

3.5. Vedení proudu v polovodičích

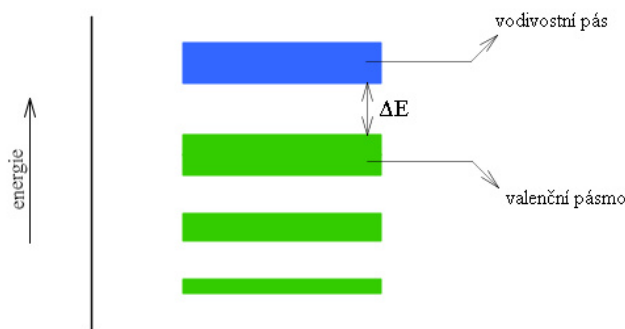


1. Umět klasifikovat látky podle vodivosti.
2. Seznámit se s fyzikálními vlastnostmi polovodičů, jejichž poznání vedlo k bouřlivému pokroku v elektronickém průmyslu.

3.5.1. Vlastní a nevlastní polovodiče

Schopnost pevné látky vést elektrický proud charakterizuje veličina **měrná elektrická vodivost**, která se může měnit ve velmi širokém rozpětí hodnot (např. pro pokojovou teplotu: diamant $3 \cdot 10^{-17} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, stříbro $6 \cdot 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$). Existuje jev **supravodivost**, kdy při velmi nízkých teplotách (pod kritickou hodnotou) přecházejí některé látky do supravodivého stavu s téměř nulovým elektrickým odporem. Například u prvku Mo je kritická teplota 0,915 K.

Podle hodnoty měrné elektrické vodivosti dělíme orientačně látky na tři typy: **vodiče** ($\gamma > 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$), **nevodiče** ($\gamma < 10^{-8} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$) a **polovodiče**. Polovodiče se vyznačují mnohem větší teplotní závislostí měrné vodivosti než je tomu u vodičů. S rostoucí teplotou měrná vodivost polovodičů rychle roste, kdežto u kovových vodičů klesá. Mimo teploty ovlivňuje vodivost některých látek významně například osvětlení. V látkách rozlišujeme **elektronovou vodivost** – nositeli proudu jsou elektrony, a **vodivost iontovou** – nositeli proudu jsou ionty. Iontová vodivost je typická pro kapalná roztoky a za určitých podmínek pro plyny, vyskytuje se též u pevných látek (iontové krystaly NaCl, AgBr ad.). Elektronová vodivost je typická pro kovové vodiče a polovodiče.



Obr. 3.5.-1 Pásová struktura pevné látky.

Zákony klasické fyziky nestačí k popisu vodivosti kovů, neboť se u tak velké prostorové hustoty částic projevují kvantové jevy. Jelikož kvantová mechanika není součástí bakalářské fyziky, budeme diskutovat vodivost v pevných látkách velmi povrchně. U elektronů se projevují vlnové vlastnosti, takže když se elektrony srážejí, dochází k interferenci tzv. de Broglieových vln elektronů. Ionty krystalové mřížky jsou v oscilačním pohybu. Podle zákonů kvantové fyziky jsou energie vln a kmitů kvantovány, tj. nabývají jen určitých diskrétních hodnot. V krystalu konečného rozměru se vyskytuje mezi **zakázanými energetickými pásy** velké množství těsně přiléhajících energetických hladin, což plyne z řešení kvantové úlohy o pohybu elektronů v krystalové struktuře pevné látky. Podle Pauliho vylučovacího principu se může na každé hladině vyskytovat jen omezený počet elektronů. Elektrony v pásu s nižší energií (**valenční pás**) jsou k atomu pevně vázány, v periferním pásu s vyšší energií

