

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta – Katedra fyziky

Vícevrstevné polovodičové prvky

Bakalářská práce

Anotace

Práce se zabývá polovodičovým tématem s obsahem čtyř základních kapitol: v první kapitole je vysvětlen princip polovodičů a v následujících jsou popsány tři polovodičové prvky tranzistor, tyristor a triak. Cílem je vytvoření multimediálního studijního materiálu ve formě www stránek, který nalezne uplatnění u studentů zejména v polovodičové části elektrotechniky. Tyto stránky budou přiloženy jako příloha k práci na kompaktním disku a také umístěny v univerzitním systému eAMOS.

Abstract

There is illustrated principle of semiconductors in the first chapter. A description of three semiconductors elements transistor, thyristor and triac is in chapter two, three and four. The main target is to create multimedia material for study in form of www page for students in electrotechnics branch. These pages will be a part of the essay and also I will write it to CD and it takes place in university system eAMOS.

Prohlašuji že jsem bakalářskou práci na téma Vícevrstevné polovodiče vypracoval samostatně, pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použité literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Čejkovicích dne 23. dubna 2008

.....

Jiří Sedlák

Je mou milou povinností na tomto místě poděkovat PaedDr. Jiřímu Tesařovi, Ph.D za poskytnutí užitečných rad a podnětných připomínek, které mi pomohly při vypracování této práce.

OBSAH

1. ÚVOD.....	6
2. HISTORIE POLOVODIČŮ.....	7
3. VODIVOST POLOVODIČŮ.....	9
3.1 Vlastní vodivost polovodičů.....	10
3.2 Nevlastní vodivost polovodičů.....	12
3.2.1 Vodivost typu N (elektronová).....	12
3.2.2 Vodivost typu P (děrová).....	13
3.3 PN přechod.....	15
3.4 Polovodičová dioda.....	19
4. TRANZISTORY.....	21
4.1 Bipolární tranzistor.....	22
4.1.1 Princip funkce bipolárního tranzistoru.....	22
4.1.2 Různá zapojení bipolárních tranzistorů a jejich parametry	26
4.1.3 Užití bipolárních tranzistorů.....	29
4.2 Unipolární tranzistor.....	30
4.2.1 Princip funkce unipolárního tranzistoru.....	32
4.2.2 Různá zapojení unipolárních tranzistorů a jejich parametry	34
4.2.3 Užití unipolárních tranzistorů.....	36
4.3 Porovnání bipolárního a unipolárního tranzistoru.....	36
5. TYRISTOR.....	38
5.1 Princip funkce tyristoru.....	39
5.2 Parametry a použití tyristoru.....	41
6. TRIAK.....	43
6.1 Spínání a vypínání triaku.....	44
6.2 Parametry a použití triaku.....	46
7. TVORBA WWW STRÁNEK V JAZYKU XHTML.....	47
8. ZÁVĚR.....	49
9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	50

1. ÚVOD

Toto téma jsem si vybral proto, že s polovodiči jsem se aktivně setkával již na střední škole a už tehdy mě zaujaly. Navíc si myslím, že je to okruh velmi aktuální a také zajímavý.

Polovodiče, jako zvláštní skupina pevných látek, jsou stále velice aktuální, jak z hlediska využívání jejich technických možností ve všech oborech vědy a techniky, tak po stránce poznávání stavby hmoty. Významnými polovodičovými materiály používanými pro výrobu polovodičových součástek jsou prvky IV. skupiny Mendělejevovy periodické soustavy prvků (jako je křemík Si nebo germanium Ge). Tyto prvky se vyznačují řadou optimálních vlastností, umožňujících realizaci polovodičových součástek vynikajících parametry.

Polovodičové součástky lze dělit podle jejich složení (zda jsou homogenní nebo zda mají jeden nebo více přechodů, kolik mají elektrod a jakého fyzikálního jevu se používá k řízení jejich činnosti), můžeme také rozlišovat mezi pasivními a aktivními součástkami, mezi řízenými prvky a měniči energie, jako jsou termočlánky, fotočlánky a čidla na elektrické měření neelektrických veličin.

Pestrost palety možných aktivních polovodičových součástek je velmi velká, avšak počet součástek s optimálními vlastnostmi je poměrně malý. Z velkého množství fyzikálně možných řešení se vybírají v praxi pouze takové typické součástky, které nejen splňují základní požadavek fyzikální funkce, ale jsou též jednoduché, spolehlivé a hlavně laciné.

Cílem této práce je vytvoření uceleného přehledu vícevrstvých polovodičových prvků (tranzistor, tyristor, triak) a je zde také uvedena kapitola PN přechodů, která s tímto tématem úzce souvisí. V každé kapitole polovodičových součástek zde naleznete na jakém principu součástky pracují, základní zapojení, jejich parametry a využití v praxi. Součástí práce bude také vytvoření přehledného studijního materiálu ve formě WWW stránek (jazyk XHTML).

Tato práce bude moci sloužit studentům, kroužkům a všem, kterým je elektronika blízká, jako přehledný doplněk učiva k učebnicím.

2. HISTORIE POLOVODIČŮ:

Ačkoliv polovodiče jako takové jsou známy déle než sto let, začal jejich velký rozmach teprve ve čtyřicátých letech dvacátého století. Úspěšný vývoj výzkumných a technických prací byl umožněn šťastnou souhrou řady důležitých činitelů:

- 1) Nutnost během druhé světové války najít lepší detektor centimetrových vln pro radarovou techniku, protože vakuové diody už nevyhovovaly současným požadavkům.
- 2) Soustředění velkého počtu pracovníků a prostředků pro zabezpečení vojenské techniky.
- 3) Dobrá volba prvků germania a křemíku jako výchozího materiálu.

V době před 2. světovou válkou byla už elektronika na slušné úrovni, existovalo rádiové a telefonní spojení, rozhlas, záznam a reprodukce zvuku atd. Srdcem těchto zařízení byly vakuové elektronky a elektromechanická spínací relé. Výroba součástek byla výborně zvládnuta a zdálo se, že jejich výrobci mají na dlouhou dobu o odbytu postaráno. Byli však mnozí, kteří se stále častěji zamýšleli nad zásadními nedostatky elektronek: velké rozměry, křehkost, krátká životnost, velká spotřeba, vyzařování značného množství tepla apod. Proto nastávala myšlenka, jestli by podobné součástky nešly vyrobit z vhodných pevných látek, bez skleněných baněk, vakua a žhavených katod.

Polovodiče se v té době používaly spíše okrajově. Zejména se uplatňovaly usměrňující vlastnosti spoje kov-polovodič (používaly se především sulfid olovnatý, selen, karbid křemíku, oxid zinečnatý, oxid měďnatý, křemík a germanium). Usměrňovače neměly dobře definované vlastnosti, součástky se výrazně lišily jedna od druhé. Problémem byla čistota používaných polovodičů, neexistovala ani teorie vysvětlující funkci polovodičových prvků.

Diodový jev byl známý dávno před vynálezem tranzistoru. Využíval se například už ve 20. letech 20. století v nejjednodušších radiopřijímačích - krystalkách. Plošky krystalu galenitu se dotýkaly jemného kovového hrotu a v místě dotyku se vytvořil přechod PN, potřebný k usměrnění signálu. Výzkumu vlastností polovodičů se v Bellových laboratořích (USA) začali hned po 2. světové válce věnovat William Shockley, John Bardeen a Walter Brattain. Koncem roku 1947 při pokusech s krystaly germania objevili tzv. tranzistorový jev - možnost ovlivňování procházejícího proudu napětím připojeným k hrotové elektrodě. Jméno nové polovodičové součástky - **tranzistor** - vzniklo jako kombinace anglického označení **transfer resistor**.

První tranzistor sestavili J. Bardeen a W. Brattain v Bellových laboratořích firmy AT&T 23. 12. 1947 a po dalším zdokonalení technologie a zpracování patentu byl v červnu 1948 vynález zveřejněn. Šlo o hrotový tranzistor tvořený kontakty, přitisknutými ke germaniové destičce. Princip jeho činnosti vysvětlil v následujícím roce W. Shockley a také navrhl praktičtější plošný tranzistor tvořený dvěma přechody p-n uvnitř krystalu polovodiče. Návrh se podařilo realizovat r. 1950. Plošné tranzistory už měly dobře definované vlastnosti a byly vhodné pro masovou výrobu. Dalším milníkem pak bylo zahájení výroby křemíkových tranzistorů v Texas Instruments (r. 1954) a objev jedinečných vlastností oxidu křemičitého SiO_2 (křemene), který se dá snadno vytvořit na povrchu krystalu. Již za několik let našel tranzistor uplatnění, nejprve v naslouchacích přístrojích a zakrátko i v prvních tranzistorových přijímačích a dalších přístrojích. Začala nová éra elektroniky.

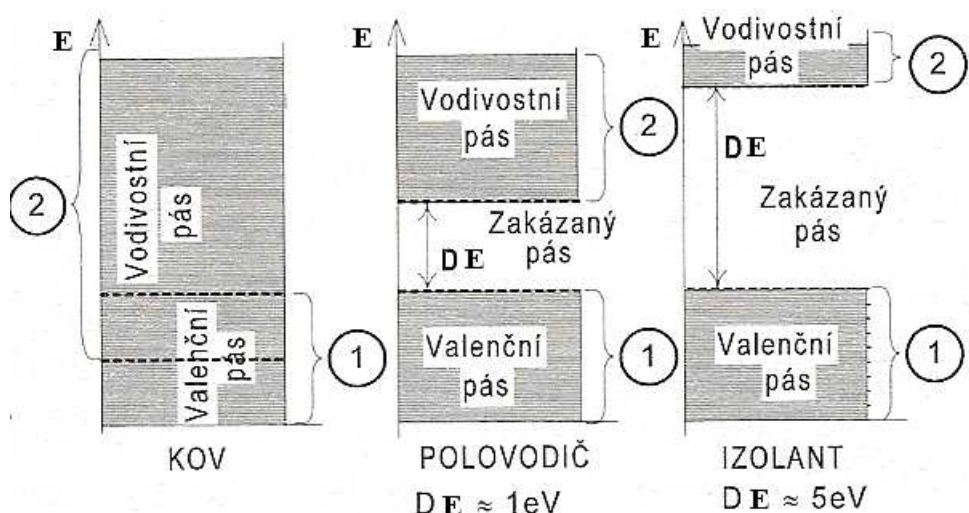
Kulminace vývoje bipolárních a unipolárních tranzistorů v šedesátých letech znamenala vytlačení vakuových elektronek zejména ze spotřební elektroniky a měla za následek přeorientování elektronického průmyslu na tranzistory. Tím však vývoj neskončil, naopak, planární technologie umožnila rozvoj integrovaných obvodů, které znamenaly nový převrat v elektronice. Následné hromadné nasazení integrovaných obvodů ve všech odvětvích průmyslu, znamená kvalitativní změnu ve všech oblastech výrobní, spotřebitelské a také řídicí sféry.

3. VODIVOST POLOVODIČŮ

Pro posouzení vodivosti látek byla vytvořena pásová energetická schémata látek (obr.3.1). Vyznačuje se znázorněním tří energetických pásů, viz Doleček [7]:

- valenčního
- zakázaného
- vodivostního

Čárkované vodorovné čáry na obr. 3.1 udávají hranice energetických pásů. Hladiny dovolených energií elektronů jsou odděleny pásy zakázaných energií, které elektrony nemohou nabývat.



Obr. 3.1 Energetická pásová schémata

Zakázaný pás **u kovů** neexistuje, protože se valenční a vodivostní pás překrývají.

Zakázaný pás má **pro polovodiče** velikost $\Delta E \sim 1 \text{ eV}$, zakázaný pás **izolantů** se pohybuje kolem 5 eV.

