

Vážení zákazníci,

dovolujeme si Vás upozornit, že na tuto ukázkou knihy se vztahují autorská práva, tzv. copyright.

To znamená, že ukáзка má sloužit výhradně pro osobní potřebu potenciálního kupujícího (aby čtenář viděl, jakým způsobem je titul zpracován a mohl se také podle tohoto, jako jednoho z parametrů, rozhodnout, zda titul koupí či ne).

Z toho vyplývá, že není dovoleno tuto ukázkou jakýmkoliv způsobem dále šířit, veřejně či neveřejně např. umístováním na datová média, na jiné internetové stránky (ani prostřednictvím odkazů) apod.

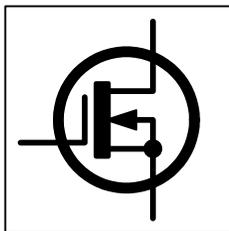
redakce nakladatelství BEN – technická literatura
redakce@ben.cz



Kapitola 3

UNIPOLÁRNÍ TRANZISTORY

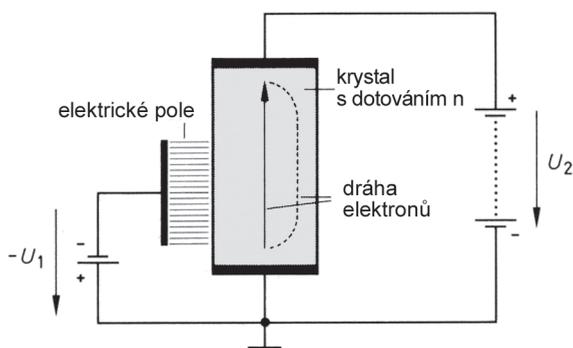
3.1	Obecný popis	186
3.2	Unipolární tranzistory s přechodovým hradlem (JFET)	189
3.3	MOSFET	204
3.4	MOSFET zvláštní konstrukce	215
3.5	Nastavení pracovního bodu	220
3.6	Základní zapojení FET	224
3.7	Příklady použití	232



3 UNIPOLÁRNÍ TRANZISTORY

3.1 Obecný popis

Unipolární tranzistory se obvykle označují zkratkou FET (*Field-Effect-Transistor*). Proud je u nich řízen elektrickým polem, které je kolmé ke směru protékajícího proudu. Tato možnost byla sice objevena již v roce 1928, k praktickému využití došlo až po vývoji vhodných materiálů. Na obr. 3.1 je základní princip činnosti FET.



Obr. 3.1 Základní princip činnosti FET

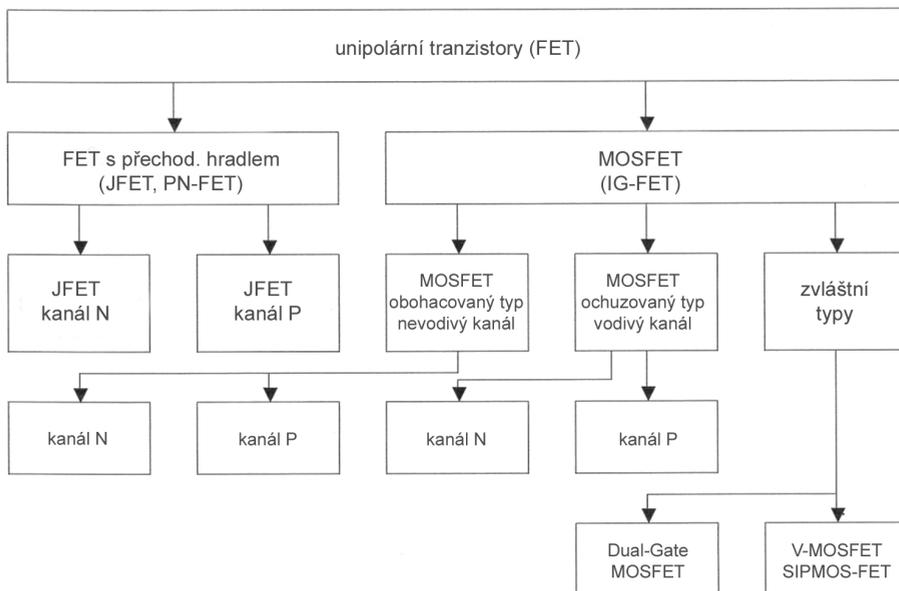
Zatímco u bipolárních tranzistorů protéká hlavní proud vždy přes rozhraní mezi polovodičovými materiály s dotací n a s dotací p, v unipolárním tranzistoru putují náboje jen jedním typem materiálu, podle provedení buď n, nebo p. Jestliže dráha proudu probíhá v materiálu s dotací n, mluvíme o typu s kanálem N (N-kanálem). U typu s kanálem P prochází proud naopak materiálem s vodivostí p. Podle toho proud u typu s kanálem P je zprostředkován pouze děrami, u typu s kanálem N pouze elektrony. Z toho důvodu jsou prvky FET označovány jako unipolární tranzistory.

