

1.1 Základy atómovej teórie

1.1.1 Stavba atómu

1.1.1.1 Elementárne častice

Atómy sú systavy so zložitou vnútornou stavbou. Jadro atómu je kladne nabité a tvorí prevažnú časť hmoty. Jeho základnými stavebnými časticami sú elektricky neutrálne neutróny o $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$ kg a protóny o $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$ kg, nesúce kladný elementárny náboj, ktorého veľkosť je $e = -1,602 \cdot 10^{-19}$ C. Počet neutrónov v jadre udávame neutrónovým číslom N, počet protónov protónovým (atómovým) Z a ich súčet nukleónovým A. Základnými stavebnými časticami obalu atómu sú elektróny o hmotnosti $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$ kg, nesúce záporný elementárny náboj. Elektroneutrálny atóm obsahuje rovnaký počet elektrónov ako protónov. Rozmery atómov sú rádovo 10^{-10} m.

1.1.1.2 Rutherfordov planetárny model atómu

Príťažlivú elektrostatickú silu medzi kladne nabitým jadrom a záporne nabitými elektrónmi kompenzuje odstredivá sila. Predstava je v rozpore so zákonmi klasickej elektrodynamiky, podľa ktorej obiehajúci elektrón spojitou vyžaruje energiu a špirálovite sa približuje k jadrú. Spektrá prvkov sú v skutočnosti stále a atómy majú čiarové spektrá.

1.1.1.3 Kvantová teória, fotoelektrický jav

Na základe štúdia absolútne čierneho telesa dospel M. Planck (1900) k záveru, že energia nie je vyžarovaná alebo pohlcovaná spojitou, ale po kvantách – celistvých násobkoch elementárneho kvanta energie o veľkosti:

$$W = h \cdot \nu \quad (1.1)$$

kde $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js je Planckova konštanta a ν je frekvencia žiarenia.

Teória vysvetľuje fotoelektrický jav podaný A. Einsteinom (1905). Predpokladá, že svetlo je zložené z elementárnych kvánt energie – fotónov, pohybujúcich sa rýchlosťou svetla s energiou úmernou frekvencii žiarenia. Po dopadnutí svetla na kov fotóny odovzdávajú energiu elektrónom. Časť je spotrebovaná na ich uvoľnenie z atómu (výstupná práca) a zvyšok vo forme kinetickej energie. Pretože jeden fotón uvoľní jeden elektrón,

$$h \cdot \nu = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \nu^2 + W_1 \quad (1.2)$$

kde m je hmotnosť elektrónu, ν jeho rýchlosť a $W_1 = h\nu_0$ výstupná práca, ν_0 je charakteristická frekvencia. Pre každú časticu s energiou teda možno vypočítať jej hmotnosť. Fotón o energii W_f má hmotnosť

$$m_f = \frac{W_f}{c^2} = \frac{h \cdot \nu}{c^2} = \frac{h}{\lambda \cdot c} \quad (1.3)$$

kde λ je vlnová dĺžka.

1.1.1.4 Základy elektrónovej teórie

Vlastnosti atómov v materiáloch sú charakterizované 3 Bohrovými postulátmi, Pauliho vylučovacím princípom, pravidlom maximálnej multiplicity, kvantovými číslami. Vlny a častice sú iba dve formy tej istej fyzikálnej reality. Častica alebo kvantum svetla sa nazývajú fotóny. Pohyb elektrónu je v kvantovej mechanike opísaný vlnovou funkciou (de Broglieho vlnou) ψ . Vlnovú funkciu ψ možno získať riešením **Schrödingerovej vlnovej rovnice**, ktorá má pre jeden hmotný bod a pre časovo ustálený dej tvar:

$$\Delta\psi + \frac{8\pi^2 \cdot m}{h^2}(E - U)\psi = 0 \quad (1.4)$$

kde $\Delta = \frac{\delta^2}{\delta x^2} + \frac{\delta^2}{\delta y^2} + \frac{\delta^2}{\delta z^2}$ je Laplaceov operátor,

x, y, z sú priestorové súradnice,

m je hmotnosť častice,

E - celková energia,

U - potenciálna energia.

Vlnová funkcia ψ je pri stacionárnom stave atómu funkciou priestorových súradníc elektrónu, x, y, z a štvorec ψ^2 tejto funkcie je úmerný pravdepodobnosti, že sa elektrón nachádza v danom priestore. Grafické znázornenie ψ^2 vymedzuje priestor, v ktorom sa nachádza oblak daného elektrónu.

