

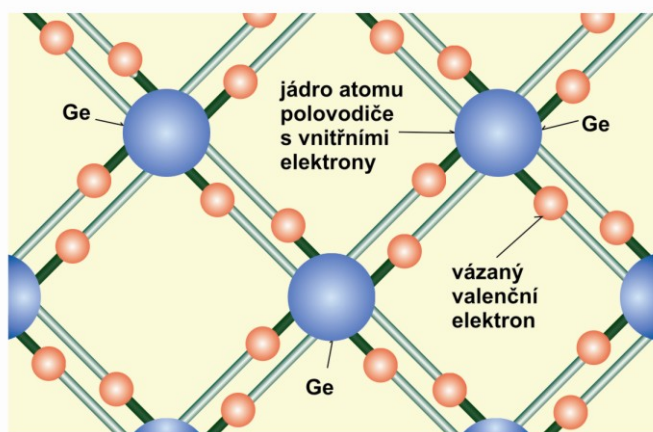
3. Polovodiče.

Teorii vedení elektřiny v polovodičích lze podat v zásadě dvěma způsoby. První vychází z klasických představ vedení elektrického proudu jako záporně a kladně nabitých bodových nábojů (elektronů a děr). Tento způsob je jistě velmi názorný, vhodný k vysvětlení této látky na základní a střední škole, není však úplný. Druhý způsob vychází ze závěrů kvantové teorie pevných látek (konkrétně z pásové teorie pevných látek). Tímto druhým způsobem je vysvětlena teorie vedení elektrického proudu v polovodičích v knize autorů Halliday, D, Resnick, R, Walker, J „Fyzika“ až po objasnění základů kvantové fyziky. Protože studenti Pedagogické fakulty, kombinací s fyzikou, jsou vychováváni jako budoucí učitelé fyziky na základní škole a nižších stupních gymnázia, je podle našeho názoru velmi vhodné, aby na slušné úrovni zvládli oba způsoby výkladu elektrických vlastností polovodičů. Proto jsme považovali za vhodné zařadit do výuky i „klasický“ výklad vedení elektřiny v polovodičích.

3.1. Vlastní polovodič.

Vytvoříme – li jednoduchý obvod, složený z baterie, měděných přívodů a žárovky, bude žárovka svítit, což je známkou toho, že vodičem protéká elektrický proud. Nahradíme – li část vodiče tyčinkou z křemíku, proud poteče až tehdy, ohřejeme – li ji např. plamenem plynového hořáku. Křemík patří k tomu druhu materiálu, který se co do své elektrické vodivosti nachází mezi vodiči a izolátory, tj. k *polovodičům* (kdybychom křemíkovou tyčinku nahradili tyčinkou keramickou, proud by neprotékal ani při vysoké teplotě).

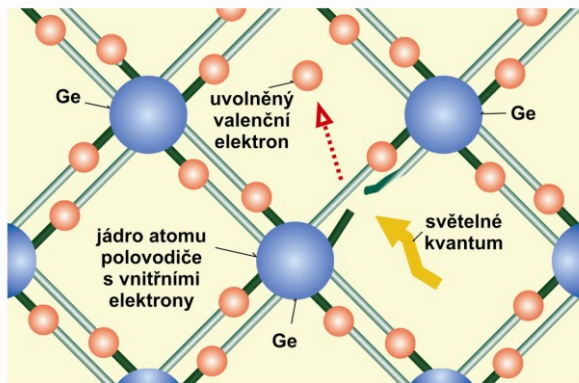
Rozdíl mezi vodiči, polovodiči a izolátory lze vyjádřit i kvantitativně: řádová hodnota vodivosti kovů je cca $10^{-8} - 10^{-6} \Omega \cdot m$, polovodičů cca $10^{-3} \Omega \cdot m$ a izolátorů $10^{12} - 10^{15} \Omega \cdot m$. V polovodičích a izolátorech se na rozdíl od kovů nemohou pohybovat valenční elektrony volně – jsou vázané tzv. kovalentní vazbou. Například u čtyřvázného křemíku je každý z valenčních elektronů jednoho atomu vázán touto vazbou s obdobným elektronem atomu sousedního (Obr.3.1.). Základními vlastnostmi kovalentní vazby je její směrovost, nasycenost a sdílení elektronů. Její podstata nemůže být dokonale objasněna na základě klasické fyziky a bude probrána podrobněji v posledním dílu učebnice, zabývající se kvantovou fyzikou.