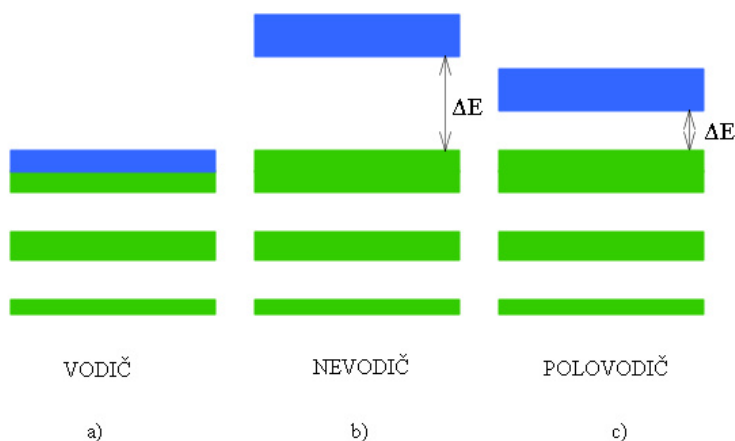
(**vodivostní pás**) se nacházejí elektrony slabě k atomu vázané (Obr. 3.5.-1). Rozlišujeme proto elektrony **valenční** a **vodivostní**. Mezi oběma pásy se nachází zakázaný pás, k jehož překonání potřebují elektrony získat energii (Obr. 3.5.-2).



Obr. 3.5.-2 Srovnání energetických hladin elektronů v izolovaném atomu a v krystalické látce.

V kovech je valenční pás zcela zaplněn a ve vodivostním pásu se nachází určitý počet elektronů. Právě elektronům, nacházejícím se ve vodivostním pásu, lze dodat energii k přechodu na ještě vyšší energetické hladiny. Usměrněný pohyb těchto elektronů pak představuje elektrický proud.

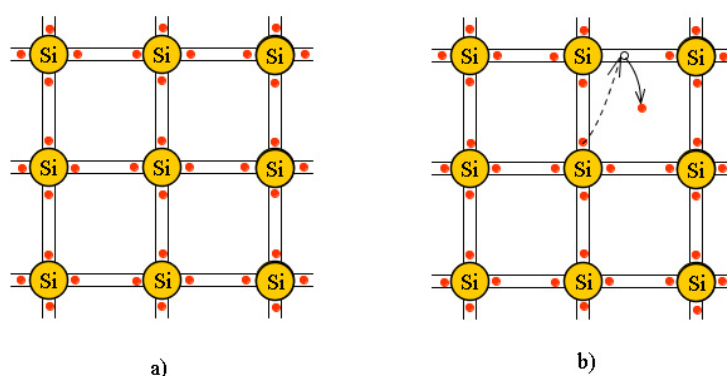
Polovodiče a nevodíče (dielektrika) neobsahují ve vodivostním pásu volné elektrony, mohou se do něj dostat z valenčního pásu pouze tehdy, přijmou-li dostatečné množství energie. Na Obr. 3.5.-3 je pro srovnání znázorněna pásová struktura vodiče, nevodíče a polovodiče. U polovodičů vyvolává vodivost osvětlení, zvýšená teplota, elektrické pole apod. Jestliže dodáme čistému polovodiči vhodnou příměs, je možné vytvořit v zakázaném pásu dostatečně úzké příměsové pásy, které usnadňují přechod elektronů do vodivostního pásu.



Obr. 3.5.-3 Srovnání pásové struktury a) vodiče, b) nevodíče, c) polovodiče.

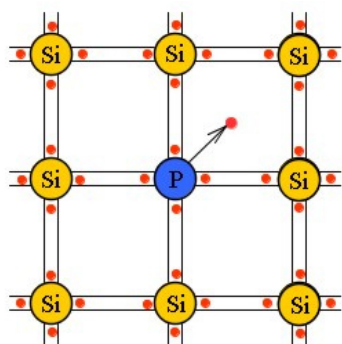
Mechanismus vzniku podmínek pro vedení proudu v polovodiči se popisuje obvykle na příkladu křemíku. Každý atom křemíku má čtyři valenční elektrony, které spoluvytvářejí vazbu s valenčními elektrony čtyř sousedních atomů. Pokud by se teplota křemíku (obecně polovodiče) pohybovala blízko absolutní nuly, choval by se krystal čistého křemíku jako

nevodič, neboť všechny elektrony by byly vázány k atomům (Obr. 3.5.-4a). Jestliže se teplota zvýší, poruší se vazby elektronů k atomům a ty se dostanou do vodivostního pásu. Místa, v nichž se elektrony před uvolněním nacházely, se nazývají **díry** a přiřazuje se jim "kladný elektrický náboj", neboť struktura atomu jako celek byla původně elektricky neutrální, kdežto po uvolnění elektronu je kladně nabitá. Jak elektrony, tak díry se mohou v látce pohybovat (Obr. 3.5.-4b). Neustále dochází ke vzniku a rekombinaci **páru volný elektron-díra**. Páry elektron-díra mohou být také vytvořeny bombardováním polovodiče vysokoenergetickými částicemi (např. protony, mezony π s energiemi v desítkách či stovkách MeV). Taková částice je schopna dostat na velmi krátkém úseku velké množství elektronů z vázaných stavů, což se projevuje elektrickým pulzem. Na tomto principu pracují polovodičové detektory částic, které se používají v experimentální jaderné fyzice.