Elektrón je elementárna častica, ktorá obieha okolo jadra po kvantových dráhach a má záporný náboj, ktorý sa rovná elementárnemu náboju ($1e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)

1.1.1.5 Bohrove postuláty

Bohrov model atómu, pôvodne vypracovaný pre vodík predpokladá rotáciu elektrónov okolo jadra iba po určitých - kvantových dráhach kruhového tvaru.

1. Elektrón sa pohybuje po kruhovej dráhe s splňujúcej kvantovú podmienku:

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} \quad (1.5)$$

kde mvr je moment hybnosti elektrónu, $n = 1, 2, 3, \dots$ hlavné kvantové číslo a m hmotnosť elektrónu na kruhovej dráhe polomeru r a rýchlosti v .

2. Každá kvantová dráha predstavuje určitý stacionárny stav elektrónu v atóme, ktorý charakterizuje kvantové číslo n . Jednotlivé stavy sa odlišujú obsahom energie.
3. Vyžarovanie alebo pohlcovanie energie sa uskutočňuje len pri prechode medzi kvantovými dráhami. Prechod elektrónu medzi energetickými stavmi sa uskutočňuje po kvantách daný vzťahom:

$$W_n - W_m = h \cdot \nu \quad (1.6)$$

Z postulátov vyplýva pohybová rovnica: hodnoty odstredivej a príťažlivej sily elektrických nábojov jadra a elektrónov sú zhodné podľa Coulombovho zákona:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (1.7)$$

1.1.1.6 Vlnový charakter elektrónu

L. de Broglie (1924) dospel spojením Einsteinovej a Planckovej rovnice k záveru, že podobne ako svetlo, aj pohybujúci sa elektrón má vlnový a časticový charakter a odvodil vzťah:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} \quad (1.8)$$

z toho upravením 1. Bohrovho postulátu dostávame vzťah:

$$2\pi r = \frac{nh}{mv} = n\lambda \quad (1.9)$$

z ktorého vyplýva, že elektrón sa môže pohybovať len po dráhach zodpovedajúcich celistvému násobku n vlnovej dĺžky λ pohybujúceho sa elektrónu.

1.1.1.7 Kvantové čísla

Kvantové čísla popisujú pohyb elektrónu v poli protónu. Určujú energetický a pohybový stav elektrónov v atóme.

Hlavné kvantové číslo n nadobúda hodnoty celých čísel $1 \dots n$ a označuje elektróny jednej vrstvy (sféry). Označujeme ich K, L, M, N, O, P, Q ($n = 1 \dots 7$). Maximálny počet elektrónov v 1 vrstve je $2n^2$.

Vedľajšie kvantové číslo l ($l = 0, 1 \dots n - 1$) charakterizuje elektróny líšiace sa energiou v rámci vrstvy – orbitály (orbity) a tiež moment hybnosti elektrónu. Označujeme ich s, p, d, f, g, h. Každá vrstva má konštantný počet orbitálov. Orbitál označuje vlnovú funkciu odpovedajúcu hodnote energie elektrónu, závislú od súradníc vymedzujúcich priestor pohybu elektrónu a od vlnových čísel n , l , a m . Orbitál predstavuje objemový element priestoru, v ktorom sa pravdepodobne vyskytuje častica v danom momente. Orbitály s takmer rovnakou energiou alebo s blízkou energiou tvoria energetické vrstvy (hladiny).

Magnetické kvantové číslo m ($m = 1, \dots, 0 \dots, -1$) určuje projekciu dráhového magnetického momentu do predpísaného smeru. Daný orbitál sa teda štiepi na $(2l+1)$ skupín. Súvisí s rozložením dráh v priestore a vysvetľuje Zeemanov jav. Umiestnením atómu do silného magnetického poľa sa štiepia spektrálne čiary, pretože elektróny sa líšia obsahom energie.

Spinové kvantové číslo $s = \pm 0,5$ rozlišuje kvantovaný smer rotácie elektrónu okolo svojej osi – spinu.

1.1.1.8 Pauliho vylučovací princíp

V atóme nemôžu existovať dva elektróny s rovnakými kvantovými číslami. Maximálny počet elektrónov v orbitále je **2** ($2l+1$) a vo vrstve **$2n^2$** .