Obr.3.1. Vlastní polovodič.

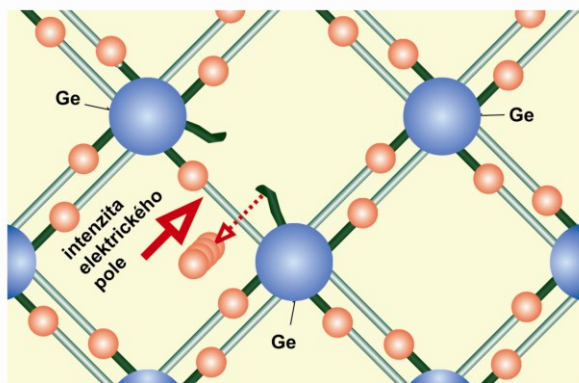
Podle nastíněného obrázku krystalu polovodiče, vázaného kovalentní vazbou, by v něm neměla existovat možnost vedení elektrického proudu. Z praxe však víme, že

polovodiče elektrický proud vedou. Vysvětlujeme si to tak, že dojde k uvolnění původně vázaného elektronu do oblasti mezi atomy. Může se tak stát např. působením světelného kvanta, (Obr.3.2.), nebo vlivem teploty. Takto uvolněný elektron se pohybuje polovodičem podobně, jako tomu bylo u vodičů, tj. proti směru intenzity elektrického pole – tzv. elektronová vodivost (Obr.3.3). Jiný způsob vodivosti spočívá v tom, že na místo, které zůstalo po uvolnění elektronu (které je nyní kladné) se dostane elektron, odtržený např. od sousedního, nebo jiného blízkého atomu. Tento děj může pokračovat dále a pro jednoduchost si můžeme představit, že se „pohybuje“ ono kladné místo („díra“) a to ve směru intenzity elektrického pole. Takovou vodivost nazýváme *děrovou*.



Obr.3.2. Mechanismus uvolnění elektronu světelným kvantem.

Elektronová nebo děrová vodivost čistých polovodičů je označována jako *vlastní vodivost* a zmíněné polovodiče jsou tzv. *vlastní polovodiče*. V tomto případě hovoříme o vzniku páru elektron – díra. Poněvadž podle II. termodynamické věty nelze vyrobit monokrystal bez cizích příměsí a vakancí (bodových poruch), je možný i vznik nosičů nábojů díky těmto nečistotám (minoritní nosiče nábojů).



Obr.3.3. Elektronová vodivost v polovodičích

Vlastní vodivost polovodičů není příliš využívána v praxi. Protože vlastní vodivost roste dosti značně s rostoucí teplotou, jsou vlastní polovodiče využívány jako čidla teploměrů, zejména v oblasti nízkých teplot. Z hlediska fyzikálně – chemického se prvky, které mají polovodivé vlastnosti, nacházejí ve zcela určité části Mendělejevovy periodické tabulky prvků (Tab.1). Zde jsou uvedeny tzv. elementární polovodiče, vykazující vlastní vodivost.

V polovodičích dochází i k ději opačnému k uvolňování elektronů z kovalentních vazeb a to k ději zvanému *rekombinace* (elektron + díra → neutrální atom). Celkový obraz vedení proudu v polovodičích je tedy takový, že v každém okamžiku sice existuje určitý počet volných elektronů a děr, ale volné elektrony se stále obměňují – nové vznikají a jiné rekombinují s dírami. Výsledkem je stav, zvaný *dynamická rovnováha*. Jako dobu života označujeme průměrnou dobu mezi vznikem páru elektron – díra a rekombinací na neutrální atom. Tato doba může být různá a může být vhodně regulována. V polovodičových součástkách bývá v rozmezí 10 μs – 0,1 μs .

G P	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
II	Be	B	C	N	O	F	
III		Al	Si	P	S	Cl	
IV		Ca	Ge	As	Se	Br	
V		In	Sn	Sb	Te	J	
VI			Pb	Bi	Po	At	

Tab.1. Elementární polovodiče v Mendělejevově tabulce prvků

3.2. Příměsové polovodiče.

Pomocí základních termodynamických principů lze, jak již bylo řečeno, dokázat, že nelze vyrobit krystal, ve kterém by nebyly přítomny žádné bodové poruchy (vakance, atomy nečistot). Pokud je cizí atom nežádoucí, hovoříme o nečistotě, pokud je přidán záměrně, hovoříme o příměsi.