Dnes již existují nejrůznější druhy unipolárních tranzistorů. Zásadní dělení však musíme vést mezi dvěma skupinami, a to mezi typy FET s přechodovým hradlem (hradlem, izolovaným závěrně polarizovaným přechodem PN) a MOS-FET (MOS = *metal-oxide-semiconductor*). FET se závěrnou vrstvou jsou nazývány také jako JFET nebo PN-FET. U MOSFET můžeme také najít označení IG-FET (IG = *insulated gate*). Na obr. 3.2 je přehled různých typů unipolárních tranzistorů.

FET s přechodovým hradlem se dělí na typy s kanálem N a s kanálem P. MOSFET se dělí na typy, které bez vnějšího napětí vedou a které bez vnějšího napětí nevedou. Ty se

opět dělí na typy s kanálem N a s kanálem P. Kromě toho se vyskytují také typy se zvláštním konstrukčním provedením.

Pro označování různých typů a provedení FET nebylo vytvořeno žádné schéma. Také jejich pouzdra se neliší od bipolárních tranzistorů.



Obr. 3.2 Přehled různých typů unipolárních tranzistorů.

Až na některá zvláštní provedení mají unipolární tranzistory tři vývody. Označují se jako Source (angl. *source* = zdroj, zřídlo), Gate (angl. *gate* = brána, hradlo) a Drain (angl. *drain* = odtok, výpust'). Elektroda Source (S) odpovídá emitoru, elektroda Gate (G) bázi a elektroda Drain (D) kolektoru bipolárního tranzistoru. V českých textech bývá zachováno označení hradla (G), elektroda S se označuje jako emitor (E) a elektroda drain jako kolektor (C). Zde bude používáno originální označení.

Pro přehled je užitečné uvést základní pojmy anglické, české a německé terminologie:

anglicky	česky	německy
junction FET	FET s přechodovým hradlem	Sperschicht-FET
MOSFET, depletion type D-type	MOSFET s vodivým kanálem, ochuzovaný typ, s technologicky vytvořeným kanálem	Selbstleitende MOS-FETs Verarmungstyp
MOSFET, enhancement type E-type	MOSFET s nevodivým kanálem, obohacovaný typ, s indukovaným kanálem	Selbstsperrende MOS-FETs Anreicherungstyp

označení	kanál N	kanál P
FET s přechodovým hradlem (JFET)		
MOSFET s vodivým kanálem (depletion type)		
MOSFET s nevodivým kanálem (enhancement type)		

Obr. 3.3 Schematické značky unipolárních tranzistorů

Pro jednotlivé typy unipolárních tranzistorů se používají zvláštní schematické značky souhrnně uvedené na obr. 3.3.

Charakteristickou vlastností všech unipolárních tranzistorů je velmi vysoký vstupní odpor. U JFET s přechodovým hradlem je asi $10^9 \Omega$, u MOSFET dokonce až $10^{15} \Omega$. U unipolárních tranzistorů je řízení proudu prováděno elektrickým polem při téměř nulovém výkonu. Z toho vyplývají mnohé výhody při jejich používání. Technika MOS se např. stále více používá v obvodech s vysokou hustotou integrace.