1.1.1.9 Elektrónová konfigurácia

V základnom stave má atóm také rozloženie elektrónov, aby ich energia bola čo najnižšia. Bolo zistené, že u väčšiny prvkov sa vrstvy K a L sa zaplňajú pravidelne, vo vrstve M sa najprv vybudujú orbitály s a p, d ostáva neobsadený a buduje sa orbitál s v štvrtej vrstve, pretože elektróny obsadzujú energeticky výhodnejšie orbitály. Veľmi stabilná je konfigurácia elektrónového dubletu u hélia a mimoriadne oktetov u Ne, Ar, Kr, Xe, Ra, vytvárajúcich na poslednej vrstve úplne obsadený orbitál. Z toho vyplývajú chemicko-fyzikálne vlastnosti prvkov. Podobné chemické správanie skupín prvkov vyplýva z podobného usporiadania vonkajšej vrstvy ich atómov. Prvky s malým počtom elektrónov nad elektrónovou konfiguráciou najbližšieho vzácneho plynu (alkalické kovy) a prvky ktorým k tomu chýba malý počet elektrónov sú chemicky najreaktívnejšie.

1.1.1.10 Pravidlo maximálnej multiplicity (Hundovo)

Elektróny obsadzujú orbitály tak, aby pred ich spinovým párovaním bolo na orbitáloch daného typu čo najviac elektrónov s rôznym magnetickým číslom.

1.1.2 Stavba molekúl a vlastnosti chemických zlúčenín

Molekulu tvorí sústava stabilne viazaných atómov. Atómy sú v molekule pospájané chemickou väzbou v určitom poriadku a sú rozložené určitým spôsobom v priestore. Spojenie atómov prvkov v molekule sa uskutočňuje vonkajšími (valenčnými) elektrónmi.

Molekuly s iónovou väzbou: Iónová väzba vzniká medzi atómami so značne rozdielnym počtom valenčných elektrónov, to znamená, ak jeden z nich má dostatočne nízku ionizačnú energiu. Iónová väzba vyplýva z elektrostatickej príťažlivej sily medzi kladnými a zápornými iónmi. Je typická pre izolanty a nie je smerová.

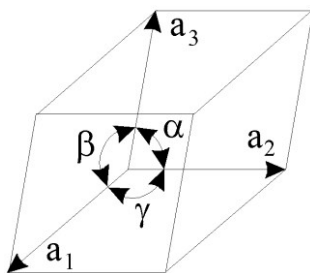
Molekuly s kovalentnou väzbou: Je tvorená dvojicami elektrónov spoločnými pre dva atómy. Vzniká medzi rovnakými atómami, najmä u prvkov s veľkým počtom valenčných elektrónov. Vznik elektrónových dvojíc je podmienený prekryvaním orbitálov elektrónov s opačnými spinmi. Môže byť nepolárna (medzi atómami s rovnakou elektronegativitou) a polárna (ak sa líši elektronegativita atómov viazaných v molekule). Kovalentná väzba je typická pre polovodiče.

Kovová väzba: Podstata chemickej väzby v kove je odlišná od kovalentnej a iónovej väzby. Atómy kovov obsahujú málo valenčných elektrónov na to, aby sa medzi nimi mohli vytvárať elektrónové dvojice (t.j. kovalentnú väzbu). Uzly kryštálovej mriežky sú obsadené kladnými iónmi a medzi nimi sa neusporiadane pohybujú odštiepené valenčné elektróny. Postatou kovovej väzby sú elektrostatické príťažlivé sily medzi súborom kladných iónov a súborom pohyblivých elektrónov.

1.2 Kryštály

1.2.1 Kryštalická tuhá látka

Kryštalická tuhá látka je látka (kovy, polovodiče,) s pravidelnou stavbou vznikajúcou periodickým opakovaním elementárnej kryštálovej bunky v troch smeroch v priestore. Elementárna bunka je najmenší rovnobežnosten obsahujúci základný motív kryštálovej štruktúry (obr. 1.2).