Obr. 3.5.-4 a) Čistý křemík při velmi nízké teplotě. V látce nejsou volné elektrony a proto se chová jako nevodič. b) Znárodnění páru volný elektron-díra.

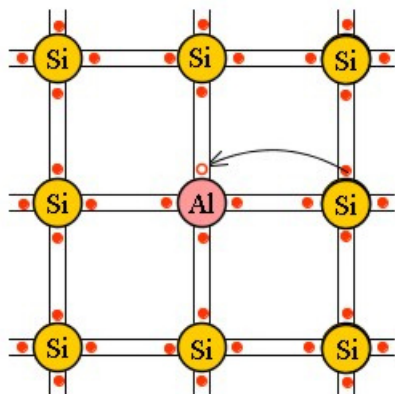
Pokud není k polovodiči připojen zdroj elektrického napětí, pohybují se elektrony a díry neuspořádaně. Po připojení zdroje se posouvají elektrony proti intenzitě vnějšího elektrického pole, díry ve směru opačném. Hustota děr a volných elektronů je v čistém křemíku stejná a roste s teplotou. Při pokojové teplotě dosahuje přibližně hodnotu $6,8 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$. Typ vodivosti, který jsme právě popsali, se nazývá **vlastní vodivost** polovodiče, a vyskytuje se u tzv **vlastních polovodičů**.



Zvýšení hustoty zprostředkovatelů proudu v polovodiči, elektronů a děr, se dosáhne také přítomností příměsí (příměs, tj. typ poruchy krystalové struktury). Projeví se pak **příměšová vodivost**. Pokud atomy příměsí mají větší počet valenčních elektronů než atomy křemíku, hovoříme o **vodivosti typu n** (**vodivost elektronová**, Obr. 3.5.-5). Příměs, která má přebytek valenčních elektronů oproti vlastnímu polovodiči, se nazývá **donor**. A proto v polovodiči s donorem jsou majoritními zprostředkovateli elektrického proudu elektrony. Čtyři valenční elektrony pětímocného atomu příměsí (např. fosfor v křemíku)

Obr. 3.5.-5

se účastní vazeb s atomy křemíku, pátý je vázán k vlastnímu atomu velmi slabě a i při poměrně nízkých teplotách pomáhá zvýšit vodivost v polovodiči. Jestliže atomy příměsí mají menší počet valenčních elektronů než atomy hostitelského polovodiče, projeví se **vodivost typu p**, pro kterou je typické, že hustota děr v látce je větší než hustota volných elektronů



(**vodivost děrová**, Obr. 3.5.-6). Příměs, která má méně valenčních elektronů, než vlastní polovodič, se nazývá **akceptor**.

Polovodič s děrovou vodivostí se nazývá **polovodič typu p** , polovodič s vodivostí elektronovou **polovodič typu n** .

Obr. 3.5.-6

Pětimocnými donory jsou například prvky P, As, Sb, čtyřmocnými akceptory prvky B, In, Ga, Al.

Obr. 3.5.-6



KO 3.5.-1 Seřadte látky typu nevodíče, vodiče a polovodiče podle velikosti měrného elektrického odporu.

KO 3.5.-2 S rostoucí teplotou měrná vodivost polovodičů rychle roste nebo klesá?

KO 3.5.-3 Rozhodněte o pravdivosti tvrzení: Ve vodivostním pásu jsou elektrony vázány k atomu silněji než v pásu valenčním.

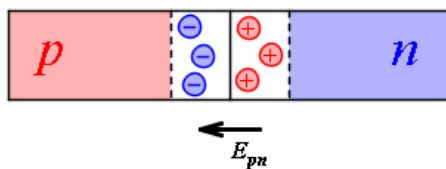
KO 3.5.-4 Jakými způsoby můžete významně zvýšit vodivost polovodiče?