Vodivost typu N, donory. Vpravíme – li do krystalu polovodiče, složeného ze čtyřvazných atomů, pětivazné atomy (např. fosforu, velmi často pomocí difúze), naváží se tyto atomy kovalentní vazbou na své sousedy (Si, Ge, apod.). Pátý valenční elektron však bude slabě vázaný, snadno se uvolní a stane se z něho vodivostní elektron. Taková vodivost se nazývá vodivostí typu N (negativní) a příměsí, dodávající vodivostní elektrony do polovodiče, se nazývají donory (z latinského donor = dárce) (Obr.3.4.)

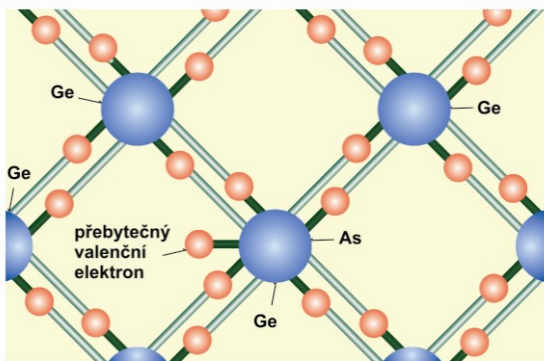
Vodivost typu P, akceptory. Zavedeme - li do monokrystalu čistého křemíku nebo germania trojvazný prvek (např. kadmium), způsobí tento prvek tzv. *děrovou vodivost* (Obr

3.5.) a pohybující se částice budou kladné díry, pohybující se ve směru elektrického pole (fyzicky to však budou opět elektrony, jak jsme již dříve vysvětlili).

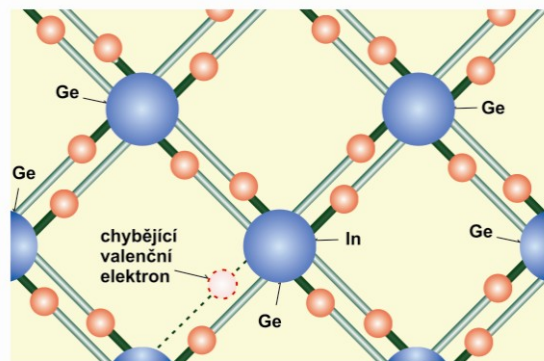
Hlubší zamyšlení nám objasní jeden z podstatných rozdílů mezi vodivostí vodičů a polovodičů: vodivost čistých vodičů je vysoká a malé procento příměsí ji nijak nezmění. Vodivost čistých polovodičů je velmi malá a již velmi malé procento příměsí ji značně zvýší.

Jako *silně dotovaný* označujeme takový krystal, ve kterém na každých $10^2 - 10^4$ atomů základního prvku připadá jeden atom příměsí. Ve *slabě dotovaných* krystalech připadá jeden dotující atom na $10^6 - 10^9$ atomů základní matrice.

Difúzní a vodivostní proud v polovodičích. Podobně jako v případě vodičů, pohybují se i v polovodičích nosiče proudu vlivem působení elektrického pole (což jsme již diskutovali). Druhou příčinou pohybu nosičů nábojů v polovodičích může být jev, zvaný difúze. Difúze je podmíněna teplotou systému (roste s teplotou, neboť nosiče nábojů jsou více „postrkovány“ kmity mřížce) a koncentračním spádem nosičů nábojů (proudí z míst s vyšší koncentrací do míst s koncentrací nižší). Takový proud se nazývá *proudem difúzním*.



Obr.3.4. Polovodič typu N.