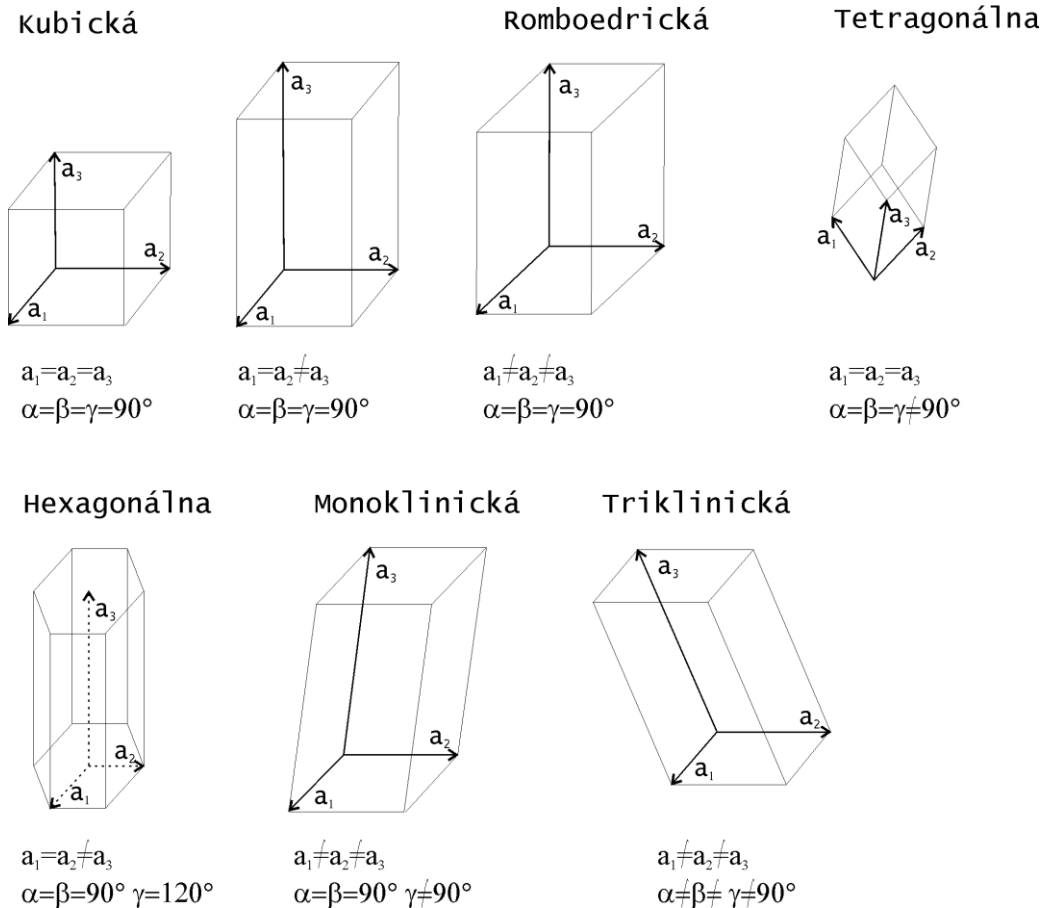


Obr. 1.2 Elementárna kryštalová bunka kryštálovej štruktúry

Kryštalografická mriežka je usporiadanie nekonečného počtu uzlových bodov (atómov, molekúl, iónov) v priestore tak, že usporiadanie bodov v okolí daného je identické s usporiadaním v okolí ktoréhokoľvek. Základnou jednotkou priestorovej mriežky je elementárna kryštalová bunka, ktorá sa skladá z uzlových bodov a hrán a má typické definované uhly.

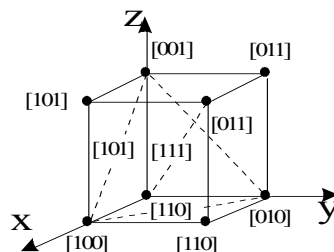
Bravaisove mriežky zahŕňajú 7 základných jednoduchých kryštalografických sústav (obr. 1. 3) a päť dvojnásobných, dve štvornásobné sústavy. Jednoduché sústavy kryštálovej mriežky sú: kosoštvorcová (rombická) - S, Ga, štvorcová (tetragonálna) - Sn_β, TiO₂, kocková

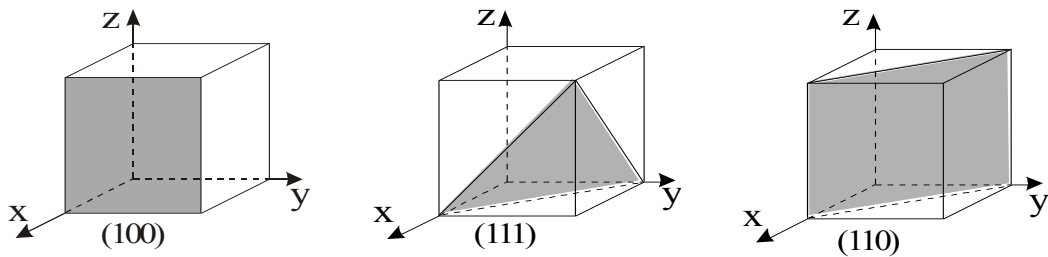
(kubická) - Cu, Ag, Au, Al, Fe, šesťuholníková (hexagonálna) - Zn, Mg, AsNi, klencová (romboedrická) - As, Sb, Bi, trojklonná (triklinická), monoklonná (monoklinická). Pre popis kryštalografickým smerov a rovín sa používajú Millerove indexy kryštalografického smeru (tri nesúdeliteľné čísla, označujúce smery v kryštále) a Millerove indexy kryštalografickej roviny (tri nesúdeliteľné čísla, označujúce polohu štruktúrnych rovín v kryštále).