KO 3.5.-5 Popište vlastní vodivost polovodiče. Vysvětlete, proč se díře přisuzuje kladný náboj.

KO 3.5.-6 Jak se od sebe liší polovodiče typu p a typu n ?

3.5.2. Přejchod p - n , dioda, tranzistor

Přejchod p - n je hraniční oblast mezi polovodiči typu p a typu n . Obvykle je jedna část monokrystalu obohacena donorem, druhá část akceptorem. Předpokládejme, že rozhraní mezi oběma typy polovodiče je rovinné a ostré. Bezprostředně po vzniku rozhraní (např. mechanickým spojením dvou typů polovodiče) jsou obě části celku elektricky neutrální, v polovodiči typu n převažují volné elektrony, zatímco v polovodiči typu p díry. Aby se vyrovnala koncentrace děr a volných elektronů v obou částech, difundují elektrony přes rozhraní z části typu n do části p a díry naopak. Pozorujeme **difúzní proud**, k jehož velikosti přispívá přechod jak elektronů, tak děr skrz rozhraní. Podle dohody je orientován od části p k části n . Tím se samozřejmě část typu n nabije kladně a část typu p záporně. V okolí přechodu difúze děr a elektronů vyvolá elektrické pole intenzity E_{pn} (Obr. 3.5.-7), které dosáhne takovou velikost, že zabrání dalšímu vyrovnávání koncentrace děr a volných elektronů v celém polovodiči a nastane rovnovážný stav. Mezi oběma částmi polovodiče vzniká **kontaktní napětí**.

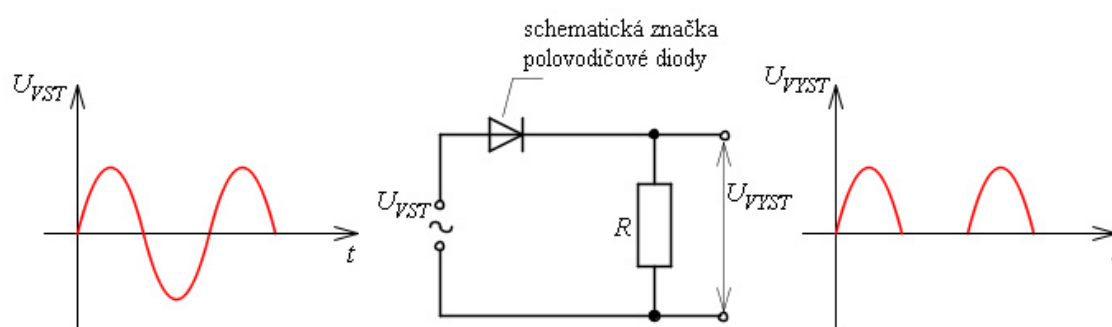


Obr. 3.5.-7 E_{pn} je intenzita elektrického pole, která vzniká jako důsledek difúze volných elektronů z polovodiče typu n do polovodiče typu p a děr v opačném směru.

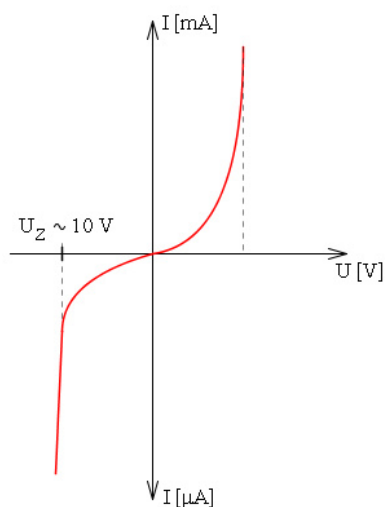
Jestliže přiložíme zdroj vnějšího elektromotorického napětí tak, že jeho kladný pól přivedeme k části p a záporný pól k části n , snížíme tak kontaktní napětí. Zvýší se proto hodnota difúzního proudu. Přechod je v obvodu zapojen v **propustném směru**.

Jestliže zaměníme polaritu zdroje (část p k zápornému pólu zdroje), budou díry vtahovány do části typu p a volné elektrony do části typu n . Přiložené elektromotorické napětí zvyšuje kontaktní napětí a difúzní proud klesne. Vnější zdroj je připojen v **závěrném směru**.