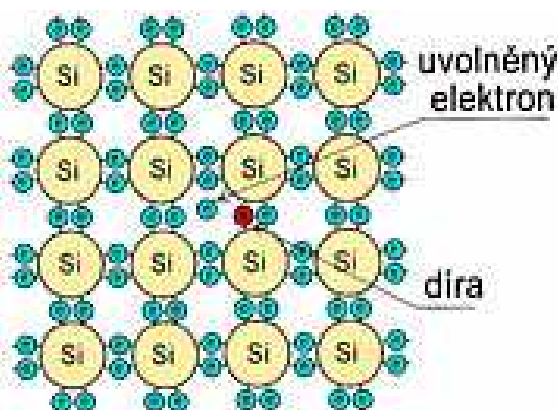
1 elektronvolt: $1 \text{ eV} = q_e \cdot U = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ($q_e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, $U = 1 \text{ V}$), kde q je náboj elektronu.

Na jedné energetické hladině mohou být současně nanejvýš dva elektrony. Počet atomů v krystalu pevné látky je velmi velký - řádově 10^{28} atomů na m^3 . Elektrony obsažené v krystalu musí mít k dispozici odpovídající počet energetických hladin.

Izolanty mají zakázaný pás velmi široký, takže elektron jej může překonat pouze za extrémních podmínek (např. při velmi silném elektrickém poli, nebo při velmi vysoké teplotě).

3.1 Vlastní vodivost polovodičů

Významnými materiály pro výrobu polovodičových součástek jsou prvky IV. Mendělejevovy periodické soustavy prvků (jako je křemík Si nebo germanium Ge). Ty mají ve valenční sféře čtyři elektrony a jejich atomy jsou vzájemně vázány kovalentní vazbou tvořenou čtyřmi dvojicemi elektronů. Její funkci si můžeme představit tak, že si vždy dva valenční elektrony sousedních atomů vzájemně vyměňují místa. Kromě materiálů IV. skupiny periodické soustavy prvků mohou být jako polovodiče používány materiály vzniklé kombinací prvků skupin III. a V. jako např. GaAs (gallium arsenid), gallium je trojmocný, arsenid pěti mocný prvek, nebo GaP (gallium fosfor).



Obr. 3.1.1 Uvolněný elektron a díra v krystalové mřížce

Díry a elektrony

Čisté polovodičové prvky mají při teplotě absolutní nuly ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) valenční elektrony pevně vázány ve valenční vrstvě – ustává tepelný vířivý pohyb atomů a krystal se chová jako izolant (má téměř nekonečný elektrický odpor, resp. nulovou elektrickou vodivost). Při vyšších teplotách se zvyšuje pravděpodobnost narušení kovalentních vazeb, elektrony mohou získat energii k překonání zakázaného pásma a přeskočit do vodivostního pásma.

Jestliže dodaná energie není k překonání zakázaného pásma dostatečná, může dojít k tomu, že elektron opustí krystalovou mřížku, přejde do zakázaného pásma, nedostane se do vodivostního a přitažlivé síly jej znovu přitáhnou a vrátí zpět na jeho místo.

Získá-li elektron dostatečnou energii, přeskočí zakázané pásmo, dostane se do vodivostního pásma a bude se pohybovat prostorem krystalové mřížky. Uvolněním elektronu, který má náboj $-qe$, vznikne ve valenčním pásmu prázdné místo bez elektronu, které nese název díra. Ta má stejně velký náboj jako elektron, ale opačného znaménka. Díra má kladný náboj

+qe (obr. 3.1.1). Při působení vnějšího elektrického pole se uvolněné elektrony i díry zúčastňují vedení proudu. Takto získaná vodivost polovodivých materiálů je nazývána vlastní vodivost polovodiče. Je vyvolána dodáním vnější energie např. teplem, světelným zářením apod.

Ve vlastním polovodiči je koncentrace volných elektronů a koncentrace děr při tepelné rovnováze stejná a je závislá pouze na teplotě. Tuto podmínku splňují pouze čisté polovodiče, které neobsahují žádné nečistoty.

Na vedení proudu se tedy v polovodiči podílejí elektrony a díry.

3.2 Nevlastní vodivost polovodičů

V technické praxi mají největší využití tzv. nevlastní polovodiče. Nevlastní vodivost můžeme vysvětlit například u prvku křemíku. Jestliže čistý křemík, který obsahuje čtyři valenční elektrony, "znečistíme" určitým množstvím třímocného nebo pětímocného prvku (řádově jednou miliótinou), vytvoříme nevlastní polovodič.

Obohacení příměsemi se děje nejčastěji buď **termickou difúzí**, kdy do polovodiče ohřátého na vysokou teplotu difundují skrze povrch polovodiče příměsi z atmosféry, která polovodič obklopuje, nebo tzv. **iontovou implantací**. Při iontové implantaci se atomy příměsí v plynném stavu ionizují a urychlují do svazku s průměrem menším než mikron. Svazek dopadá na povrch polovodiče a proniká do hloubky, která závisí na energii iontů. Při průchodu iontu materiálem dochází k jeho zachycení na určité pozici v krystalové mřížce a zároveň k jeho neutralizaci. Výhoda termické difúze je v relativně jednoduché technologii, výhoda iontové implantace ve velmi přesném vymezení obohacené oblasti.

Vlastnosti polovodičů jsou totiž silně závislé na příměsích a vhodným výběrem příměsí můžeme dosáhnout toho, aby v polovodiči byl elektrický proud veden buď volnými elektrony (elektronová vodivost, vodivost typu N), nebo "děrami" (děrová vodivost, vodivost typu P).

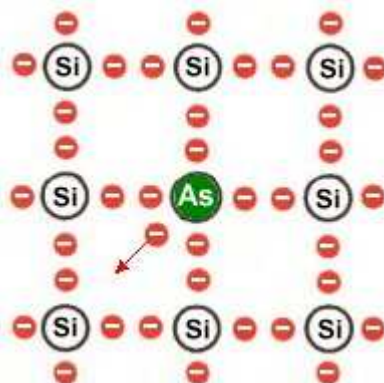
I velmi malé množství příměsových atomů v čistém polovodiči zvyšuje jeho vodivost velmi značně. Například přidáme-li do čistého krystalického křemíku atomy příměsí v koncentraci 1 atom příměsí na 10^8 atomů křemíku, zvýší se vodivost křemíku **tisíckrát!**

3.2.1 Vodivost typu N (elektronová)

Přidáme-li do struktury vlastního křemíku malé množství pětivalenčních atomů (atomů V. skupiny Mendělejevovy periodické soustavy prvků s pěti elektrony a valenční vrstvě) způsobí toto znečištění, že materiál obsahuje nadbytečné elektrony, které byly krystalu dotovány.

Například nahrazení čtyřmocného atomu křemíku v krystalové mřížce pětímocným atomem arsenu (fosforu, antimonu, ...) podle obr 3.2.1 způsobí, že pátý elektron je k jádru vázán slabě a může být uvolněn mnohem menší energií. Tento nadbytečný elektron se může v materiálu volně pohybovat a způsobuje elektronovou vodivost, někdy také zvanou negativní.

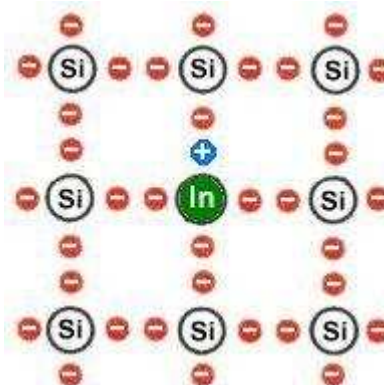
Příměs pětímocného prvku = DONOR (dárce)



Obr.3.2.1 Vytvoření polovodiče typu N

3.2.2 Vodivost typu P (děrová)

Je-li vlastní polovodič dotován prvkem obsahujícím pouze tři valenční elektrony jako je například hliník (Al), bor (B), gallium (Ga) případně indium (In), vznikne nevlastní polovodič, kterému u některých atomů chybí valenční elektron (viz obr. 3.2.2).



Obr.3.2.2 Vytvoření polovodiče typu P

Příměs trojmocného prvku (říká se mu akceptor) vytváří v krystalu křemíku nadbytek kladných "děr", které po připojení ke zdroji způsobují jeho děrovou vodivost typu P.

Akceptory

Příměsi se třemi valenčními elektrony způsobují vznik míst s chybějícími elektron-díra. Díra je nositelem kladného náboje. Prvkům, které dotují polovodiče typu P nazýváme akceptory.

V polovodiči typu P je nevlastní vodivost děrová.

Děry, které jsou do polovodiče typu P dodány, je mnohem více než vlastních nosičů náboje polovodiče a proto jsou díry většinovými nosiči náboje.

Vlastní a nevlastní vodivost - shrnutí

Z toho, co bylo již poznamenáno, je zřejmé, že se polovodiče vyznačují dvěma typy vodivosti - vlastní a nevlastní.

Vlastní vodivost je způsobena vlivem teploty (případně i dalšími vnějšími vlivy) a je tedy teplotně závislá.

Nevlastní vodivost je pevně stanovena množstvím příměsí dotovaných do vlastního polovodiče. Je proto závislá pouze na množství příměsí dodaných do polovodiče, nikoliv na jeho teplotě.

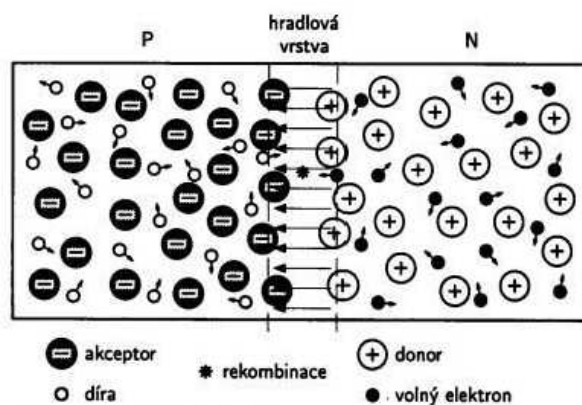
Menšinové nosiče náboje jsou nazývány **minoritní**.

Většinové nosiče náboje jsou nazývány **majoritní**.

3.3 PN PŘECHOD

PN přechod se vyrábí tak, že spojíme polovodič jednoho typu vodivosti s polovodičem opačného typu vodivosti, rozhraní těchto vrstev pak tvoří PN přechod. Tento přechod je velmi úzký (řádově 10^{-3} mm).

Přechod PN má v elektronice velké využití. Má tu vlastnost, že v jednom směru jím proud může procházet, zatímco v opačném směru nikoli. Vysvětlení spočívá v tom, že polovodič typu N obsahuje ve své krystalové mřížce volně pohyblivé záporné elektrony, polovodič typu P má v krystalové mřížce volně pohyblivé kladné "díry".



Obr. 3.3.1: Vznik přechodu PN v krystalu polovodiče

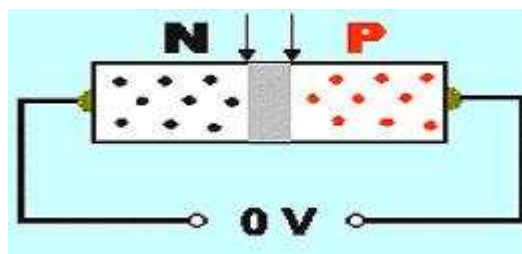
V části N je daleko větší hustota volných elektronů než v části P, v části P je zase mnohem více děr než v části N. Z části N tedy nastává difúze volných elektronů do části P a z části P zase difúze děr do N (obr. 3.3.1) podle [2]. Rekombinace nábojů je tedy příčinou vzniku hradlové vrstvy v místě rozhraní polovodičů s elektrickým polem, jehož intenzita směřuje z N do P. V tomto místě je tedy nedostatek volných částic s nábojem, proto má přechod PN značný odpor.