Obr.3.5. Polovodič typu P

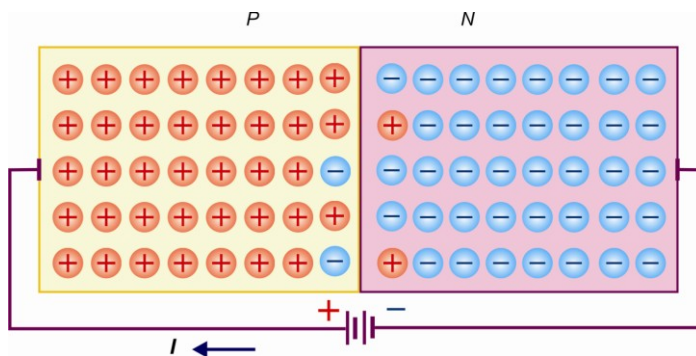
3.3. Přechod PN, dioda.

Dotujeme – li část krystalu čistého polovodiče (Si,Ge) atomy pětivazného prvku (P,As,Sb), získáme polovodič typu N. Dotujeme – li zbylou část krystalu atomy trojvazného prvku (B,Al,Ga,In), dostaneme polovodič typu P. Část krystalu, rozdělující obě oblasti s různým typem vodivosti, nazýváme *PN přechod*. Mějme nyní krystal polovodiče, v jehož levé části jsme vytvořili pomocí nějakého technologického postupu (budou diskutovány později) vodivost typu P a v pravé části vodivost typu N. Na Obr.3.6. je taková situace schematicky zobrazena. V levé části krystalu jsou nosiči nábojů díry (+ v kroužku) a ionty akceptorů jsou tedy nabitě záporně. Naopak v pravé části donory odevzdaly do krystalu elektrony a staly se z nich tedy kladně nabitě ionty (barva je v obou oblastech různá, abychom tím vyjádřili rozdílné znaménko iontů akceptorů a donorů).

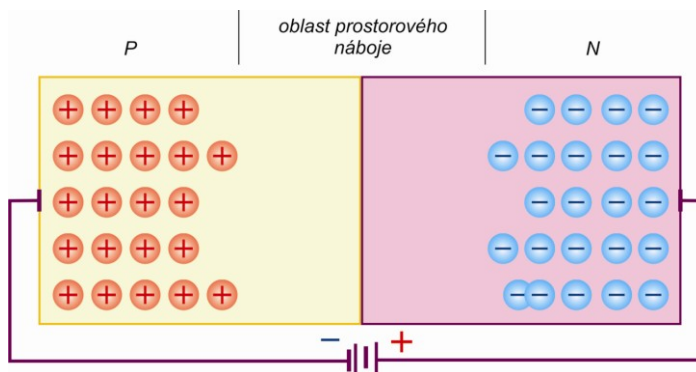
Volné díry i volné elektrony konají v krystalu chaotický pohyb, rekombinují, vznikají nové, atd. Protože v levé části krystalu je nadbytek děr, budou tyto *difundovat* do pravé části a naopak elektrony z pravé části budou difundovat do části levé (Obr.3.7.). Je třeba zdůraznit, že to *není* elektrická síla, která řídí přerozdělování nosičů nábojů, ale že je to difúze. Že tedy díry a elektrony se navzájem nepřitahují, jak by se na první pohled mohlo zdát – vždyť celý krystal je navenek neutrální (to bývá nejčastější chyba při interpretaci PN přechodu).

pro Ge cca 0,4 V), začne proud prudce vzrůstat. Takové zapojení vnější baterie nazýváme *zapojením v propustném směru* (Obr.3.9.).