Elektrický odpor $p-n$ přechodu závisí na polaritě vnějšího zdroje napětí. Hovoříme o **diodovém jevu**. Využívá se v diodovém usměrňovači (**polovodičová dioda**) například k tomu, aby se střídavé napětí transformovalo na stejnosměrné (Obr. 3.5.-8). Základem diody bývá křemíková nebo germaniová destička, obohacená z jedné strany donorem, ze druhé akceptorem.



Obr. 3.5.-8 Diodový usměrňovač v zapojení pro převod střídavého napětí na stejnosměrné.

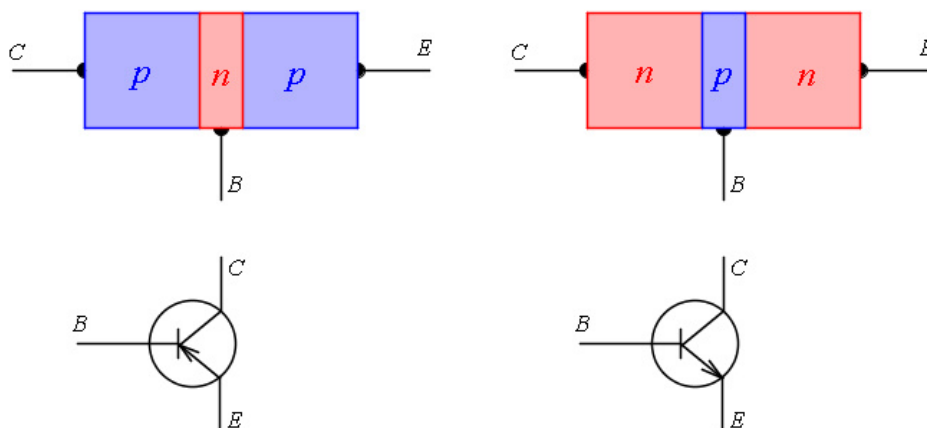


U diody pozorujeme **Zenerův jev**. Jestliže přiložené napětí dosáhne určité kritické hodnoty U_Z (Zenerovo napětí), začne proud tekoucí diodou prudce růst, přičemž napětí zůstává téměř konstantní. Obr. 3.5.-9 prezentuje voltampérovou charakteristiku polovodičové diody. Každá dioda má vlastní voltampérovou charakteristiku a svou hodnotu Zenerova napětí.

Používají se též diody se speciálním druhem chování $p-n$ přechodu. Například vodivost fotodiody je velmi citlivá na osvětlení. Existují $p-n$ přechody, které emitují světlo (**LED dioda**). V komerčních diodách se používá většinou galium obohacené arsenem a fosforem. Polovodič v LED diodě je silně dotován. Jestliže uživatel zmáčkne tlačítko na ovladači televizoru, vyšle LED dioda sled světelných impulzů v

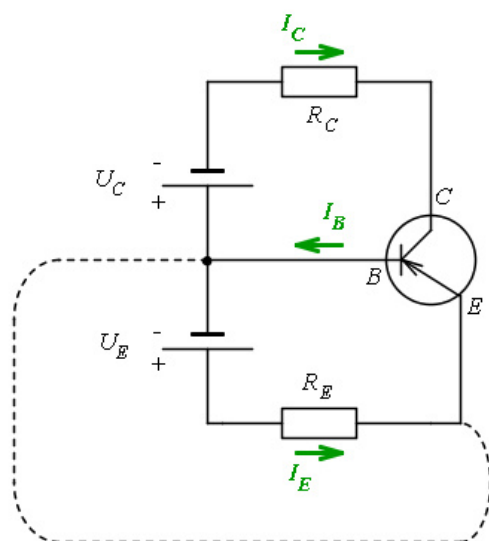
Obr. 3.5.-9

infračervené oblasti světla, které kódují informaci. Fotodiody v televizoru signál zachytí a přemění na proudové pulzy. Přechod $p-n$ najdete také v **laserových diodách**, které vydávají vysoce koherentní světlo s vlnovou délkou v mnohem menším intervalu hodnot, než je tomu u LED diod. Používají se v přehrávačích kompaktních disků, v komunikačních systémech s optickými vlákny, ve čtečkách čárových kódů, ve stomatologii apod.



Obr. 3.5.-10 Řazení vrstev polovodičů a schématické značky tranzistorů typu PNP a NPN.