Obr. 1.3 Jednoduché kryštalografické sústavy

Mnoho elektrických, fyzikálnych, tepelných a magnetických dejov prebieha prednostne v určitých kryštalových rovinách alebo kryštalových smeroch kryštálovej mriežky, a preto je potrebné poznať ich obecný opis. Princíp označovania kryštalografických smerov pomocou Millerových indexov kryštalografických smerov, je na obr. 1.4. Podobne je popis kryštalografických rovín realizovaný pomocou Millerových indexov kryštalografických rovín (Sivá plocha na obr. 1.4 označená pomocou indexov).



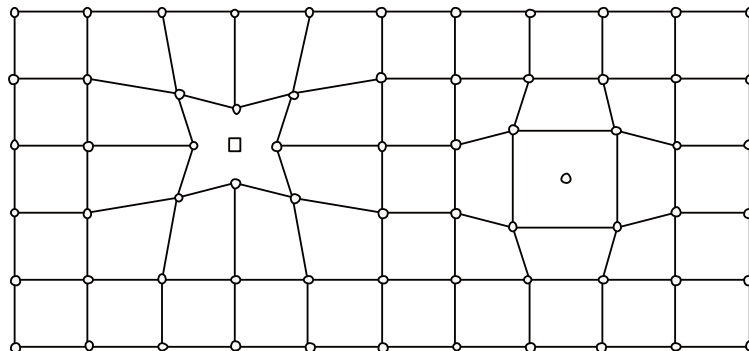


Obr. 1.4 Millerove indexy kryštalografických smerov a rovín

1.2.2 Submikroskopické poruchy kryštálovej mriežky

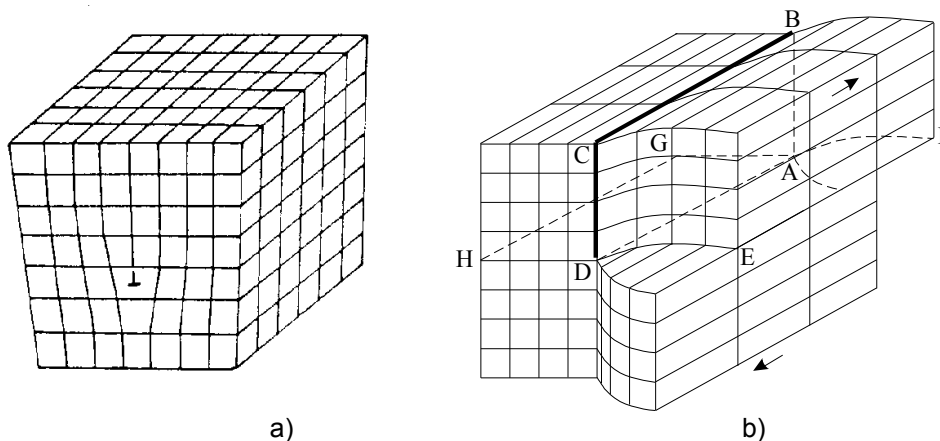
Submikroskopické poruchy kryštálovej mriežky ($< 10^{-7}$ m):

- **bodové poruchy:** vakencie, interstície (obr. 1.5), substitúcie. Vakencie (prázdne miesta) sa do kryštálu môžu dostať napr. vplyvom vysokej teploty v dôsledku veľkých kmitov atómov. Vakencie prispievajú k zvýšeniu neusporiadanosti kryštálovej mriežky a tým aj k zvýšeniu elektrického odporu. Interstície (cudzie atómy alebo atómy alebo prímеси v medziuzlovej polohe) a substitúcie (cudzí atóm alebo prímесь na mieste základného atómu) súvisia s čistotou a chemickým zložením materiálu. Bodové poruchy v iónových kryštáloch umožňujú difúziu a vedenie elektrického prúdu v iónovom kryštále. Vakencie vznikajú v dôsledku tepelných kmitov. Vakencie a interstície ovplyvňujú elektrický odpor, znižujú pohyblivosť voľných elektrónov v mriežke a prispievajú k zvýšeniu neusporiadanosti.