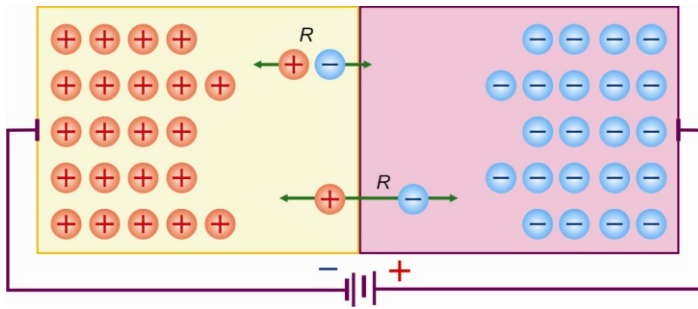
Změníme – li polaritu vnější baterie na opačnou, získáme tzv. *zapojení v závěrném směru* (Obr.3.10.). V tomto případě kladný pól baterie přitahuje elektrony z oblasti N a záporný pól díry z oblasti P, takže dojde k rozšíření oblasti prostorového náboje a přechodem PN nebude procházet *téměř žádný* proud. Záměrně jsme zdůraznili slovo *téměř*, neboť ve skutečnosti jistý velmi malý proud PN přechodem prochází a je třeba se zmínit o jeho podstatě, neboť byť by byl velmi malý, je důležitý. Vznik tohoto proudu lze vysvětlit následovně: již dříve jsme uvedli, že v celém prostoru krystalu existují rekombinační centra (atomy nečistot, vlastní vodivost polovodičů), která jsou zdrojem vzniku párů elektron – díra. Tato rekombinační centra dodávají do obvodu tzv. minoritní nosiče nábojů, které tak tvoří tzv. *závěrný proud* (Obr.3.11.). Pokud bychom zvyšovali napětí vnější baterie, může dojít ke vzniku lavin, vyvolaných minoritním nosiči proudu. Ty dosahují při vyšším napětí v závěrném směru tak vysoké rychlosti (a energie), že jsou schopné ionizovat nárazem neutrální atomy polovodiče. Tím vzroste počet nosičů nábojů, které se opět urychlí, a proud v závěrném směru roste velmi prudce. Tak velký proud způsobí průraz PN přechodu a zničí celý polovodičový prvek. Měření ukazují, že tzv. *kritická hodnota intenzity elektrického pole*, při níž dojde k průrazu, je 25 kV/mm. Odtud plyne, že pro reálné PN přechody, vyrobené v krystalech Si, nebo Ge, může být reálná hodnota závěrného napětí řádu několika desítek voltů.



Obr.3.9. PN přechod, zapojený v propustném směru



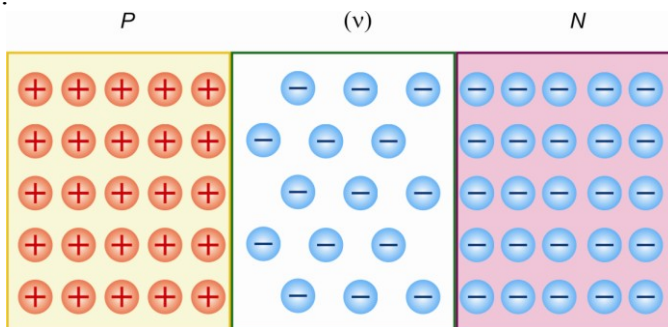
Obr.3.10. PN přechod, zapojený v závěrném směru.



Obr.3.11. K vysvětlení závěrného proudu v polovodičích.

Poznámka. Zajímavým problémem je otázka, které faktory ovlivňují šířku oblasti prostorového náboje. V první řadě to bude jistě teplota, neboť teplota ovlivňuje difúzi, která je zodpovědná za vznik oblasti prostorového náboje. Podobně musí být druhým faktorem, určujícím šířku oblasti prostorového náboje koncentrace příměsí, která též silně ovlivňuje difúzi. Z jednoduchých úvah tedy plyne, že šířka oblasti prostorového náboje roste s teplotou a klesá s růstem koncentrace příměsí (k dosažení difúzního napětí stačí příměsí z užší oblasti poblíž přechodu PN).

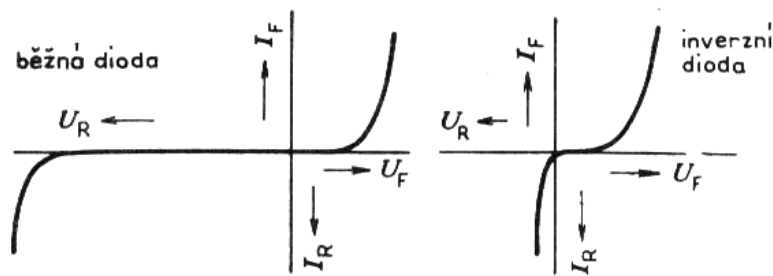
Diody P π N a P ν N. Z dosavadních úvah plyne, že nelze dosti dobře dosáhnout vysokého závěrného napětí (k tomu je potřebná velmi nízká koncentrace příměsí) a velkého proudu v propustném směru (k tomu je potřebná vysoká koncentrace příměsí). Aby odstranili tento nesoulad, navrhli Hall a Dunlop diodu nového typu, tzv. diodu P π N (nebo P ν N). Taková dioda se skládá ze tří částí s různou vodivostí: silně dotované oblasti typu P, slabě dotované oblasti v (donory) a nakonec opět silně dotované oblasti typu N (Obr.3.12.). Pokud takovou diodu zapojíme v propustném směru, nemění oblast v nijak velikost proudu v propustném směru, neboť elektrony z oblastí N a v (díry z P) ji snadno překonají. Naopak při zapojení v závěrném směru slabě dotovaná střední oblast v způsobí značné rozšíření oblasti prostorového náboje, takže kritické intenzity elektrického pole (průrazného napětí) se dosahuje až při vysokých hodnotách závěrného napětí (cca 4000 V). Z právě uvedených důvodů se v současné době prakticky všechny polovodičové diody vyrábějí jako diody P π N, či P ν N.