Rozšířené jsou součástky, které mají více p - n přechodů. Historickým milníkem v rozvoji moderní elektroniky byl objev **tranzistorového jevu** v Bellových laboratořích (prosinec roku 1947, Nobelova cena v roce 1956 objevitelům – Schockley, Bardeen, Brattain), který se využívá v součástce zvané **tranzistor**. Sestává se z polovodičového krystalu, jehož dvě krajní části mají vodivost jednoho typu, část prostřední druhého typu. Mezi jednotlivými částmi jsou p - n přechody. Podle uspořádání dvou typů polovodičů rozlišujeme dva typy tranzistoru – NPN a PNP (Obr. 3.5.-10). První má uprostřed polovodič typu p , druhý typu n . Elektroda, která je připojena ke střední části, se nazývá **báze**, ostatní dvě jsou **emitor** a **kolektor**. V

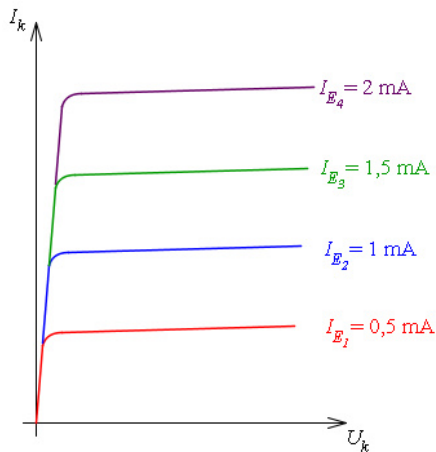


Obr. 3.5.-11

elektronických obvodech může být tranzistor zapojen třemi základními způsoby. Podle elektrody, která je společná pro vstupní i výstupní signál, se rozlišuje zapojení se **společným emitorem**, **společnou bází** a **společným kolektorem**. Na Obr. 3.5.-11 vidíte zapojení se společnou bází. Přechod mezi bází a emitorem je připojen v propustném směru, zatímco druhý přechod mezi kolektorem a bází ve směru zavěrném. Báze je velmi tenká, i méně než 10^{-3} cm. Když krátkým spojením, které je na obrázku naznačeno čárkovanou čarou, vyřadíme zdroj elektromotorického napětí U_E , obvodem kolektoru nepoteče téměř žádný proud. Jestliže rozpojíme krátké spojení mezi bází a emitorem, začne emitorovým obvodem procházet proud. Poněvadž

je báze velmi tenká, difundují díry ve velké míře až do kolektoru (z anglického collect – sbírat). K čistému bázovému proudu I_B přispívá jen malý zlomek počtu děr. Jistě platí : $I_E = I_C + I_B$. Jestliže zakreslíme závislost kolektorového proudu na kolektorovém napětí pro vybrané hodnoty emitorového proudu, dostaneme **kolektorové charakteristiky tranzistoru** (Obr. 3.5.-12). Kolektorový proud je při dané hodnotě kolektorového napětí funkcí proudu emitorového. Tranzistor umožňuje malým emitorovým výkonem regulovat značné výkony v kolektorovém obvodu. Využívá se tedy jako zesilovací prvek.

Existuje několik konstrukčních řešení tranzistorů. Například tranzistory řízené polem se strukturou kov-oxid-polovodič (**MOSFET**) nacházejí uplatnění mimo jiné v digitálních



Obr. 3.5.-12

logických obvodech, kde se užívají pouze ve dvou stavech – mezi emitorem a kolektorem prochází proud přes bázi (tzv. hradlo) nebo neprochází – čemuž v binární aritmetice odpovídají stavy 1 a 0. Přepínání mezi těmito stavy může probíhat s velmi vysokou frekvencí. Vyrábějí se tranzistory typu MOSFET velmi malých rozměrů – kolem 500 nm. Například procesor Intel Pentium 4 obsahuje více než 40 miliónů tranzistorů.



KO 3.5.-7 Co je *p-n* přechod?

KO 3.5.-8 Vysvětlete fyzikální význam veličiny difúzní proud.

KO 3.5.-9 Co vyvolává v okolí *p-n* přechodu difúze elektronů a děr?

KO 3.5.-10 Difúzní proud skrz *p-n* přechod způsobí, že se polovodič typu *p* nabije kladně nebo záporně? Předpokládejme, že pozorujeme *p-n* přechod, který není připojen ke zdroji elektromotorického napětí.