Podrobnější popis technických vlastností unipolárních tranzistorů uvádějí výrobci v katalogových listech, stejně jako u ostatních elektronických součástí. Katalogové listy obsahují část s nejdůležitějšími mezními hodnotami, část s charakteristickými hodnotami a typické charakteristiky. Protože řídicí výkon je většinou zcela zanedbatelný, je počet charakteristik menší než u bipolárních tranzistorů.

Také u unipolárních tranzistorů existují teplotní závislosti charakteristických hodnot, na něž je nutné v praktickém používání brát ohled. Dále je třeba počítat se ztrátovým výkonem. Ten se mění na teplo, které musí být odvedeno do okolního vzduchu. Souvislosti a vztahy jsou stejné jako u bipolárních tranzistorů.

Kromě standardních provedení tranzistorů s přechodovým hradlem a MOSFET existují ve skupině MOSFET zvláštní typy, které jsou výsledkem dalšího vývoje. Jsou to Dual-Gate MOSFET, V-MOSFET a SIPMOS-FET. Dual-Gate MOSFET mají dva řídicí vstupy, které lze použít k navzájem nezávislému řízení dvěma vstupními signály. Tak lze například postavit zesilovač, jehož zesílení je možné v širokém rozmezí měnit. Typy V-MOSFET a SIPMOS-FET byly vyvinuty pro zesilovače nebo pro spínání velkého výkonu až 5 kW. Výhodou přitom je nepatrný řídicí výkon.

Také u unipolárních tranzistorů je nutné nastavit a stabilizovat pracovní bod.

Protože unipolární tranzistory mají tři vývody, je možné také je používat ve třech základních zapojeních. Jsou to zapojení se společnou elektrodou source, drain a gate (SS, SD, SG, angl. CS, CD, CG = *common source, drain, gate*). Název vyjadřuje, která elektroda je společná pro vstupní a výstupní signál. Zapojení se společnou elektrodou source odpovídá zapojení se společným emitorem a je nejčastěji používaným zapojením. Zapojení se společnou elektrodou drain lze přirovnat k zapojení se společným

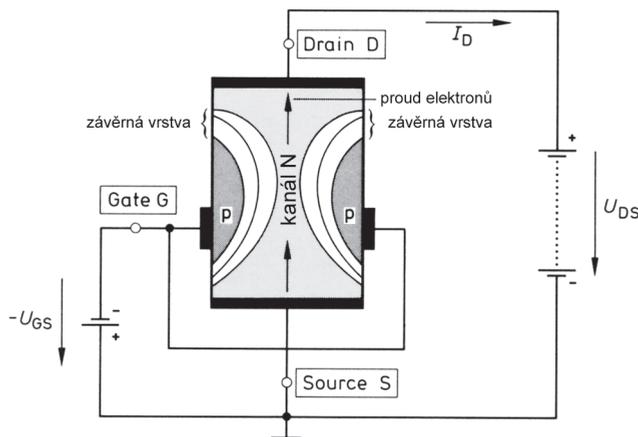
kolektorem a je používáno hlavně pro transformaci impedance. Zapojení se společnou elektrodou gate vykazuje obdobné vlastnosti jako zapojení se společnou bází. Jeho použití se omezuje na speciální případy.

Unipolární tranzistory se jako diskrétní součásti používají především ve stejnosměrných zesilovačích, ve zdrojích konstantního proudu a ve střídavých zesilovačích. Použití ve střídavých zesilovačích se přitom omezuje především na předzesilovače v nízkofrekvenčním a vysokofrekvenčním pásmu, také jako první stupně vícestupňových zesilovačů. Použití unipolárních tranzistorů je výhodné v analogových integrovaných obvodech, nejvýznamnější oblastí použití je však digitální technika.