Na přechodu PN mohou nastat tři situace:

- 1) K přechodu PN není připojen zdroj napětí
- 2) Zdroj napětí je připojen v závěrném směru
- 3) Zdroj napětí je připojen v propustném směru

1) PN přechod bez přiloženého napětí

Elektrony a díry začnou přecházet z místa s vyšší koncentrací do místa s nižší koncentrací (difundovat). To znamená, že elektrony začnou přecházet z oblasti typu N do oblasti P a díry z oblasti typu P do oblasti N (*obr.3.2.2*). Můžeme si to představit tak, že elektrony jsou přitahovány děrami a naopak. V oblasti styku obou polovodičů se část elektronů z oblasti N dostane do oblasti P a část "děr" z oblasti P přejde do oblasti N. Volné elektrony rekombinují (proces, při kterém zaniká pár elektron-díra) s "děrami", takže kolem přechodu PN se vytvoří nevodivá oblast bez volných nábojů (na obrázku 3.2.2 vyznačena šedou barvou).



Obr. 3.3.2 PN přechod bez přiloženého napětí

Ochuzená (vyprázdněná) oblast

V přechodové vrstvě v okolí přechodu PN se vzhledem k ostatním oblastem polovodiče sníží koncentrace většinových nosičů náboje - tato oblast se proto nazývá ochuzenou (vyprázdněnou, nevodivou) vrstvou (v přechodové vrstvě na straně N budou chybět elektrony - bude ochuzena o elektrony, na straně P díry - bude ochuzena o díry).

Difúzní napětí

Difúzí elektronů z N do P vznikne na přechodu PN v oblasti P záporný prostorový náboj, difúzí děr do oblasti N vznikne na přechodu PN v oblasti N kladný prostorový náboj. Rozložení prostorového náboje vytváří na přechodu PN elektrické pole intenzity E a tím i napětí U , které po dosažení určité velikosti U_{dif} zvané difúzní napětí zabrání difúzi dalších

volných nosičů náboje a nastane rovnovážný stav.

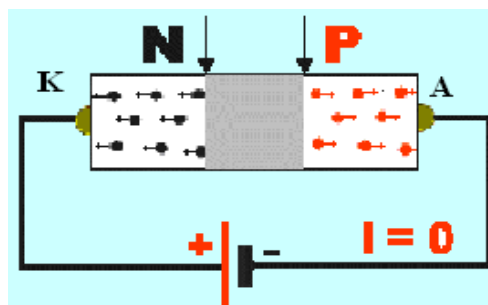
Po připojení zdroje napětí na svorky N a P dojde k porušení tohoto rovnovážného stavu a k vytvoření nového rovnovážného stavu, při kterém bude změněna šířka přechodu PN (potenciálové bariéry).

2) Zdroj napětí je připojen v závěrném směru

Připojíme-li na vývod ze strany s polovodičem typu P označený na *obr. 3.3.3* písmenem A (anoda) záporné napětí a na druhý vývod označený K (katoda) kladný pól zdroje, vzdalují se působením elektrických sil volné náboje od přechodu PN, oblast bez volných nábojů se rozšíří, její odpor vzroste a elektrický proud přechodem PN nemůže procházet.

Tomuto směru polarizace napětí na svorkách říkáme polarizace v závěrném směru (*obr. 3.3.3*). Elektrické pole vytvořené přiloženým napětím má stejný směr jako původní pole vytvořené difúzí, které způsobilo vytvoření ochuzené oblasti. Obě pole se podporují.

Nevodivé oblasti bez volných nábojů říkáme hradlová vrstva.



Obr. 3.3.3 Nepropustně polarizovaný přechod PN

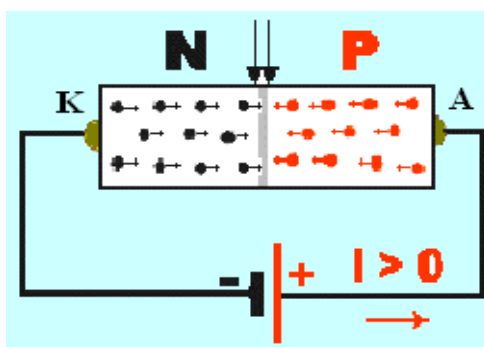
Zbytkový proud

V okolí závěrně polarizovaného přechodu PN proto neexistují žádné náboje, které jsou schopné rekombinovat. Připojený zdroj proto nemusí dodávat žádné elektrony. Přes přechod prochází pouze proud menšinových nábojů - tzv. zbytkový proud.

3) Zdroj napětí je připojen v propustném směru

Změníme-li polaritu připojeného zdroje, přecházejí působením elektrických sil volné elektrony přes přechod PN ke kladnému pólu a "díry" jsou přitahovány k zápornému pólu. Kladný pól zdroje připojený ke svorce A odpuzuje díry k přechodu. Zároveň odpuzuje směrem k přechodu záporný pól zdroje připojený ke svorce K elektrony. Dojde tím na přechodu k rekombinaci kladných a záporných nábojů. Velikost proudu odpovídá množství rekombinovaných párů elektrických nosičů na přechodu.

Výsledkem je zúžení hradlové vrstvy a zmenšení jejího odporu. Takto zapojeným přechodem PN proud prochází.



Obr. 3.3.4 Propustně polarizovaný přechod PN

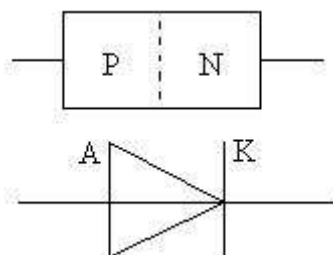
Závislost šířky potenciálové přehrady na velikosti a polaritě vnějšího zdroje vyvolává usměrňovací vlastnosti PN přechodu.

Velikost potenciálové bariéry závisí na použitém polovodiči. Napětí u přechodu germania je přibližně 0,2 V až 0,4 V, křemík má potenciálovou bariéru o velikosti 0,6 V až 0,8 V. Překročí-li přiložené napětí v propustném směru hodnoty potenciálové bariéry, bude šířka přechodu prakticky nulová.

Závislost odporu PN na polaritě napětí se nazývá diodový jev.

3.4 Polovodičová dioda

Polovodičové diody jsou elektronické součástky, které zpravidla obsahují jeden PN přechod. Schematická značka diody je znázorněna na *obr. 3.4.1*



Obr. 3.4.1 Spojení P a N vrstev, Schematická značka diody

Polovodičová dioda je součástka s dvěma vývody připojenými ke krystalu polovodiče s jediným přechodem PN (viz *obr.3.4.1*), vývod spojený s oblastí P je anoda a vývod spojený s N je katoda, viz [1]. Je to nelineární součástka, neplatí pro ni Ohmův zákon, je závislá nejen na velikosti napětí, ale i na jeho orientaci:

- pokud diodu zapojíme v propustném směru (potenciál anody je větší než potenciál katody) pak proud prochází normálně jako bez diody
- pokud je zapojena v závěrném směru (potenciál katody je větší než potenciál anody) proud v obvodu neprochází

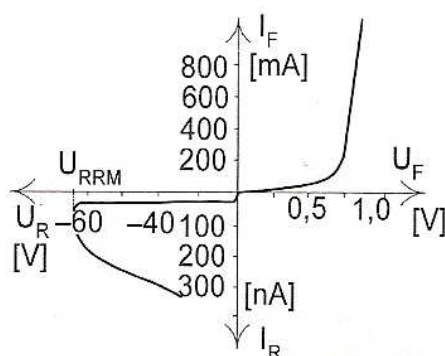
Závislost vodivosti na polaritě napětí je již dříve zmíněný diodový jev.

Vysvětlení diodového děje:

Elektrony s N a díry s P se setkají na přechodu PN a nastanou rekombinace, převládne působení nepohyblivých iontů příměsí (donorů a akceptorů), vznikne hradlová vrstva silná asi 1 μm s elektrickým polem jehož intenzita směřuje z N do P, toto elektrické pole zabráňuje další pronikání elektronů a děr a nastane rovnovážný stav. Takže pokud je dioda zapojena v propustném směru, elektrické pole v diodě je z působení zdroje orientováno proti hradlové vrstvě a potlačí ji. Pokud je ovšem zapojena ve směru závěrném, hradlová vrstva zesílí a prochází velice malý proud (menšinové nosiče)

Voltampérová charakteristika diody

Voltampérová charakteristika diody je závislost proudu procházející diodou a připojeným napětím.



Obr. 3.4.2 Volt - ampérová charakteristika křemíkové diody

V propustném směru (obr. 3.4.2 první kvadrant) proud začíná rychle stoupat po dosažení prahového napětí, proud nesmí překročit určitou hodnotu I danou výrobcem.

V závěrném směru (třetí kvadrant) prochází jen malý proud, napětí nesmí překročit průrazné napětí U_{RRM} (Zenerovo napětí), došlo by ke zničení diody. Dioda, která pracuje i po překročení tohoto napětí se nazývá Zenerova dioda. [7]

4. Tranzistory :

Tranzistor je polovodičová součástka, tvořená dvojicí přechodů PN. Jedná se o spojení dvou polovodičových diod v jedné součástce, většinu vlastností tranzistoru však dvojicí diod nahradit nemůžeme. Tranzistor je základem všech dnešních integrovaných obvodů, jako např. procesorů, pamětí atd.

Tranzistorový efekt byl objeven a tranzistor vynalezen v roce 1947 týmem ve složení William Shockley, John Bardeen a Walter Brattain. Za tento objev jim byla roku 1956 udělena Nobelova cena za fyziku, jednalo se o velmi významný objev, který vedl k faktickému vědeckotechnickému převratu v oblasti aplikované elektrotechniky, v praxi se to projevuje zejména obrovskou mírou miniaturizace jednotlivých součástek a tím i neustálým zvyšováním koncentrace polovodičových součástek vztaženou na jednotku plochy.



Obr. 4. 1 Tranzistory

Tranzistory dělíme podle toho, jestli se na vedení proudu podílejí nosiče obou polarit nábojů, nebo pouze jedna polarita. Jestliže se na vedení podílejí oba nosiče, nazýváme tranzistor bipolární, pokud pouze nosič jedné polarity, pak se jedná o tranzistor unipolární.

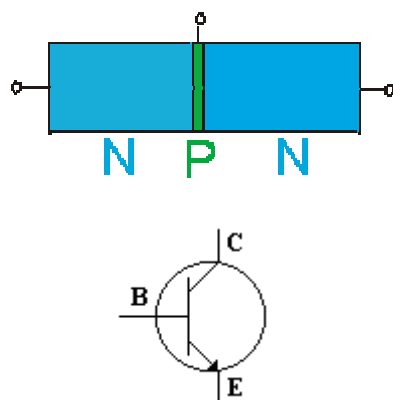
Každý tranzistor má alespoň tři elektrody (*obr 4.1*), které se u bipolárních tranzistorů označují jako kolektor, báze a emitor, u unipolárních jako drain, gate a source. Podle uspořádání použitých polovodičů typu P nebo N se rozlišují dva typy bipolárních tranzistorů, NPN a PNP (prostřední písmeno odpovídá bázi). Unipolární tranzistory jsou označovány jako N-FET nebo P-FET.

4.1 Bipolární tranzistor

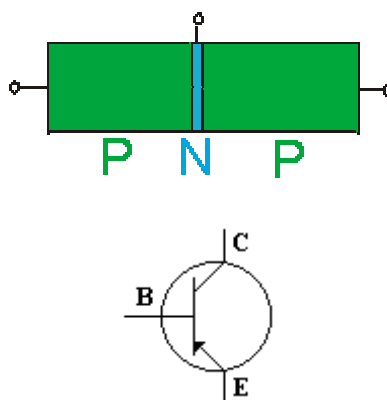
Bipolární tranzistor (BJT - Bipolar Junction Transistor) je součástka, která umožňuje malým proudem řídit větší proud, který jí protéká. Tato součástka obsahuje dva PN přechody. Tyto přechody vzniknou tak, že je mezi dva polovodiče typu N umístěn polovodič typu P (uspořádání NPN), nebo mezi dva polovodiče typu P umístěn polovodič typu N (uspořádání PNP).