KO 3.5.-11 *P-n* přechod zapojíme v propustném směru, jestliže pól zdroje přivedeme k polovodiči typu *p*.

KO 3.5.-12 *P-n* přechod zapojíme v závěrném směru, jestliže pól zdroje přivedeme k polovodiči typu *p*.

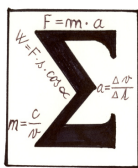
KO 3.5.-13 V čem spočívá podstata diodového jevu?

KO 3.5.-14 Jaké mají praktické využití LED diody?

KO 3.5.-15 Popište tranzistor typu NPN a PNP. Nakreslete jejich schematické značky.

KO 3.5.-16 Nakreslete typické kolektorové charakteristiky tranzistoru zapojeného se společnou bází.

KO 3.5.-17 Jaké mají praktické využití tranzistory?



Existuje jev **supravodivost**, kdy při velmi nízkých teplotách (pod kritickou hodnotou) přecházejí některé látky do supravodivého stavu s téměř nulovým elektrickým odporem.

Podle hodnoty měrné elektrické vodivosti dělíme orientačně látky na tři typy:

vodiče ($\gamma > 10^6 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$), **nevodiče** ($\gamma < 10^{-8} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$) a **polovodiče**. Polovodiče se vyznačují mnohem větší teplotní závislostí měrné vodivosti než je tomu u vodičů. V látkách rozlišujeme **elektronovou vodivost** – nositeli proudu jsou elektrony, a **vodivost iontovou** – nositeli proudu jsou ionty. Elektronová vodivost je typická pro kovové vodiče a polovodiče.

V krystalu konečného rozměru se vyskytuje mezi **zakázanými energetickými pásy** velké množství těsně přiléhajících energetických hladin, což plyne z řešení kvantové úlohy o pohybu elektronů v krystalové struktuře pevné látky. Podle Pauliho vylučovacího principu se může na každé hladině vyskytovat jen omezený počet elektronů. Elektrony v pásu s nižší energií (**valenční pás**) jsou k atomu pevně vázány, v periferním pásu s vyšší energií (**vodivostní pás**) se nacházejí elektrony slabě k atomu vázané (Obr. 3.5.-1). Rozlišujeme proto elektrony **valenční** a **vodivostní**. Mezi oběma pásy se nachází zakázaný pás, k jehož překonání potřebují elektrony získat energii (Obr. 3.5.-2).

V kovech je valenční pás zcela zaplněn a ve vodivostním pásu se nachází určitý počet elektronů. Právě elektronům, nacházejícím se ve vodivostním pásu, lze dodat energii k přechodu na ještě vyšší energetické hladiny. Usměrněný pohyb těchto elektronů pak představuje elektrický proud.

Polovodiče a nevodiče (dielektrika) neobsahují ve vodivostním pásu volné elektrony, mohou se do něj dostat z valenčního pásu pouze tehdy, přijmou-li dostatečné množství energie. U polovodičů vyvolává vodivost osvětlení, zvýšená teplota, elektrické pole apod. Jestliže dodáme čistému polovodiči vhodnou příměs, je možné vytvořit v zakázaném pásu dostatečně úzké příměsové pásy, které usnadňují přechod elektronů do vodivostního pásu. Pokud by se teplota křemíku (obecně polovodiče) pohybovala blízko absolutní nuly, choval by se krystal čistého křemíku jako nevodič, neboť všechny elektrony by byly vázány k atomům (Obr. 3.5.-4a). Jestliže se teplota zvýší, poruší se vazby elektronů k atomům a ty se dostanou do vodivostního pásu. Místa, v nichž se elektrony před uvolněním nacházely, se nazývají **díry** a přiřazuje se jim "kladný elektrický náboj". Jak elektrony, tak díry se mohou v látce pohybovat (Obr. 3.5.-4b). Neustále dochází ke vzniku a rekombinaci **páru volný elektron-díra**.

Pokud není k polovodiči připojen zdroj elektrického napětí, pohybují se elektrony a díry neuspořádaně. Po připojení zdroje se posouvají elektrony proti intenzitě vnějšího elektrického pole, díry ve směru opačném. Hustota děr a volných elektronů je v čistém křemíku stejná a roste s teplotou. Typ vodivosti, který jsme právě popsali, se nazývá **vlastní vodivost** polovodiče, a vyskytuje se u tzv **vlastních polovodičů**.

