (molekuly vzduchu do nás narážejí symetricky ze všech stran a jejich energie je díky jejich velmi malé hmotnosti velmi malá). K makroskopickému přenosu látky dojde až při proudění, které má mnohem menší velikost rychlosti (např. už při velikosti rychlosti $40\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ se jedná o orkán).

Elektrický proud v kovech je spjat s rychlostí pohybu elektronů o velikosti mnohem menší - řádově $\mathrm{mm.s^{-1}}$.

V krystalu se postupně zaplňují dovolené pásy (**valenční pásy**), které jsou od dalšího dovoleného pásu (**vodivostní pás**) odděleny **zakázaným pásem** o šířce E_g, jak ukazuje obr. 94.

Index *g* pochází z anglického *gap* - *mezera*.

Zakázaný pás je pás, ve kterém se standardně nenacházejí žádné částice.

Pás je tvořen několika energetickými hladinami. Pro další vysvětlování vlastností krystalů je dobré energetické hladiny sloučit do pásů, neboť nebude podstatné, v jaké energetické hladině se elektron nachází, ale pouze do jakého patří pásu. Podle příslušnosti dané energetické hladiny do určitého pásu a podle zaplnění pásu lze snadněji definovat kovy, polovodiče, určovat průhlednost krystalů a další vlastnosti.



Obr. 94

Elektrony ve valenčním pásu (tj. elektrony s příslušnými energetickými hladinami, které patří do valenčního pásu) se podílejí na vazbě atomu s jinými atomy. Elektrony v pásu vodivostním jsou z vazeb uvolněné a mohou se jím volně pohybovat. Proto mají větší energii než elektrony v pásu valenčním - jejich energie je zvětšená o práci, kterou je nutné elektronům dodat na „rozbití“ vazby.

Schéma jednotlivých pásů znázorněné na obr. 94 je typické pro většinu prvků (krystalů, polovodičů, ...), ale pro jednotlivé prvky, krystaly, ... se podstatně liší šířkou zakázaného pásu E_g a obsazením jednotlivých pásů. Tak lze rozlišit:

1. vodiče - jejich vodivostní pás a valenční pás se překrývají nebo vodivostní pás je

obsazen z jedné poloviny (aby měl elektron po uvolnění se z vazby kam přejít) a oba pásy jsou od sebe odděleny zakázaným pásem šířky $E_g < 3\,eV$. Vzhledem k malé šířce zakázaného pásu stačí nepatrný vliv elektrického pole k tomu, aby se některé elektrony dostaly z pásu valenčního do vodivostního (tj. získaly energii nutnou na překonání zakázaného pásu) a začaly se usměrněně pohybovat. Umístění valenčního a vodivostního pásu vzhledem k Fermiho energii E_F ukazuje obr. 95.

2. izolanty - valenční pás je zcela zaplněn a mezi vodivostním pásem a valenčním pásem je zakázaný pás šířky $E_g > 3\,eV$. Vnější elektrické pole, které by bylo schopno dodat některému elektronu tak velkou dodatečnou energii, aby přešel z pásu valenčního do vodivostního, je nesmírně silné. Jeho působením pak zpravidla dochází i k porušení krystalové mřížky, což se navenek (makroskopicky) projeví probitím nebo spálením izolantu. Souvislost valenčního a vodivostního pásu s Fermiho energií ukazuje obr. 95.
3. polovodiče - při $T = 0\,K$ mají vlastní polovodiče valenční pás zcela zaplněn a vodivostní pás zcela prázdný. S rostoucí teplotou některé elektrony „přeskočí“ do vodivostního pásu, a tak s rostoucí teplotou roste vodivost polovodiče. Tímto přechodem se elektron uvolní z kovalentních vazeb a začíná se pohybovat krystalem. Po elektronu vzniká prázdné místo - díra, která může být zaplněna jiným volným elektronem, a tak krystalem putují nejen volné elektrony, ale také díry (děrová vodivost).