Podle [3] má tranzistor tři elektrody, které jsou označeny: emitor E, kolektor C a báze B (obr. 4.1.1 a 4.1.2). Přechod PN umístěný blíže ke kolektoru nazýváme přechod kolektorový, přechod PN, který se nachází blíže k emitoru, nazýváme přechod emitorový.

Výsledná struktura bipolárních tranzistorů a schematické značky:



Obr. 4.1.1 Tranzistor typu NPN

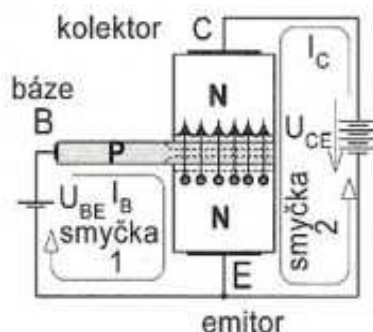


Obr. 4.1.2 Tranzistor typu PNP

4.1.1 Princip funkce bipolárního tranzistoru

Princip bipolárního tranzistoru je založen na vzájemném působení (interakci) dvou přechodů PN. Na obr. 4.1.3. je znázorněn princip uspořádání bipolárních tranzistorů typu NPN. [3]

Mezi dvěma oblastmi typu N, z nichž jedna je spojena s kolektorovou elektrodou a druhá s elektrodou emitor, je umístěna úzká oblast typu P spojená s elektrodou báze tranzistoru.



Obr. 4.1.3 Princip uspořádání tranzistoru NPN

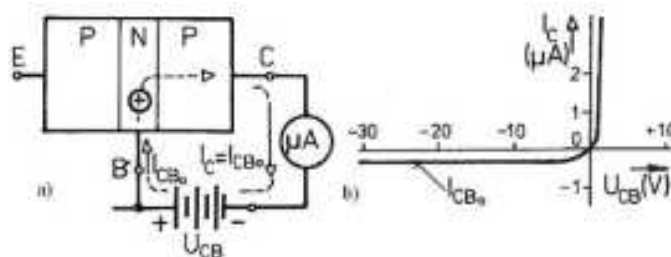
Napětí mezi bází a emitorem U_{BE} může mít takovou polaritu že:

- přechod PN mezi bází a emitorem je polarizován v propustném směru.
- polarita napětí U_{CE} způsobuje, že přechod mezi kolektorem a bází je polarizován v závěrném směru.

Protože je oblast typu P úzká, jsou oba PN přechody umístěny v těsné blízkosti, to umožňuje jejich ovlivňování.

Zapojíme tranzistor PNP do obvodu nakresleném na obrázku 4.1.4 a. Emitor je odpojen, a proto se neuplatňuje. Přechod kolektor - báze tvoří diodu, která je polarizována napětím U_{CB} v závěrném směru. Proto bude jejím obvodem procházet pouze velmi malý proud minoritních nosičů náboje, který je nasycen již při napětí několik desetin voltu (obr. 4.1.4 b). Kdybychom změnili polaritu napětí U_{CB} , přechod kolektor-báze by se otevřel a proud v obvodu by velmi prudce vzrostl, viz [2] .

Z obr. 4.1.4 b vidíme, že popsaná závislost proudu I_C na napětí U_{CB} je volt - ampérovou charakteristikou diody kolektor-báze, která se nijak neliší od voltampérové charakteristiky běžné polovodičové diody vysvětlené v kapitole 3.4.

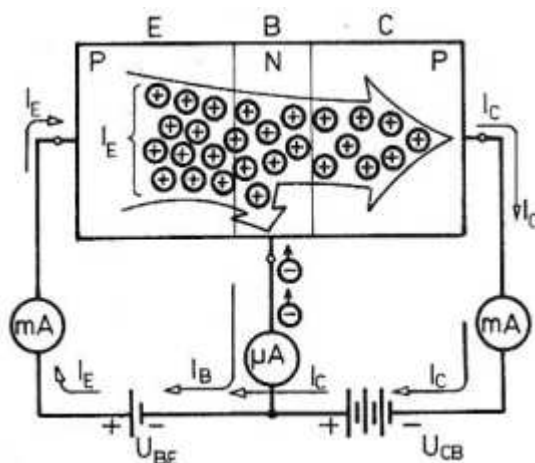


Obr. 4.1.4 Zpětný proud diody kolektor – báze (zbytkový proud)

Z grafu je dále zřejmé, že v obvodu tranzistoru působí poměrně velké napětí (desítky voltů), avšak procházející proud je jen velmi malý (mikroampéry). Odpovídající výkon, daný součinem obou veličin, je pouze několik mikrowattů.

Kdybychom chtěli tento výkon zvětšit, museli bychom zvětšit proud procházející obvodem kolektoru (tj. kolektorový proud I_C), viz [2]. K tomu však potřebujeme (viz obr. 4.1.4 a) zvětšit počet minoritních nosičů náboje v oblasti báze (v tranzistoru PNP počet děr). Tento požadavek můžeme splnit velmi snadno. Stačí, když napětím několik desetin voltu otevřeme přechod emitor-báze (obr. 4.1.5). Díry, které jsou majoritními nosiči náboje v emitoru, začnou procházet ve velikém množství do oblasti báze. Vytvářejí emitorový proud tranzistoru I_B . Protože báze má poměrně malou tloušťku, prochází téměř celý emitorový proud až do kolektoru tranzistoru. Výkon v obvodu kolektoru dosáhne hodnoty $I_C \cdot U_{CB} = I_E \cdot U_{CB}$, to znamená, že mnohonásobně stoupne. Velikost emitorového proudu je možné řídit napětím U_{BE} . Podle konstrukčního provedení tranzistoru může být proud I_E několik miliampérů až několik desítek ampérů. Výkon ve výstupním obvodu pak může dosáhnout hodnoty až několik set wattů.

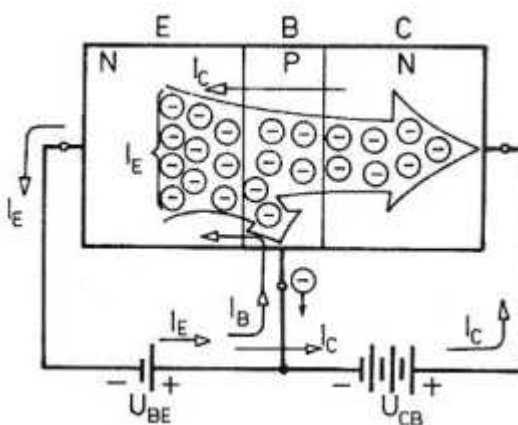
Z celkového počtu děr přicházejících z emitoru do báze stačí v oblasti báze rekombinovat jen velmi malá část, zpravidla menší než 1 %. Úbytek elektronů v bázi vzniklý rekombinací s dírami je vyrovnáván proudem báze I_B , který je tvořen elektrony přiváděnými ze záporného pólu zdroje U_{BE} .



Obr. 4.1.5 Činnost tranzistoru PNP

Z obr. 4.1.5 je zřejmé, že $I_E = I_C + I_B$

Podobným způsobem, kterým byla vysvětlena činnost tranzistoru PNP, můžeme vysvětlit též činnost tranzistoru NPN. Dioda kolektor - báze je opět polarizována v závěrném směru, aby z báze do kolektoru mohly procházet jen minoritní nosiče náboje. V tomto případě jsou to ovšem elektrony a technický směr proudu se označuje proti směru jejich pohybu.



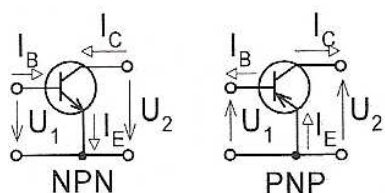
Obr. 4.1.6 Činnost tranzistoru NPN

Stejně jako v tranzistoru PNP prochází i zde výstupním obvodem při proudu $I_E = 0$ pouze nepatrný proud I_{CB0} . Otevřeme-li napětím U_{BE} přechod báze - emitor, přivedeme do oblasti báze z emitoru elektrony, jejichž převážná část pokračuje do kolektoru, kde vytvoří výstupní proud I_C . Jen malá část z celkového počtu přicházejících elektronů se uzavírá přívodem k bázi do kladného pólu zdroje U_{BE} a tvoří proud báze I_B .

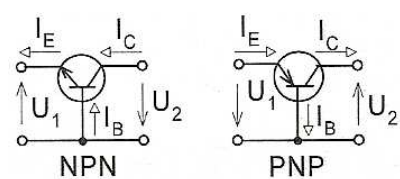
Na obrázcích 4.1.5 a 4.1.6 podle [2] vidíme, že oba druhy tranzistorů se liší polaritou působících napětí a směry procházejících proudů.

4.1.2 Různá Zapojení bipolárních tranzistorů a jejich parametry

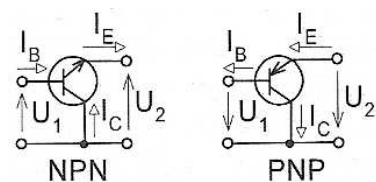
Aby tranzistor mohl pracovat jako dvojbran, musí být jeden z jeho tří vývodů společný pro vstupní i výstupní bránu. Může tedy být v obvodu zapojen třemi základními způsoby: se společnou bází (SB), se společným emitorem (SE) a se společným kolektorem (SC). Je samozřejmé, že způsob zapojení nemůže mít vliv na vnitřní činnost tranzistoru. Různé chování tranzistoru v jednotlivých základních zapojeních je způsobeno využitím různých jeho elektrod ve vstupním a ve výstupním obvodu.



Obr. 4.1.7 Zapojení SE (nejčastější využití)



Obr. 4.1.8 Zapojení SB



Obr. 4.1.9 Zapojení SC

Tabulka 4.1.1 uvádí vlastnosti jednotlivých zapojení tranzistorů [7]:

Vlastnosti:		Zapojení		
		SE	SB	SC
Zesílení	Proudové	0,95~0,998	200~500	200~500
	Napět'ové	10~100	10~100	0,9~0,99
	Výkonové	10~100	100~2000	10~200
Impedance	Vstupní	(10 ~ 100) Ω	100 Ω ~1K Ω	(10~100)K Ω
	Výstupní	10K Ω ~1M Ω	(10~100)K Ω	100 Ω ~1K Ω
Fázový posun	Proudů	180°	0°	0°
	Napětí	0°	0°	0°
Zbytkový proud		Malý (I_{CB0})	Větší (I_{CE0})	Větší (I_{CE0})
Saturační napětí		Malé	Větší	Střední
Mezní kmitočet		Velký (f_a)	Nízký (f_b)	
Použití:		Měníč impedance (nízká na vysokou)	Zesilovač	Měníč impedance (vysoká na nízkou)

Tabulka 4.1.1. Vlastnosti jednotlivých zapojení tranzistoru

Parametry:

Bipolární tranzistor je charakterizován následujícími parametry:

α - proudový zesilovací činitel

β - proudový zesilovací činitel

Proudový zesilovací činitel α je určen vztahem: $\alpha = I_C/I_E$ $U_{CB} = \text{konst.}$

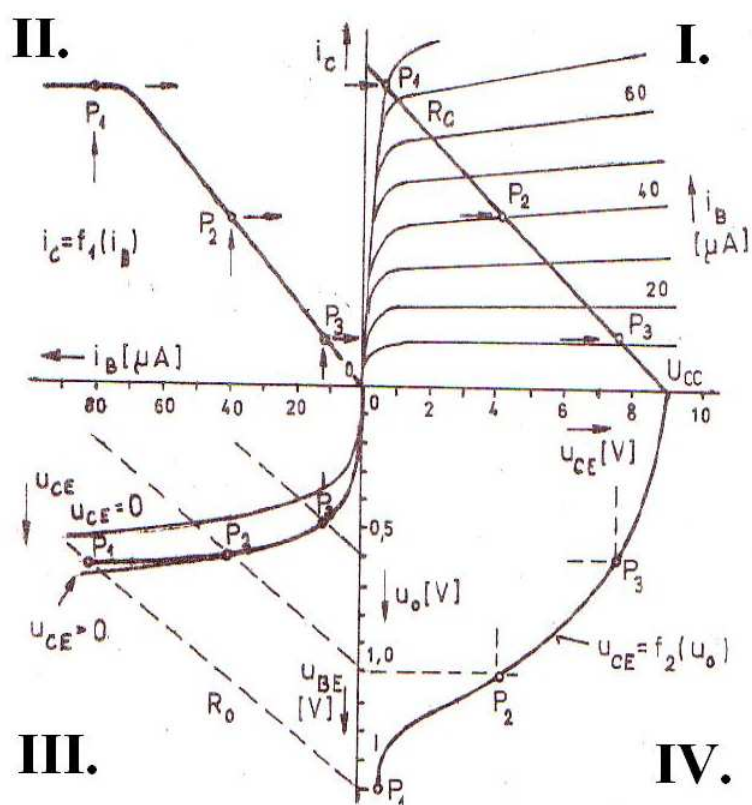
Při zapojení se společnou bází (obr. 4.1.8) je vstupním proudem proud emitoru I_E , Výstupním proudem, stejně jako v zapojení se společný emitorem je kolektorový proud I_C .