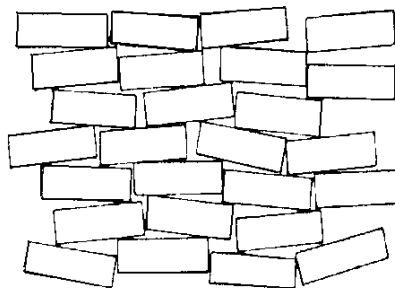
Obr.1.5 Vakancia a interstícia v reálnom kryštáli

- **čiarové poruchy:** Dislokácie ako čiarové poruchy sú charakterizované geometrickými a energetickými faktormi. Oblasť kryštálu porušená prítomnosťou dislokácie je od neporušenej časti kryštálu oddelená čiarou, ktorá prechádza približne stredom porušenej oblasti a nazýva sa dislokačná čiara. Rozlišuje dislokácie hranové a skrutkové (obr. 1.6) (Burgersov vektor - vektor relatívneho premiestnenia). Pohyb dislokácii realizovaný sklzom umožňuje plastickú deformáciu a pohyb šplhom umožňuje difúziu.



Obr.1.6 Hranová (a) a skrútková dislokácia (b)

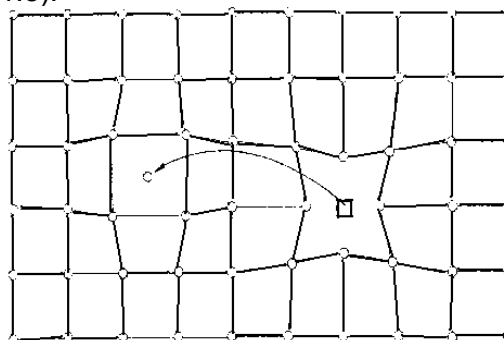
- **plošné poruchy:** Vrstevné chyby, povrchy, rozhrania zŕn, spočívajúce v nepravidelnom vystriedaní následných atómových rovín razených v určitom smere. Vrstevná chyba môže vzniknúť sklzom, vybratím jednej atómovej roviny a vložením jednej atómovej roviny. Iným typom plošnej poruchy je mozaika zŕn (obr.1.7).



Obr.1.7 Mozaikove bloky v štruktúre monokryštálu

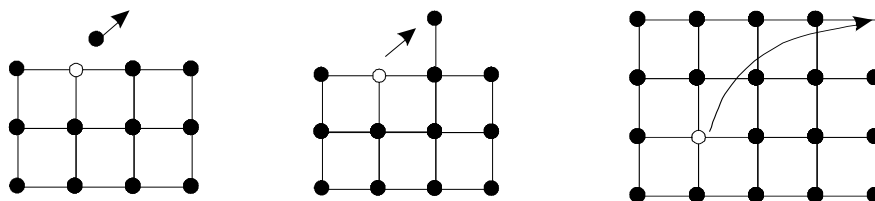
V iónovom kryštále existujú poruchy:

- **Frenkelova porucha:** Súčasný výskyt kladného iónu v interstickej polohe a vakancie na mieste kladného iónu (obr. 1.8).



Obr. 1.8 Frenkelova porucha

- **Shottkyho porucha:** Súčasný výskyt jednej vakancie na mieste kladného a jednej vakancie na mieste záporného iónu. Tieto poruchy vznikajú v hustých mriežkach, kde sa na voľné miesto na povrchu presúvajú častice z vnútra kryštálu, čo sa javí ako pohyb vakancie kryštálom. Shottkyho poruchy uľahčujú prenos častíc kryštálom, čím podporujú difúziu, elektrickú a tepelnú vodivosť (obr. 1.9).



Obr. 1.9 Spôsob vzniku Shottkyho poruchy

1.3 Rozdelenie materiálov pre elektrotechniku

Elektrotechnické materiály možno triediť podľa viacerých kritérií:

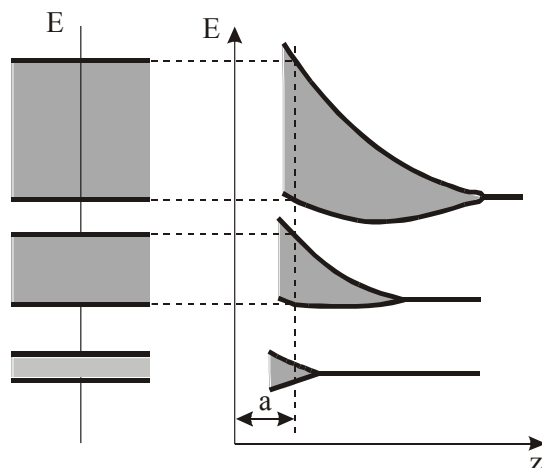
- podľa skupenstva: tuhé, kvapalné, plynné,
- chemickej podstaty: organické a neorganické,
- chemického zloženia a štruktúry elektrónového obalu.