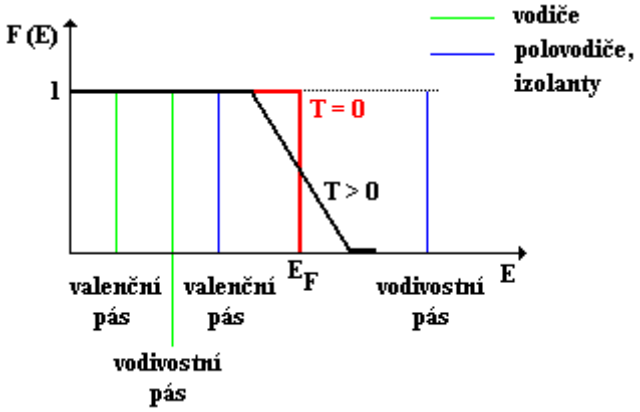
Díra je prázdné místo po elektronu - nepatří tedy mezi „normální“ částice. Vzhledem k tomu, že se může „přemístit“ v krystalu polovodiče tím, že jí zaplní jiný elektron, po kterém vznikne díra jinde, hovoří se o ní jako o kvazičástici (tj. „něco jako částice“).

a) polovodič typu N - tvořen kombinací prvků ze 4. a 5. skupiny periodické soustavy prvků. Prvek z 5. skupiny dává k dispozici jeden elektron. Ten ale není volný, takže nemůže být ve vodivostním pásu. Je v pásu valenčním nebo v zakázaném pásu. Vzhledem k tomu, že tento 5. elektron je velmi slabě vázán k jádru, stačí malá energie k jeho uvolnění. Proto nemůže být v pásu valenčním, ale je v pásu zakázaném na tzv. donorových hladinách (viz obr. 96).

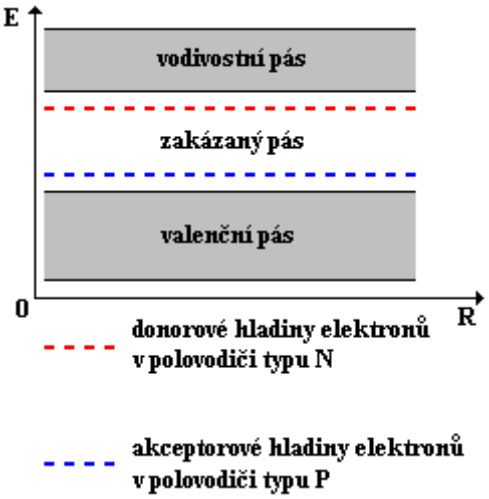
Donorové hladiny jsou hladiny, na kterých „sedí“ ty elektrony, které může prvek z páté skupiny *darovat* krystalu.

b) polovodič typu P - tvořen kombinací prvků ze 4. a 3. skupiny periodické soustavy prvků. Prvku ze 3. skupiny chybí jeden elektron, takže v polovodiči vzniká díra. Elektrony příměsi (tj. prvku ze 3. skupiny) se nalézají v zakázaném pásu, ale tentokráte v blízkosti pásu valenčního na akceptorových hladinách (viz obr. 96).

Akceptorové hladiny jsou neobsazené, jsou schopné *přijmout* elektron, který prvku ze 3. skupiny chybí na vytvoření pevné kovalentní vazby s prvkem 4. skupiny (to je ten prvek, který je základem polovodiče - např. křemík).



Obr. 95



Obr. 96

Stručně řečeno: energetické pásy, které jsou zcela zaplněny elektrony, nepřispívají vůbec k vedení proudu.

Energii nutnou k překonání zakázaného pásu, tj. k tomu, aby se elektron dostal z valenčního pásu do vodivostního, musí elektron získat najednou a jsou tyto možnosti jejího získání:

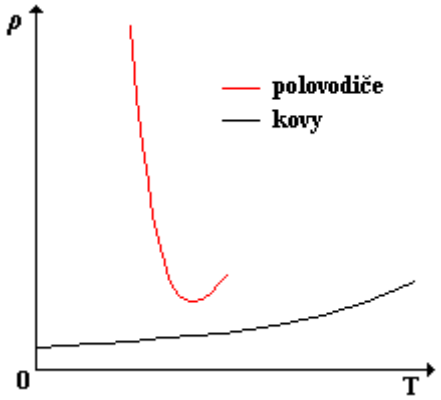
1. tepelná excitace - kladné ionty krystalové mřížky neustále kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Elektron proto může získat energii, která stačí na překonání energie vazebné (tj. na překonání zakázaného pásu). Při pokojových teplotách ($T \approx 300\,\mathrm{K}$) je energie tepelných kmitů $E \doteq 0{,}025\ \mathrm{eV}$ a uvolňuje se tedy tímto způsobem velice málo elektronů. S rostoucí teplotou se jejich počet ale zvětšuje.
2. světelná excitace (vnitřní fotoefekt) - elektron může energii získat dopadem elektromagnetického záření (světla). Záření má energii, která je přímo úměrná jeho frekvenci. Energie viditelného světla se pohybuje v rozmezí $(1{,}5;\ 3{,}1)\ \mathrm{eV}$, což je energie srovnatelná se šířkou zakázaného pásu kovů a izolantů.
3. excitace silným elektrickým polem - při pokojových teplotách nepřipadá tento způsob v úvahu, neboť by bylo nutné použít elektrické pole s tak velkou elektrickou intenzitou, která by daný materiál zničila (nastal by tzv. elektrický průraz materiálu).

Turista, který stoupá na vrchol kopce může svojí potenciální energii zvyšovat postupně a s přestávkami (pauza na svačinu, odpočinek, ...), zatímco elektron musí celou energii nutnou na překonání zakázaného pásu získat najednou!

Trojmocné kovy (Al, ...) nejsou lepšími vodiči než kovy jednomocné, protože ze tří valenčních elektronů připadajících na atom pouze poslední lichý vstupuje do neobsazeného vodivostního pásu a může tedy být nositelem volného náboje. Existenci dvojmocných kovů (Mg, Zn, ...) lze též snadno vysvětlit. Rozšíření hladin v pásy může být značné a stává se, že se dovolené pásy překrývají. Celkový sudý počet elektronů $2N$ se pak rozdělí do dvou pásů, schopných pojmout celkem $4N$ elektronů. Látka s takto zaplněnými pásy má vlastnosti kovu, protože rozmezí dovolených hladin obsazených a neobsazených v základním stavu leží hluboko uvnitř jednoho nebo i dvou vodivostních pásů.

S rostoucí teplotou se mění jak u kovů tak u polovodičů měrný odpor ρ. U kovů se při každé teplotě mohou podílet na přenosu náboje všechny elektrony ve vodivostním pásu. Vzhledem k tomu, že jich je v tomto pásu málo, je měrný odpor kovů malý. S rostoucí teplotou měrný odpor mírně vzrůstá. Prudkému nárůstu brání kmity mříže, které se s rostoucí teplotou zvětšují a stále více překážejí pohybu elektronů. I v polovodičích se z téhož důvodu každý elektron pohybuje o něco nesnadněji, má-li mřížka vyšší teplotu, ale průběh závislosti měrného odporu ρ na teplotě je dán především vzrůstem počtu elektronů přenesených při vyšší teplotě do vodivostního pásu polovodiče.

Uvedená závislost je schematicky zobrazena na obr. 97.



Obr. 97

Energetické hladiny v nekrystalických pevných látkách (sklo, ...) nejsou tak jednoznačné - dovolené pásy nemají tak ostré hranice jako u krystalů. Výše uvedené vlastnosti týkající se elektrické vodivosti se tím změní jen nepatrně.

V pevných látkách mohou elektrický proud přenášet i ionty. Vzhledem k tomu, že ionty jsou v krystalech mnohem pevněji vázány, je vodivost iontových krystalů o mnoho řádů nižší než vodivost kovů. Vodivost výrazně stoupne, je-li v krystalu mnoho vakancí. Na základě toho lze pomocí elektrického proudu vyšetřovat vakance v krystalech. Iontová vodivost krystalů vzrůstá s rostoucí teplotou, neboť při vyšší teplotě vzniká jednak více vakancí a jednak ionty v jejich blízkosti snáze přeskakují do sousedních volných míst a nesou s sebou svůj náboj. Proto iontové krystaly (NaCl, LiF, ...) nejsou lepšími izolanty než např. diamant, přestože mají širší zakázaný pás.

© Encyklopedie Fyziky (http://fyzika.jreichl.com); Jaroslav Reichl, Martin Všetička
Licence http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/ zakazuje úpravy a komerční distribuci.