Parametr α vyjadřuje poměr emitorem vstřikované části kolektorového proudu k celkovému proudu emitoru. Čím je tranzistor kvalitnější, tím více se hodnota α blíží k 1, avšak vždy je menší než jedna. [7]

Proudový zesilovací činitel β je určen vztahem: $\beta = I_C/I_B$ $U_{CE} = \text{konst.}$

Zapojíme-li tranzistor se společným emitorem podle obrázku 4.1.7, zjistíme velikost statického zesilovacího činitele β takovým způsobem, že nastavíme proud I_B a napětí U_{CE} . To znamená, že nastavíme pracovní bod tranzistoru. K určení velikosti proudového zesilovacího činitele β , ještě musíme změřit proud I_C .

Na obr. 4.1.10 jsou znázorněny typické průběhy čtyřpólových charakteristik tranzistoru:



Obr. 4.1.10 V-A charakteristika Bipolárního tranzistoru

I. kvadrant: V prvním kvadrantu jsou vykresleny výstupní charakteristiky, které vyjadřují závislost výstupního proudu I_C tranzistoru na výstupním napětí.

II. kvadrant: Ve druhém kvadrantu jsou vykresleny převodní charakteristiky. Převodní charakteristiky nám udávají závislost výstupního proudu I_C na vstupní veličině I_B .

III. kvadrant: Ve třetím kvadrantu se nacházejí vstupní charakteristiky. Ty jsou závislé na výstupním napětí U_{CE} pouze málo a proto většinou vystačíme pouze s jednou vstupní charakteristikou. Ze vstupních charakteristik můžeme určit vstupní statický odpor.

IV. kvadrant: Znázorněné závislosti v posledním čtvrtém kvadrantu vyjadřují zpětný vliv výstupních parametrů na vstupní. Parametrem těchto charakteristik je stejná vstupní veličina jako u charakteristik výstupních.

4.1.3 Užití bipolárních tranzistorů

Bipolární tranzistor se používá ve třech základních oblastech:

K zesilování slabých signálů jako **zesilovač** - slabý signál přivedený na bázi je po zesílení odebrán z obvodu kolektoru. Pro větší zesílení se zapojují tranzistory jako vícestupňový zesilovač.

Jako **generátor** - vhodným zapojením je možno tranzistorem řídit periodické dodávání energie do kmitavého obvodu a udržovat v něm netlumené kmity. Využití je především ve vysílačích všeho druhu.

Tranzistor lze užít i jako **spínač** - tato oblast využití tranzistoru je základem obvodů v digitálních přístrojích - kalkulačkách, měřicích přístrojích, signalizačních zařízeních a jsou ukryty v každém integrovaném obvodu, ať už se jedná o analogový nebo číslicový obvod. Jsou základem počítačů a digitální techniky.

Další miniaturizaci elektronických zařízení a výrobu mikroprocesorů umožnily teprve unipolární tranzistory se zanedbatelnou spotřebou elektrické energie...

4.2 Unipolární tranzistor

Tranzistory řízené elektrickým polem – **FET** (Field Electric Tranzistor). Je to aktivní elektronický prvek, ve kterém je tok většinových (majoritních) nábojů procházejících kanálem řízen příčným elektrickým polem. To je vytvořeno napětím přiloženým na řídicí elektrodu, která je nazývána hradlo (gate) a má označení G.

Na vedení proudu se podílí nosiče nábojů pouze jedné polarity, buď díry nebo elektrony. (děrová nebo elektronová vodivost).

Unipolární tranzistory dělíme:

Podle typu vodivého kanálu:

- s vodivým kanálem typu **P**
- s vodivým kanálem typu **N**

Podle technologie:

J-FET – Gate má oddělen potenciálovou bariérou

JUG-FET – řídicí elektroda (hradlo) je oddělena od polovodiče přechodem PN. „ **J**unction gate **FET**“

MES-FET – bariéra se vytváří přechodem kov-polovodič

IG-FET – Gate má oddělen mechanicky (pomocí izolantu)

MIS-FET – má kovové hradlo izolované od polovodiče „**M**etal **I**nsulator **S**emiconductor **FET**“

MOS-FET – má kovové hradlo izolované od polovodiče oxidem „**M**etal **O**xid **S**emiconductor **FET**“

Základní funkcí tranzistoru řízeného elektrickým polem (FET) je řídit hustotu volných elektrických nábojů, které procházejí částí polovodiče, pomocí elektrického pole.

Kanál

Jedním ze základních pojmů používaných při popisu činnosti unipolárních tranzistorů je „kanál“. Pod tímto pojmem si představíme oblast, kterou prochází elektrický náboj, tedy kterou protéká proud I_D mezi kolektorem a emitorem tranzistoru. Kanál je vytvořen mezi dvěma protilehlými oblastmi polovodiče. Kanál může být buď typu P nebo typu N, podle toho zda proud je tvořen elektrony nebo dírami.

Velikost proudu, který prochází kanálem, závisí na vnitřním odporu R kanálu a na napětí přiloženém mezi kolektor a emitor tranzistoru.

Velikost elektrického pole, kterým je řízena šířka kanálu, je určena velikostí napětí přiloženého na hradlo G tranzistoru. Na velikosti elektrického pole závisí šířka kanálu a tím i velikost jeho odporu.

Názvy elektrod unipolárního tranzistoru:

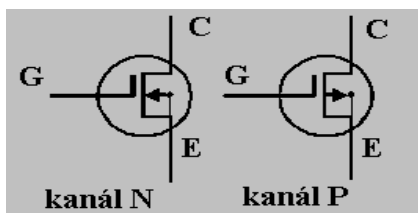
Emitor: jeden vývod kanálu je nazýván emitor (source), označení **E** nebo **S**. Emituje (vydává elektrony).

Kolektor: druhý vývod kanálu je nazýván kolektor (drain), označení **K** nebo **D**. Přijímač elektronů.

Hradlo: je řídicí elektroda, na kterou je připojeno řídicí napětí, kterým je ovládána šířka kanálu a velikost jeho odporu. Hradlo označujeme písmenem **G** z anglického slova Gate (Brána).

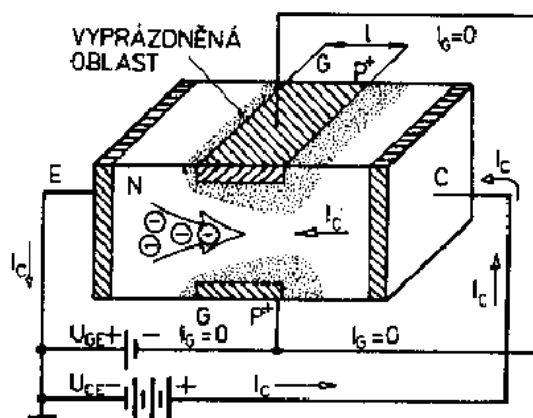
4.2.1 Princip funkce unipolárního tranzistoru

Tranzistor řízený elektrickým polem s přechodovým hradlem (JFET):



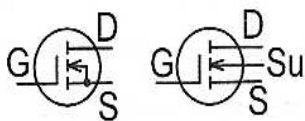
Obr 4.2.1 Schematické značky tranzistoru JFET

Uspořádání tohoto typu tranzistoru je schématicky znázorněno na obr. 4.2.2 viz [2]. Základem je polovodičová destička s vodivostí typu N opatřena na obou koncích neusměrňovacími kovovými kontakty, které slouží k přivádění proudu a mají význam emitor (E) a kolektoru (C). Do horní i dolní stěny základní destičky je v délce l vytvořena difúzí silně dotovaná vrstva obráceného typu vodivosti (P^+) nazvaná hradlo (G). Obě části hradla jdou spolu vodivě spojeny. Hradlo tvoří řídicí elektrodu tranzistoru. Prostor mezi částmi hradla se nazývá kanál. Jsou-li hradlo i kolektor spojeny s emitorem, tvoří se v okolí hradla vyprázdněná oblast. Tloušťku vyprázdněné oblasti je možné měnit napětím přiloženým k přechodu. Připojíme-li tedy mezi hradlo a emitor napětí U_{GE} tak, aby přechod byl polarizován v závěrném směru, můžeme obě vyprázdněné oblasti rozšířit. Tím zúžíme vodivou část kanálu a zvětšíme jeho odpor. Odpor kanálu měníme tedy velikostí napětí přiloženého v závěrném směru mezi hradlo a emitor.



Obr 4.2.2 Tranzistor JFET

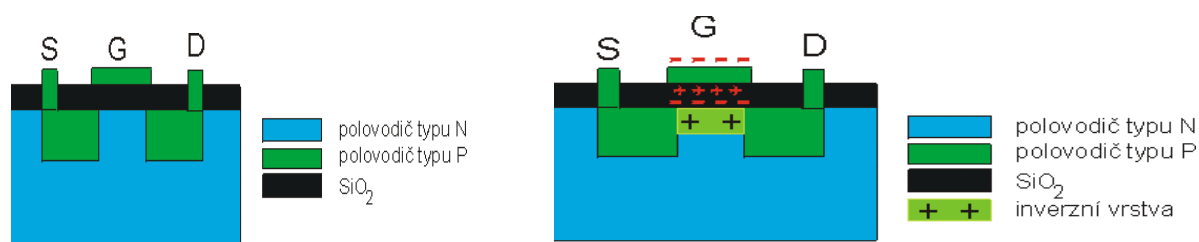
Tranzistor MOSFET s indukovaným kanálem:



Obr. 4.2.3 Schematická značka

Dokud není na hradlo G připojeno žádné napětí, existují mezi emitorem a kolektorem dvě antisériově zapojené diody (dva PN přechody). Tyto diody brání průtoku proudu od kolektoru k emitoru, je-li mezi kolektor a emitor přivedeno napětí U_{DS} .

K vytvoření kanálu (typická délka kanálku je mezi jedním až 10 μm a šířka od 2 do 500 μm .) je třeba vytvořit pod hradlem dostatečně velké elektrické pole. To vytvoříme přivedením záporného napětí na hradlo G a poté se pod ním začne hromadit kladný náboj – kanál se rozšiřuje. Začneme-li potom zvyšovat napětí U_{DS} , začne touto indukovanou oblastí P prudce stoupat proud volných elektronů, protože kanál je široký a jeho odpor malý. Indukovaná oblast tedy vytvořila kanál pro elektrický proud.