Obr.3.12. Dunlopova dioda.

3.4. Voltampérová charakteristika diody, speciální diody.

Z informací, týkajících se funkce PN přechodu a tedy i diod jako elektronických prvků, můžeme učinit kvalitativní závěr o tvaru tzv. voltampérové charakteristiky diody, což je závislost proudu, procházejícího diodou na napětí na ní. Typický tvar takové charakteristiky je uveden na Obr.3.13. Je třeba poznamenat, že hodnoty, charakterizující kvalitativně křivku na tomto obrázku se mohou značně lišit pro různé konkrétní diody.

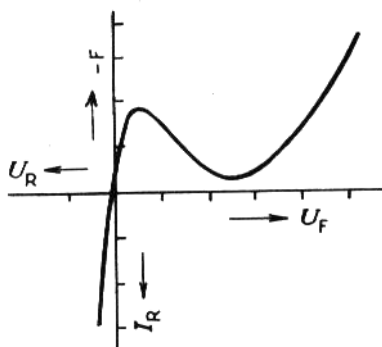


Obr.3.13. Voltampérová charakteristika běžné a inverzní diody.

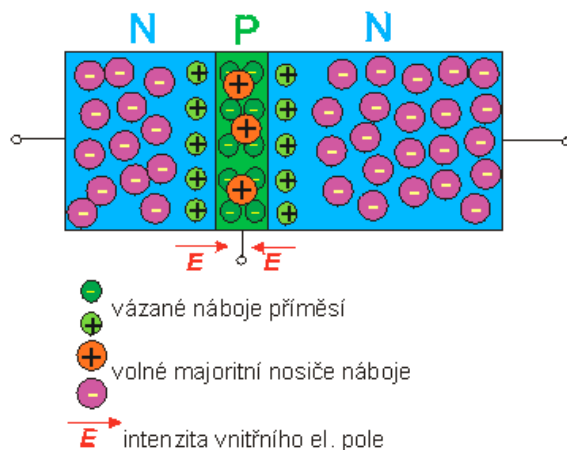
Zenerova dioda. V případě silně dotovaného přechodu PN, bude oblast prostorového náboje velmi úzká. V závěrném směru potom nedojde k průrazu, neboť nebude dosti prostoru pro vznik laviny. V praxi využíváme závěrné části voltampérové charakteristiky jako stabilizátoru napětí.

Inverzní dioda. Při ještě vyšším stupni dotace bude oblast prostorového náboje ještě užší, než u Zenerovy diody a průrazné napětí v závěrném směru bude nižší, než difúzní napětí ve směru propustném (Obr.3.13.). Inverzní diody se používají k usměrňování velmi nízkých střídavých napětí (dioda usměrňuje v závěrném směru – proto přívlastek *inverzní*).

Tunelová dioda. Ještě vyšší dotace příměsími než tomu bylo v případě inverzní diody, je ovlivněna i voltampérová charakteristika v propustném směru a to tak, že na ní vznikne oblast se záporným odporem (Obr.3.14.). Mechanismus vedení proudu v této diodě lze objasnit pouze na základě poznatků z kvantové mechaniky pomocí tzv. tunelového jevu. Tunelové diody se používají při konstrukci vysokofrekvenčních generátorů jako zdroje elektromagnetických kmitů (jako oscilátory).



Obr. 3.14. Voltampérová charakteristika tunelové diody.