Poznatky o elektrónovej konfigurácii atómov v základnom stave, ich periodicitu a vlastnosti materiálov závisia od vlastností vonkajšieho elektrónového obalu, od ktorého závisí typ chemickej väzby). Elektróny sú v molekule usporiadané tak, aby ich celková energia bola minimálna, t.j. aby ich stabilita bola čo najväčšia.

- **Chemická väzba iónová:** Vyplýva z elektrostatickej príťažlivej sily medzi kladne a záporne nabitými iónmi atómov s rozdielnym počtom valenčných elektrónov (NaCl). Je typická **pre izolanty**.
- **Chemická väzba kovalentná:** Je tvorená dvojicami elektrónov spoločnými pre oba atómy, typická u prvkov s veľkým počtom valenčných elektrónov. Typická je **u polovodičov**. Môže byť polárna a nepolárna a je to smerová väzba.
- **Kovová väzba:** Je väzba medzi kationmi a elektrónmi prvkov s malým počtom valenčných elektrónov, ktoré sú slabo viazané k jadrú. Podmienkou je veľmi tesné usporiadanie atómov v kryštálovej mriežke, ktoré je zárukou dobrej elektrickej a tepelnej vodivosti, nepriehľadnosti materiálov. Typická je **pre kovy**.

d) pásmovej teórie vodivosti tuhej látky:

Podstata pásmovej teórie vodivosti tuhej látky: Elektróny nemôžu svoju energiu zväčšovať spojite, ale len v skokoch. Hladiny dovolených energií sú oddelené hladinami zakázaných energií, t.j. energií, ktoré elektróny nemôžu nadobúdať. V 1 cm^{-3} tuhej látky sa nachádza až 10^{22} elektrónov. Ak sa N izolovaných atómov priblíži a vzájomne viaže, energie ich elektrónov, pôvodne rovnaké, sa navzájom ovplyvnia. Pre elektróny v kryštáli musí byť k dispozícii odpovedajúci počet energetických hladín, ktoré sú si veľmi blízke, takže sa v energetickej schéme prejaví ako súvislý energetický pás. Vzájomné pôsobenie medzi elektrónmi susedných atómov má za následok, že ich energetické hladiny sa štiepia a vytvárajú energetické pásma (obr. 1.10).

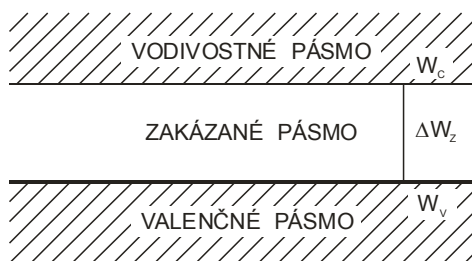


Obr. 1.10 Vznik energetických pásiem v kryštáli z hladín energie v atóme
(a – mriežková konštanta kryštálu, z – vzdialenosť medzi atómami v kryštále)

Energetické pásma v kryštáloch sú (obr. 1.11.):

- **vnútorné** (nemá vplyv na prenos náboja).
- **vonkajšie alebo valenčné pásmo**: Sústava energetických hladín, ktoré sú obsadené valenčnými elektrónmi vytvárajúcimi chemické väzby. V izolantoch a polovodičoch je to najvyššie plne zaplnené pásmo pásmovej štruktúry kryštálu. V kovoch je valenčné pásmo buď neúplne zaplnené alebo sa prekrýva s najbližším neobsadeným pásmom, splyva s vodivostným pásmom. Horná energetická hladina valenčného pásma je označená W_v .
- **vodivostné pásmo**: Súbor energetických pásiem, v ktorých sú „umiestnené“ elektróny uvoľnené z chemických väzieb. Je to čiastočne zaplnené pásmo dovolených energií elektrónov v kovovom kryštále alebo pri $T = 0$ K neobsadené dovolené pásmo v dielektriku a v polovodiči. Dolná energetická hladina vodivostného pásma je označená W_c .
- **zakázané pásmo**: Oblasť hodnôt energií, ktoré elektróny kryštálu nemôžu nadobúdať. Vyskytuje sa medzi vodivostným a valenčným pásmom. Elektrón z najvyššieho zaplneného pásma izolantu alebo polovodiča nemôže prejsť do vodivostného pásma, ak dostane menšiu energiu, ako je šírka zakázaného pásma. Šírka zakázaného pásma je materiálová konštanta, charakterizujúca izolačné vlastnosti.