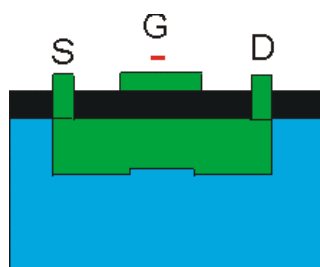


Obr. 4.2.4 Struktura tranzistoru MOSFET. Obr. 4.2.5 MOSFET po přiložení napětí na řídicí elektrodu

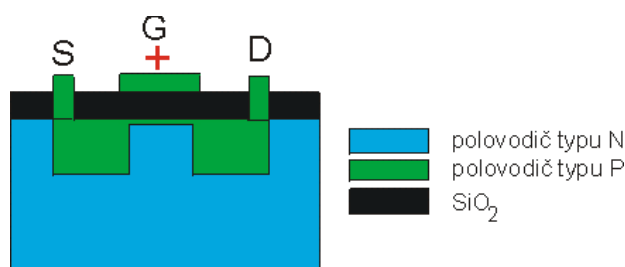
Tranzistor MOSFET s vodivým kanálem:

Uspořádání tranzistorů s vodivým kanálem je obdobné konstrukčnímu uspořádání tranzistorů s indukovaným kanálem. Stejně jako tranzistory s indukovaným kanálem, mají dvě oblasti se silnou koncentrací příměsí P. Rozdíl oproti tranzistorům s indukovaným kanálem je v tom, že mají vytvořen vodivý kanál již při nulovém napětí na řídicí elektrodě.

Tyto tranzistory pracují při zvětšování vodivosti kanálu v režimu obohacení (obr. 4.2.6), při zmenšování vodivosti kanálu pracují v režimu ochuzení (obr. 4.2.7).



Obr.4.2.6 MOSFET ve stavu obohacení

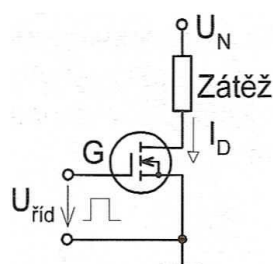


Obr.4.2.7 MOSFET ve stavu ochuzení

4.2.2 Různá zapojení unipolárních tranzistorů a jejich parametry

Na obrázcích 4.2.8. a 4.2.9 vidíme dvě základní zapojení tohoto elektronického prvku. Je to zapojení unipolárního tranzistoru jako spínacího prvku a zapojení jako zesilovače malých signálů. [7]

Unipolární tranzistor jako spínač:

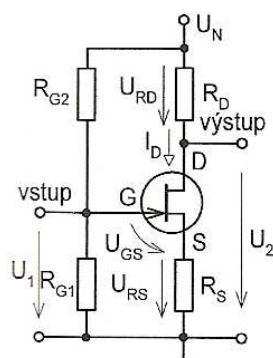


Obr. 4.2.8 Spínač MOSFET

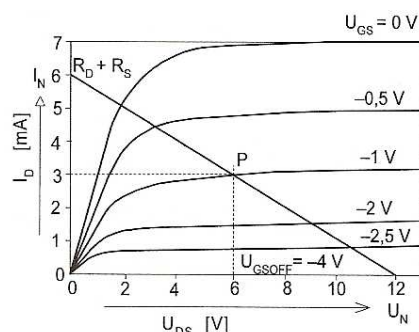
Tranzistory řízené elektrickým polem mají ve funkci spínacího prvku řadu výhod:

- umožňují spínat signály mající kladnou i zápornou polaritu napětí
- izolované hradlo umožňuje téměř dokonalé oddělení řídicího obvodu od spínacího
- neprojevuje se u nich nutnost zotavení, při otevírání nebo zavírání tranzistoru jako u PN přechodu
- neprojevuje se napěťový posuv způsobený napětím jako na PN přechodu

Unipolární tranzistor jako zesilovač malých signálů:



Obr. 4.2.9 Zapojení



Obr. 4.2.10 Příklad nastavení pracovního bodu

Na obr. 4.2.9 je znázorněno základní schéma zapojení pro nastavení pracovního bodu tranzistoru JFET pomocí odporového děliče v obvodu hradla. Dělič je tvořen rezistory R_{G1} a R_{G2} . Pomocí tohoto děliče nastavíme požadované napětí na hradle JFET. Vzhledem k vysokému vstupnímu odporu tranzistoru při výpočtu napěťového děliče zpravidla uvažujeme nulový proud hradla I_G .

Obr. 4.2.10 znázorňuje příklad volby pracovního bodu, je-li napájecí napětí $U_{CC} = 12 \text{ V}$. Z charakteristiky je zřejmé, že napětí hradla U_{GS} má vůči emitoru zápornou polaritu, přičemž ostatní napětí jsou kladná [7].

Parametry:

Statické provozní parametry:

$r_{DS(on)}$ – Odpor kanálu (mezi emitorem a kolektorem) v sepnutém stavu.

Udává se pro určitou velikost napětí U_{GS} a proud I_D (např. r_{DS}

(on) = $3,3 \Omega$ při $U_{GS} = 5 \text{ V}$ a $I_D = 0,3 \text{ A}$)

$r_{DS(off)}$ – odpor kanálu při zavřeném stavu.

I_{DSS} – kolektorový proud při nulovém napětí hradla

Mezní parametry:

Stejně jako u ostatních polovodičových součástek, je i pracovní oblast unipolárních tranzistorů omezena parametry, při jejichž překročení vzniká nebezpečí zničení tranzistoru.

U_{BRDS} – průrazné napětí mezi kolektorem a emitorem. Při jeho překročení může dojít ke zničení součástky.

$P_{D\ MAX}$ – Maximální ztrátový výkon tranzistoru (závislý na teplotě).

$I_{D\ MAX}$ – Maximální trvalý kolektorový proud (také závislý na teplotě).

4.2.3 Užití unipolárních tranzistorů

Stejně jako bipolární tranzistory, je možné i tranzistory FET využít pro aplikace při zpracování lineárních signálů nebo v dvoustavových aplikacích. **Ve spínacím režimu** je v závislosti na vstupním signálu kanál buď otevřený – má malý odpor, nebo je zavřený – má velký odpor. Tranzistory FET mají ovšem mnohem širší využití v praxi.

Jak už jsme si ukázali, lze unipolární tranzistory vhodným zapojením používat i jako **zesilovač**. Můžeme je také použít jako **napětím řízený rezistor**, protože odpor mezi kolektorem a emitorem je možné v odporové oblasti lineárně měnit řídicím napětím. Ve funkci proměnného rezistoru je možné použít libovolný typ unipolárního tranzistoru.

Protože tranzistory řízené elektrickým polem považujeme také za napětím řízený rezistor, je možné používat FET tranzistory jako **napět'ový dělič**.

4.3 Porovnání bipolárního a unipolárního tranzistoru

Rozdíl mezi bipolárními a unipolárními tranzistory spočívá v tom, že u unipolárních tranzistorů na rozdíl od bipolárních se vedení proudu účastní pouze nosič jedné polarity.

Výhody unipolárních tranzistorů:

- vysoký vstupní odpor ($> 10^9$ až $10^{15} \Omega$);
- malý vlastní šum - výhodnější než u vakuových elektronek nebo bipolárních tranzistorů;
- malé nelineární zkreslení;
- velký odpor kanálu v nepropustném stavu - až $100 \text{ M } \Omega$;
- malý odpor kanálu v sepnutém stavu $< 1 \text{ k } \Omega$,
- výhodné použití v integrovaných obvodech:
 - menší počet výrobních operací (MOS asi 38, bipolární asi 130);
 - menší spotřeba plochy substrátu oproti bipolární technologii;

Nevýhody unipolárních tranzistorů:

- Velký rozptyl prahového (otevíracího) napětí (až několik voltů);
- snadné poškození vstupní elektrody tranzistoru s hradlem izolovaným dielektrikem, z čehož vyplývá obtížnější manipulace při výrobě;
- vyšší cena oproti bipolárním tranzistorům.

Porovnání základních vlastností tranzistorů je uvedeno v tabulce 4.3.1. viz [7]. V tabulce vidíme v prvním bodě porovnání využití plochy. Je zřejmé, že bipolární tranzistor je umístěn na menší ploše, kdežto velikost tranzistoru MOS FET nelze libovolně zmenšovat vzhledem k nutnosti dodržet určité rozměry kanálu.

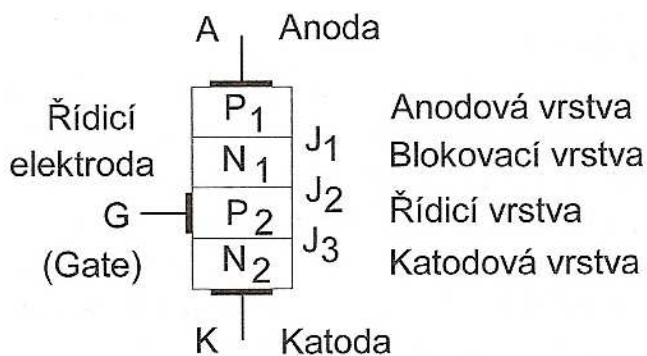
Parametr	Bipolární tranzistor	MOSFET
Využití plochy:	výborné	střední prahové napětí 1V až 5 V i více u výkonových MOSFET
Řídicí napětí: Energie pro řízení:	$< 1 \text{ V (U}_{BE})$ střední	velmi nízká
Rychlost spínání:	rychlý	velmi rychlý
Citlivost na elstat. Pole:	odolný	citlivý
Cena:	střední	dražší

Tabulka 4.3.1 porovnání tranzistorů

5. TYRISTOR

Tyristor je obecně používaný název pro polovodičové bipolární spínací součástku, která se vyrábí především z křemíku.

Podle [7] má tyristor čtyřvrstvou strukturu. Jeho čtyři oblasti vytvářejí sériovou kombinaci tří navazujících přechodů PN *obr. 5.1*. Jedna z vnitřních oblastí (P) je vyvedena. Nazývá se řídicí elektroda a tyristor s vyvedenou oblastí P se nazývá tyristor PNPN. (kdyby měl jako řídicí elektrodu vyvedenu oblast N je označován jako tyristor NPNP). Vnější vrstva P je anodou, a druhá vnější vrstva N katodou tyristoru. Těmito elektrodami po sepnutí prochází výstupní proud, jehož velikost může podle typu tyristoru dosahovat až stovek ampérů.



Obr. 5.1 Vrstvy a přechody tyristoru

Jak také vidíme na obrázku 5.1 tyristor má tři elektrody a tři PN přechody:

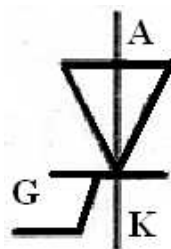
Elektrody:

- anodu **A**
- katodu **K**
- řídicí elektrodu (hradlo) **G**

Přechody:

- J1** = závěrný přechod
- J2** = blokovací přechod
- J3** = vstřikovací přechod

Schematická značka tyristoru:



Obr. 5.2 schematická značka tyristoru

Tyristor se do vodivého stavu uvádí přivedením řídicího impulsu na řídicí elektrodu, nebo zvýšením napětí mezi anodou a katodou – tento způsob je ale nežádoucí.

5.1 Princip funkce tyristoru

Spínání:

Tyristor je bipolární součástka. Při sepnutí se vyznačuje malým napětím U_T mezi anodou a katodou. Rychlost spínání ovlivňuje konstrukce systému PNPN a charakter zátěže.