Zvýšení hustoty zprostředkovatelů proudu v polovodiči, elektronů a děr, se dosáhne také přítomností příměsí (příměs, tj. typ poruchy krystalové struktury). Projeví se pak **příměsová vodivost**. Pokud atomy příměsí mají větší počet valenčních elektronů než atomy křemíku, hovoříme o **vodivosti typu n** (**vodivost elektronová**, Obr. 3.5.-5). Příměs, která má přebytek valenčních elektronů oproti vlastnímu polovodiči, se nazývá **donor**. Jestliže atomy příměsí mají menší počet valenčních elektronů než atomy hostitelského polovodiče, projeví se **vodivost typu p** , pro kterou je typické, že hustota děr v látce je větší než hustota volných elektronů (**vodivost děrová**, Obr. 3.5.-6). Příměs, která má méně valenčních elektronů, než vlastní polovodič, se nazývá **akceptor**.

Polovodič s děrovou vodivostí se nazývá **polovodič typu p** , polovodič s vodivostí elektronovou **polovodič typu n** . Pětímocnými donory jsou například prvky P, As, Sb, čtyřmocnými akceptory prvky B, In, Ga, Al.

Přechod $p-n$ je hraniční oblast mezi polovodiči typu p a typu n . Aby se vyrovnala koncentrace děr a volných elektronů v obou částech, difundují elektrony přes rozhraní z části typu n do části p a díry naopak. Pozorujeme **difúzní proud**, k jehož velikosti přispívá přechod jak elektronů, tak děr skrz rozhraní. Podle dohody je orientován od části p k části n . V okolí přechodu difúze děr a elektronů vyvolá elektrické pole intenzity E_{pn} (Obr. 3.5.-7), které dosáhne takovou velikost, že zabrání dalšímu vyrovnávání koncentrace děr a volných elektronů v celém polovodiči a nastane rovnovážný stav. Mezi oběma částmi polovodiče vzniká **kontaktní napětí**.

Jestliže přiložíme zdroj vnějšího elektromotorického napětí tak, že jeho kladný pól přivedeme k části p a záporný pól k části n , snížíme tak kontaktní napětí. Zvýší se proto hodnota difúzního proudu. Přechod je v obvodu zapojen v **propustném směru**.

Jestliže zaměníme polaritu zdroje (část p k zápornému pólu zdroje), budou díry vtahovány do části typu p a volné elektrony do části typu n . Přiložené elektromotorické napětí zvyšuje kontaktní napětí a difúzní proud klesne. Vnější zdroj je připojen v **závěrném směru**.

Elektrický odpor p - n přechodu závisí na polaritě vnějšího zdroje napětí. Hovoříme o **diodovém jevu**. Využívá se v diodovém usměrňovači (**polovodičová dioda**) například k tomu, aby se střídavé napětí transformovalo na stejnosměrné (Obr. 3.5.-8).

Existují p - n přechody, které emitují světlo (**LED dioda**). Přechod p - n najdete také v **laserových diodách**, které vydávají vysoce koherentní světlo s vlnovou délkou v mnohem menším intervalu hodnot, než je tomu u LED diod.

Tranzistor je z polovodičového krystalu, jehož dvě krajní části mají vodivost jednoho typu, část prostřední druhého typu. Mezi jednotlivými částmi jsou p - n přechody. Podle uspořádání dvou typů polovodičů rozlišujeme dva typy tranzistoru – NPN a PNP (Obr. 3.5.-10). Elektroda, která je připojena ke střední části, se nazývá **báze**, ostatní dvě jsou **emitor** a **kolektor**. Tranzistor se využívá jako zesilovací prvek.

Klíč

KO 3.5.-1 pořadí ve směru růstu měrného elektrického odporu: vodič, polovodič, nevodič

KO 3.5.-2 rychle roste

KO 3.5.-3 nepravda

KO 3.5.-7 hraniční oblast mezi polovodiči typu p a n

KO 3.5.-8 Je podílem celkového náboje (součet kladného náboje děr a velikosti záporného náboje elektronů) prošlého za určitou dobu přechodem a této doby.

KO 3.5.-10 záporně

KO 3.5.-11 kladný

KO 3.5.-12 záporný