Fyzikálna podstata elektrickej vodivosti materiálov vychádza z pásmovej štruktúry a v rámci nej z pohybu elektrónov v jednotlivých pásmach.

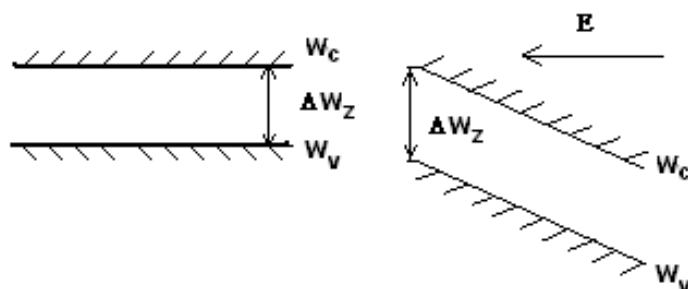


Obr. 1.11 Pásmový model tuhej látky

Šírka zakázaného pásma súvisí so štruktúrou materiálu a má prvoradý význam na jeho elektrickú vodivosť. Aj tu platí Pauliho vylučovací princíp: Počet elektrónov, ktorý sa môže umiestniť v dovolenom energetickom pásmo, je najviac dvojnásobkom počtu hladín v pásmo.

Štruktúra pásiem dovolených hodnôt energie je daná väzbovými silami, ktoré sú značné. Preto môžeme očakávať, že štruktúra energetických pásov bude len veľmi málo závislá na vonkajších silových poliach a na vonkajších podmienkach:

1. **Vplyv teploty na pásmovú štruktúru:** S rastom teploty dochádza u polovodičov k rozšíreniu kryštálovej mriežky (teplotná rozťažnosť) a k zväčšeniu amplitúd kmitania atómov okolo ich rovnovážnych polôh. Rastie pravdepodobnosť uvoľnenia elektrónov z kovalentnej väzby medzi jednotlivými atómami. To vedie k zmenšeniu šírky zakázaného pásma a k zväčšeniu koncentrácie voľných nosičov náboja vplyvom prechodu elektrónu medzi pásmi dovolených hodnôt energie.
2. **Vplyv tlaku:** S rastúcim tlakom (napr. hydrostatickým tlakom) sa znižuje mediatómová vzdialenosť medzi jednotlivými atómami v kryštále, čo vedie k zväčšovaniu ich väzby a teda k rozširovaniu zakázaného pásma.
3. **Vplyv silného elektrického poľa:** Vplyvom silného elektrického poľa dochádza k zmene kinetickej a potenciálnej energie elektrónov, čo sa navonok prejaví sklonom pásmovej štruktúry:



Obr. 1.12 Sklon energetických pásiem vplyvom vonkajšieho elektrického poľa

4. **Vplyv magnetického poľa:** Magnetické pole ovplyvňuje pohyb elektrónov vplyvom pôsobenia Lorentzovej sily. Dochádza k ovplyvneniu pohybu valenčných elektrónov a tiež k zmene pásmovej štruktúry kryštálu.

Na základe pásmovej teórie elektrickej vodivosti sa materiály delia na:

1. **Vodiče:** Typické je prekryvanie vodivostného a valenčného pásma, alebo neúplne obsadené valenčné pásmo a pokles vodivosti s rastom teploty.
2. **Izolanty:** Typická je šírka zakázaného pásma ΔW_z väčšia ako 3 eV, úplne voľné vodivostné a úplne zaplnené valenčné pásmo a vzrast vodivosti s rastom teploty a s rastom intenzity elektrického poľa E .
3. **Polovodiče:** Typická je šírka zakázaného pásma ΔW_z medzi 1,5 - 3 eV, úplne prázdne vodivostné a úplne zaplnené valenčné pásmo, vzrast vodivosti s rastom teploty, ale s rastom intenzity elektrického poľa E vodivosť nerastie, kým sa neprekročí kritická hodnota E .