1) Spínání proudovým impulzem do řídicí elektrody

Tento způsob je u tyristorů nejběžnější. Malým proudem řídicí elektrody je možné ovládat činnost tyristoru. Malým vstupním výkonem převedeme tyristor z vypnutého do sepnutého stavu. Tyristor zůstane v sepnutém stavu i po ukončení impulsu přivedené na jeho hradlo. Čím je proud řídicí elektrody větší, tím při menším napětí U_{AK} tyristor sepne. Tyristory jsou vyráběny tak, aby byly sepnuty malým proudem I_G do řídicí elektrody.

2) Spínání tyristoru spínacím napětím

Je-li řídicí elektroda odpojena a na anodě je kladné napětí, je tyristor v blokovací oblasti a anodový proud je zanedbatelný. Jsou otevřené přechody J1 a J3, přechod J2 zůstane uzavřen. Odpor mezi A a K je několik $M\Omega$ a proud mezi nimi protékající $I_T = 0$. Tento způsob spínání je těžko ovladatelný, v praxi se mu snažíme vyhnout.

3) Sepnutí kapacitním proudem

Přechody PN se vyznačují kapacitami. Jestliže je mezi anodu a katodu tyristoru přiveden strmý napěťový průběh, dojde v blokovacím přechodu ke vzniku kapacitního proudu, který způsobí sepnutí tyristoru. Toto spínání je rychlejší než spínání proudem

do řídicí elektrody. Ve většině aplikací je ale nežádoucí. Velmi rychlý nárůst anodového napětí U_{AK} , resp. proudu, může způsobit ve středu destičky místní přetížení. Tento způsob sepnutí může tedy být pro tyristor nebezpečný.

Udržení tyristoru v sepnutém stavu

Aby tyristor zůstal v sepnutém stavu, musí jím protékat dostatečně velký anodový proud I_A . Minimální velikost tohoto proudu, při které zůstane tyristor v sepnutém stavu, je přídržný proud I_L (Latching Current), který musí téci tyristorem bezprostředně po sepnutí (*obr.5.3*).

V okamžiku sepnutí je nutné pro udržení sepnutého stavu nechat protékat tyristorem o něco větší proud, než je tomu v případě, když je už tyristor bezpečně sepnutý.

Vypínání:

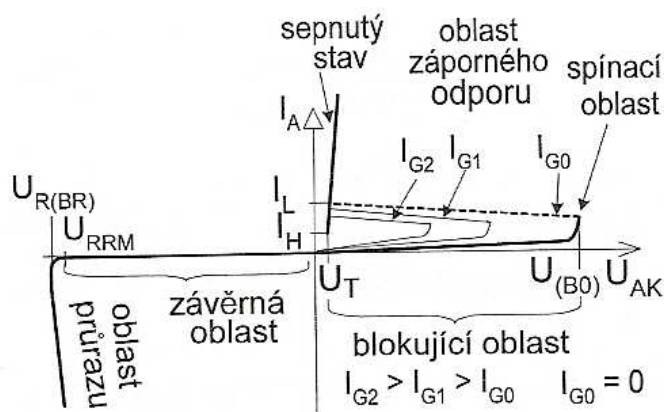
Vypínání tyristorů je uskutečňováno snížením anodového proudu I_A pod vratnou hodnotu I_H , jak vidíme na obrázku volt-ampérové charakteristiky *obr.5.3*.

V obvodu střídavého proudu dochází k vypínání tyristoru automaticky při dostatečném poklesu vstupního napětí a při jeho komutaci. Tyristor může být sepnutý pouze při kladné půlvlně střídavého napětí. V obvodu střídavého proudu je využívána skutečnost, že ke konci kladné půlperiody střídavého napětí dojde s poklesem napětí také k poklesu proudu tyristorem pod přídržnou hodnotu I_H a tyristor se rozpojí.

V obvodech stejnosměrného napětí nedochází k automatické komutaci napětí jako v obvodech střídavých a proto je nutné tuto komutaci zabezpečit pomocí speciálních zapojení. Vypínání je většinou prováděno tak, že se paralelně k tyristoru připojí kondenzátor, jehož polarizace je taková, že po nabití umožní závěrnou polarizaci tyristoru [7].

5.2 Parametry a použití tyristoru

Volt-ampérová charakteristika:



Obr. 5.3 V-A charakteristika tyristoru

Popis volt-ampérové charakteristiky tyristoru:

Blokující oblast je část charakteristiky v propustném směru. Vyznačuje se vysokým odporem - řádově $10^8 \Omega$. Na anodě je kladné napětí U_{AK} , řídicí elektrodou neteče žádný proud I_G . Jestliže do řídicí elektrody přivedeme napětí, zvětší se velikost blokovacího proudu a zkrátí se blokující oblast, takže velikost spínacího napětí se zmenší.

Spínací oblast je v ohybu charakteristiky v okolí spínacího napětí $U_{(B0)}$. V této oblasti dochází k lavinovému průrazu a přepnutí do vodivého stavu.

Vodivá oblast charakterizuje vodivý stav tyristoru. Je charakterizována velmi malým odporem, procházející proud je omezen vnější připojenou zátěží.

Závěrná oblast je podobná závěrné oblasti klasické polovodičové diody. V závěrné oblasti je polarita napětí na přechodech J_1 a J_2 v závěrném směru, tyristor vykazuje velký odpor a teče jím nepatrný závěrný proud I_R . Teče-li však při polarizaci tyristoru v závěrném směru řídicí proud I_G , vzrůstá velikost závěrného proudu.

Parametry pro závěrnou oblast:

$U_{R(BR)}$ - napětí přiložené na tyristor v závěrném směru, při kterém přechází závěrná oblast do oblasti průrazu. Tyristor je možné snadno zničit.

U_R - typové provozní napětí, při kterém je možné tyristor v závěrném směru trvale zatěžovat.

U_{RRM} - opakovatelné špičkové napětí v závěrném směru. Tato hodnota platí pro všechny provozní teploty.

I_R - závěrný klidový proud, který protéká tyristorem, je-li mezi katodou a anodou tyristoru provozní závěrné napětí U_R .

$U_{(BO)}$ - spínací napětí v propustném směru, po jehož dosažení přejde tyristor do vodivého stavu, proud hradla je nulový.

U_D - stejnosměrné blokovací napětí je napětí vztažené k blokující oblasti V-A charakteristiky tyristoru.

U_T - stejnosměrné napětí mezi anodou a katodou sepnutého tyristoru. Hodnota uváděná v katalogu je měřena v pulzním režimu při teplotě 25 stupňů celsia.

$P_{G(AV)}$ - střední povolený ztrátový výkon hradla.

Použití:

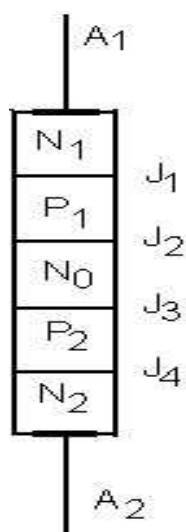
Tyristor se používá pro bezeztrátovou regulaci výkonu. Jeho použití je zejména vhodné v obvodech střídavého napětí, neboť každý průchod napětí nulou automaticky vypne tyristor a ten čeká na další zapnutí. Jediné, co je zapotřebí k regulaci výkonu pomocí tyristoru, je zařízení, které "vyrobí" spouštěcí puls do řídicí elektrody tyristoru ve vhodné fázi periody střídavého napětí.

Tyristorová regulace výkonu je značně rozšířená. Jde například o regulaci svitu žárovek, vrtačky s regulací otáček, svářečky, regulace výkonu v tyristorových trolejbusích, v moderních tramvajích nebo v elektrických lokomotivách.

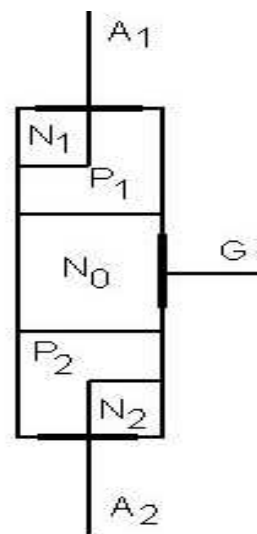
6. TRIAK

Název triaku je odvozen z anglického označení **TRI**ode **Al**ternating **C**urrent **S**witch. Tuto součástku používáme pro řízení výkonu zátěží, napájených střídavým proudem, v obou půlperiodách napětí.

Z obrázku 6.1 vidíme, že triak je pětivrstvá součástka. Na obr. 6.1 a) jsou naznačeny 4 PN přechody a na obrázku 6.1 b) je skutečný princip struktury.

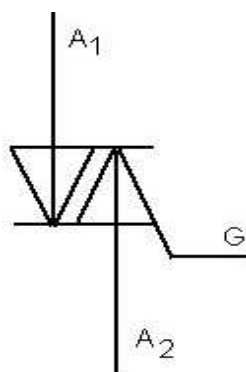


Obr. 6.1 a) Přechody PN v triaku



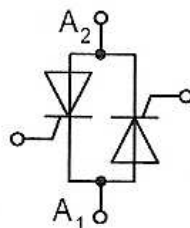
Obr. 6.1. b) Princip struktury

Triak má, stejně jako tyristor tři elektrody – dvě anody A_1 a A_2 a řídící elektrodu G .



Obr. 6.2 Schematická značka triaku

Triak se chová jako dva antiparalelně (paralelně proti sobě) zapojené tyristory *obr. 6.3*, tak aby byly schopny spínat každý v jedné půlce střídavého napětí.



Obr. 6.3 Antiparalelní tyristor

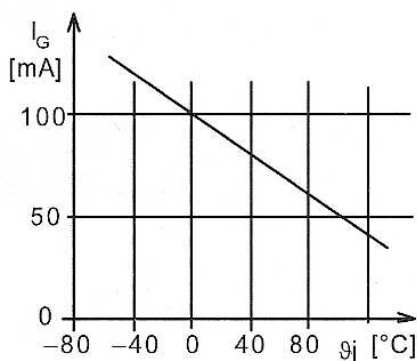
Výhodou této součástky je, že ji lze řídit jak kladným tak i záporným řídicím napětím, takže ji můžeme použít pro spínání střídavého napětí. Triak řídíme proudem libovolné polarity přivedeným na řídicí elektrodu G.

Protože triakem teče proud v obou půlperiodách střídavého napětí, je nutné, aby měl větší chladič než tyristor.

6.1 Spínání a vypínání triaku

Spínání triaků:

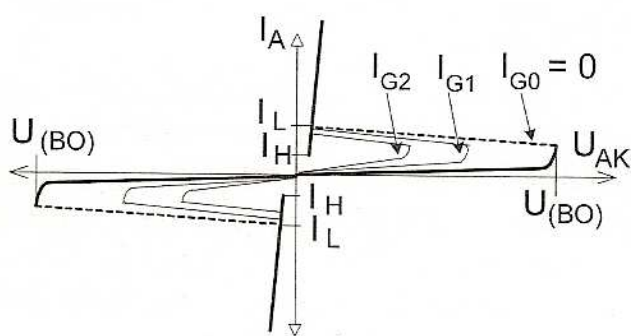
Spínání triaků se uskutečňuje stejnými způsoby jako spínání tyristorů. Nejčastěji je spínání uskutečňováno pomocí řídicí elektrody. Vliv velikosti proudu hradla I_G na spínání je stejný jako u tyristoru. Stejně jako u tyristoru, je okamžik sepnutí triaku závislý nejen na hodnotách U_G a I_G , ale také na teplotě přechodů. Na obrázku *obr. 6.1.1* je teplotní závislost znázorněná.



Obr. 6.1.1 Teplotní závislost řídicího proudu

Votl-ampérové charakteristiky zobrazené na obr. 6.1.2 ukazují, že jde o symetricky řízený spínač, avšak anody A_1 a A_2 se nesmějí při zapojení triaku do obvodu navzájem prohodit. Mohlo by dojít ke zničení triaku.