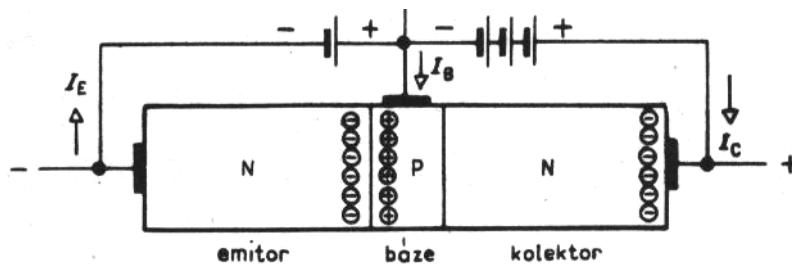
Obr.3.15. Princip činnosti tranzistoru [6].

3.5. Tranzistor.

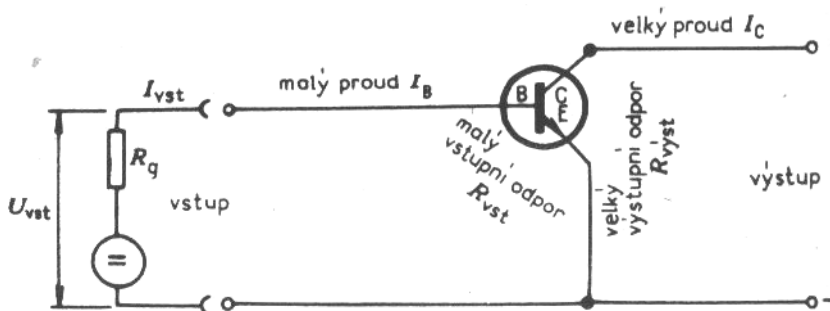
V historickém kontextu lze polovodičové diody chápat jako mnohem úspornější a mnohem menší (co do objemu) náhrady diod vakuových. Vědci se analogicky snažili najít polovodičovou náhradu za vakuovou triodu, tj. elektronku se třemi elektrodami, která tím, že se stala základem zesilovačů a oscilátorů, předznamenala bouřlivý rozvoj radiotechniky v polovině minulého století.

Byli to američtí vědci, Bardeen, Brattain a Shockley, kteří tuto úlohu úspěšně vyřešili tím, že sestrojili *tranzistor* (a byli za tento vynález oceněni Nobelovou cenou). Tranzistor se skládá ze tří oblastí typu NPN, nebo PNP. Elektrické vývody těchto oblastí značíme jako báze, emitor a kolektor (Obr.3.16.). Tranzistor si můžeme představit jako dvě diody, zapojené proti sobě. V případě tranzistoru NPN, zapojeného v zapojení se společnou bází, je první dioda NP (emitor – báze) zapojena v propustném směru a druhá dioda PN (báze – kolektor) je připojena na baterii s mnohem vyšším napětím ve směru závěrném. Elektrony z emitoru přicházejí do oblasti báze, která je konstruována jako úzká oblast mezi emitorem a kolektorem a proto jenom velmi malá část elektronů vytvoří tzv. proud báze I_b a převážná část jich přejde do oblasti kolektoru, kam je vtažena mnohem vyšším kolektorovým napětím a vytvoří tzv. kolektorový proud I_k . V zapojení se společnou bází (Obr.3.16.) je proudový zesilovací činitel α poněkud menší, než 1, ovšem napěťové a výkonové zesílení je

vždy větší než 1. Snadno si můžeme podobnými úvahami odvodit, že při zapojení tranzistoru se společným emitorem, nebo se společným kolektorem je i proudový zesilovací činitel větší jak 1. Dokazuje to zapojení se společným emitorem na Obr 3.17.: malý proud báze řídí velký kolektorový proud.



Obr.3.16. Zapojení transistoru se společnou bází



Obr.3.17. Zapojení tranzistoru se společným emitorem.

Literatura:

- [1] *Dioda, transistor a tyristor názorně*. Programovaný kurs. SNTL Praha 1983
- [2] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.: *Fyzika*. VUTIUM Brno, PROMETHEUS Praha, 2000.
- [3] Putilov, K.A.: *Kurs fyziki II*, Fizmatgiz 1959
- [4] Horák, Z., Krupka, F., Šindelář, V.: *Technická fyzika*, SNTL Praha 1960
- [5] Fuka, J, Havelka, B.: *Elektrina a magnetismus*. SPN Praha 1965
- [6] Encyklopedie Wikipedia.