Struktura triaku je poměrně složitá. Umožňuje spínání triaku při obou polaritách anodového napětí i řídicího napětí U_G , tedy ve všech čtyřech kvadrantech.



Obr. 6.1.2 Volt – ampérová charakteristika triaku

Vypínání triaků:

Protože jsou triaky používány téměř výhradně pro spínání střídavých proudů, je jejich vypínání zajišťováno, stejně jako u tyristorů, přirozenou komutací. To způsobí pokles proudu I_A pod hodnotu I_H a triak se rozpojí.

Vzhledem k poměrně složité struktuře má triak oproti tyristoru menší odolnost: proti rychlému nárůstu spínaného napětí a strmosti zmenšení proudu kterému dochází při vypínání. Čím je rychlejší změna proudu, tím více zůstává v okamžiku vypnutí triaku nerekombinovaných elektrických nábojů. Čím je větší nárůst spínaného napětí, tím je větší pravděpodobnost, že budou některé z těchto nosičů náboje vytvářet proud hradla.

Při odporové zátěži je proud procházející triakem ve fázi s napětím a při vypnutí triaku prochází napětí nulou zároveň s proudem. Pokud má zátěž indukční charakter, kdy

dochází k fázovému zpoždění proudu za napětím, vzniká nebezpečí samozapnutí. Při průchodu proudu nulou je napětí maximální, proto při vypnutí triaku v okamžiku, kdy proud je nulový, dojde k prudké změně napětí na triaku, takže rychlost změny napětí je velká a dojde ke spínání kapacitním proudem. Přitom může dojít k jeho zničení.

6.2 Parametry a použití triaku

Parametry triaku jsou symetrické pro obě polarity anodového napětí a stejné jako u tyristoru v propustném směru.

Dynamické parametry často neudávají, protože triak je určen pro spínací aplikace v obvodech střídavého proudu 50 Hz. Kmitočtový rozsah, ve kterém může triak pracovat, je mnohem menší než u tyristorů a omezuje se prakticky na oblast kmitočtů elektrorozvodné napájecí sítě 50 Hz, nejvyšší provozní kmitočet se pohybuje ve stovkách hertzů.

Použití:

Použití triaku je téměř stejné jako v případě tyristoru. Využití opět nalezneme především v obvodech střídavého napětí. Používá se pro spínání střídavých napětí, například v moderních žehličkách, také pro regulaci výkonu v různých spotřebičích atd.

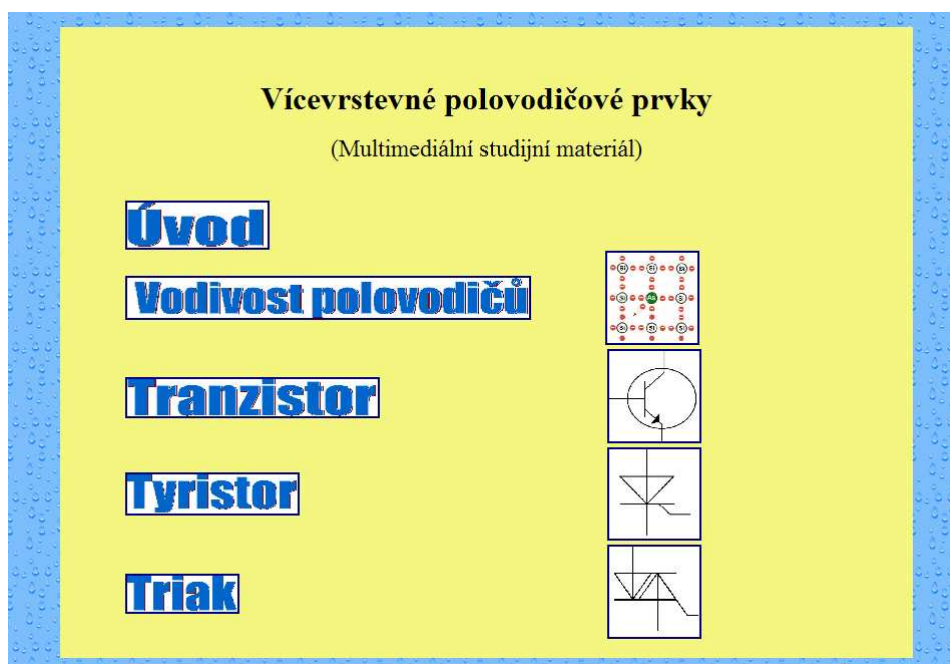
7. TVORBA WWW STRÁNEK V JAZYKU XHTML

Nedílná součást této práce, je vytvoření multimediálního studijního materiálu ve formě www stránek. Tyto stránky jsou vytvořeny pomocí jazyku XHTML a hlavním zdrojem informací mi sloužila příručka [6].

Zdrojový kód stránky byl vytvořen v programu Golden HTML Editor. Tento program se mi zdá velmi přehledný a srozumitelný, i pro méně zkušené webmastery. Jediný nedostatek se mi jevil s ukončeními některých nepárových elementů, jako je například odřádkování elementem `<br />`, vkládání obrázků `<img />` a dalších velmi používaných elementů, které program nedokáže sám správně napsat a musí se neustále opravovat. Jinak jsem byl s tímto editorem velmi spokojený a v jeho příjemném prostředí se mi dobře www stránky vytvářely.

Jako kontrolu jsem používal CSE HTML Validator, který nám umožnil rychlou kontrolu a opravu našich HTML dokumentů, protože generuje seznam všech syntaktických chyb, které nalezne.

Jako příloha k bakalářské práci bude vložen studijní materiál ve formě www stránek. Tyto stránky spustíme pomocí souboru **index**. Na obrázku 7.1 je ukázka úvodní stránky, kde vlevo vidíme hlavní menu kapitol. Po kliknutí na název kapitoly, či obrázek s ní související, se dostaneme hypertextovým odkazem na požadovanou kapitolu.



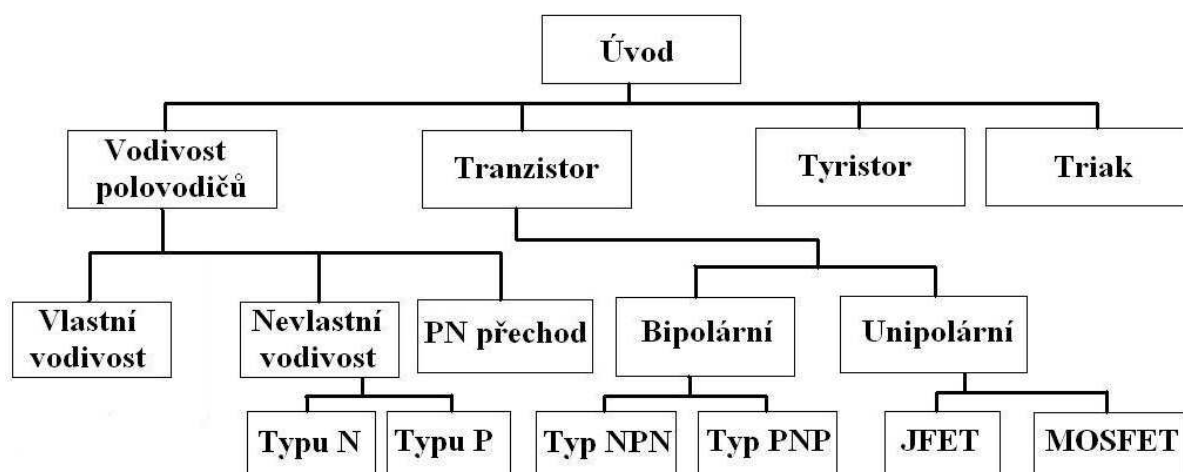
Obr. 7.1 Ukázka úvodní stránky www práce

Na další ukázce (obr. 7.2) vidíme vybranou kapitolu Tranzistor. Vlevo je opět patrné výrazné menu, které nás provází již na všech kapitolách a jejich stránkách. V textu jsou umístěny hypertextové odkazy označené modrou barvou, které nám otevírají nové podkapitoly. Pro snadné procházení stránkami, jsou ve spodní části u každé stránky odkazy pro návrat zpět.



Obr. 7.2 Ukázka kapitoly Tranzistor z www práce

Uspořádání jednotlivých kapitol je zobrazené ve struktuře www stránek viz obrázek 7.3



Obr. 7.3 Struktura www stránek

8. Závěr

Polovodiče, jak už jsme si řekli, se začali rozmáhat ve čtyřicátých letech dvacátého století. Tehdy to byly jen prvotní náznaky a již tehdy začaly polovodiče nahrazovat velké a nevyhovující elektronky. Brzy se však začala technologie polovodičů rapidně zlepšovat a součástky byly stále menší, výkonnější, spolehlivější a po nasycení trhu hlavně lacinější. Proto nebylo divu, že již za pár let elektronky téměř z běžného života vymizely. Ovšem ani dnes se vývoj nezastavuje a polovodiče se neustále zdokonalují. Především integrované obvody, které obsahují polovodičové tranzistory, dnes nalezneme prakticky ve všech elektronických přístrojích.

Ačkoliv od objevení a prvního využití polovodičů uběhlo již mnoho let, myslím si, že tento objev byl velikým milníkem v elektronice a my jen můžeme doufat, že ještě budeme u toho, až bude tato technologie překonána a nahrazena.

Tato bakalářská práce a elektronický studijní materiál ve formátu xhtml, by měly sloužit především studentům v oborech s elektrotechnickým zaměřením, jako velmi přehledná pomůcka k učivu elektroniky, zejména v polovodičové oblasti. Na zkoušku jsem ji již poskytl některým mým kolegům z oboru Měřicí a výpočetní technika, kteří práci s úspěchem využívají ke studování a přípravě na státní závěrečnou zkoušku z elektroniky a elektrotechniky.

Studijní materiál ve formě www stránek bude k dispozici v systému eAMOS, kde si ji za účelem vzdělávání po internetu bude moci každý prohlédnout a nastudovat. Práce není vyčerpávající, toto téma je totiž velice rozsáhlé a bude ji nutno ještě rozšířit o navazující kapitoly jako jsou integrované obvody, klopné obvody, operační zesilovače atd.

9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Bém, J. a kolektiv: Československé polovodičové součástky 2, Praha 1979, SNTL
- [2] Mařátko, J.: Elektronika, Praha 1997, IDEA SERVIS
- [3] Dvořáček, J., Kubec A., Velický J.: Elektronika a sdělovací technika, Praha 1979, SNTL
- [4] Wright, M.: Jak dnes věci fungují, Mladé léta Bratislava, 2001
- [5] Salava, T., Holsinger E.: Jak pracují multimédia. Grada Praha, 1994
- [6] Pexa, P.: Jazyky XHTML * CSS * DHTML * WML, České Budějovice 2006, Kopp
- [7] Doleček, J.: Polovodičové prvky a elektronky, Praha 2005, Technická literatura BEN
- [8] Holub, P., Zíka, J.: Praktická zapojení polovodičových diod a tyristorů, Praha 1977, SNTL
- [9] Lapáček, J.: Tvorba WWW stránek jednoduše, Praha 2003, Computer Press
- [10] Písek, S.: HTML - Tvorba jednoduchých internetových stránek, Praha 2006, Grada
- [11] Frohn, M. a kol.: Polovodičové součástky a základní zapojení, Praha 2006, Technická literatura BEN
- [12] Šavel, J.: Elektrotechnologie, Praha 2005, Technická literatura BEN
- [13] Pelikán, L.: Elektronické prvky, skriptum ČVUT Praha 1981

Internetové odkazy:

- [14] <http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/elektross> - elektřina a magnetismus
- [15] <http://cs.wikipedia.org> - internetová encyklopedie
- [16] <http://tranzistor.navajo.cz> - otevřená encyklopedie
- [17] <http://www.sousezm.edu.sk/studium/elektronika/>
- [18] <http://sweb.cz/skriptum/elektro/>