3.2 Unipolární tranzistory s přechodovým hradlem (JFET)

3.2.1 Provedení a funkce

Činnost unipolárního tranzistoru s přechodovým hradlem lze vysvětlit podle obr. 3.4. Je vytvořen z tyčky polovodičového materiálu s vodivostí n nebo p. Na jejich koncích jsou umístěny kontaktní plošky, které ve styku s polovodičem netvoří závěrnou vrstvu. Na obr. 3.4 je řez tranzistorem typu JFET s kanálem N.



Obr. 3.4 Řez tranzistorem typu JFET s kanálem N

Jako výchozí materiál unipolárního tranzistoru s kanálem N je použit křemík s vodivostí n. Na delších stranách tyčky jsou oblasti s vodivostí p, vytvořené dodatečným legováním, které jsou navzájem vodivě spojeny. Tím vzniknou proti sobě dva přechody PN. Přívod k obou oblastem p je zde označen jako Gate (G). Tyto přechody jsou důvodem k označení těchto unipolárních tranzistorů jako PN-FET nebo JFET (Junction FET).

Jestliže se nyní na vývody D a S přiloží napětí U_{DS} , bude oblast křemíkové tyčky s vodivostí n protékat proud elektronů I_D . Při polaritě napětí, uvedené na obr. 3.4, putují

elektrony od přívodu source (S) k přívodu drain (D) oblastí křemíku s vodivostí n, označenou zde jako kanál N.

Přiložením záporného napětí $-U_{GS}$ mezi gate a source pole obr. 3.4 se oba přechody PN dostávají do závěrného stavu. V křemíku s vodivostí n a s vodivostí p se přitom vytvoří závěrné vrstvy, takže přes tyto přechody PN, které jsou pólovány v závěrném směru, nemůže protékat proud.

Závěrné vrstvy se však rozšíří směrem do kanálu a tím se sníží průřez, kterým může protékat proud. Průběh takto vytvořených závěrných oblastí je ovlivněn úbytkem napětí ve směru proudových čar uvnitř kanálu. V blízkosti elektrody source je dráha proudu nejširší, ve směru k elektrodě drain se zužuje.

Čím větší je záporné napětí $-U_{GS}$ mezi gate a source, tím širší jsou závěrné oblasti v kanálu a v důsledku toho se zužuje průřez, kterým může v kanálu protékat proud. Velikost odporu R_{DS} , který je v cestě proudu mezi elektrodami source a drain, závisí tedy u JFET s kanálem N na velikosti závěrného napětí $-U_{GS}$. Proto je možné záporným napětím na elektrodě G měnit v širokých mezích odpor dráhy proudu. Když se napětí $-U_{GS}$ zvětší tak, že se závěrné oblasti dotknou, je kanál úplně zaškrcen a proud je přerušen. Proud I_D klesne k nule. Protože přechodem PN teče v závěrném směru jen velmi malý zbytkový proud, nevyžaduje řízení proudu mezi elektrodami D a S napětím $-U_{GS}$ prakticky žádný výkon.

3.2.2 Označení a schematické značky

Protože se unipolární tranzistory svými vlastnostmi a chováním výrazně liší od bipolárních tranzistorů, Používají se pro ně nejen jiné schematické značky, ale také jiné označení elektrod. Na obr. 3.5 je uvedeno srovnání JFET s kanálem N a s kanálem P.

Přívod s označením S dodává (emituje) nosiče náboje, proto je označen jako Source (angl. *source* = zdroj, zřídlo). Elektroda s označením D tyto nosič zachycuje a odvádí, proto má název Drain (angl. *drain* = odtok, výpust'). Pomocí přívodu G se proud nosičů náboje řídí. Nese tedy označení Gate (angl. *gate* = brána, hradlo).

JFET s kanálem N pracuje s kladným napětím U_{DS} a se záporným napětím $-U_{GS}$. Jako nosiče proudu slouží elektrony. U JFET s kanálem P vedou proud díry, proto pracuje se záporným napětím $-U_{DS}$ a s kladným napětím U_{GS} .

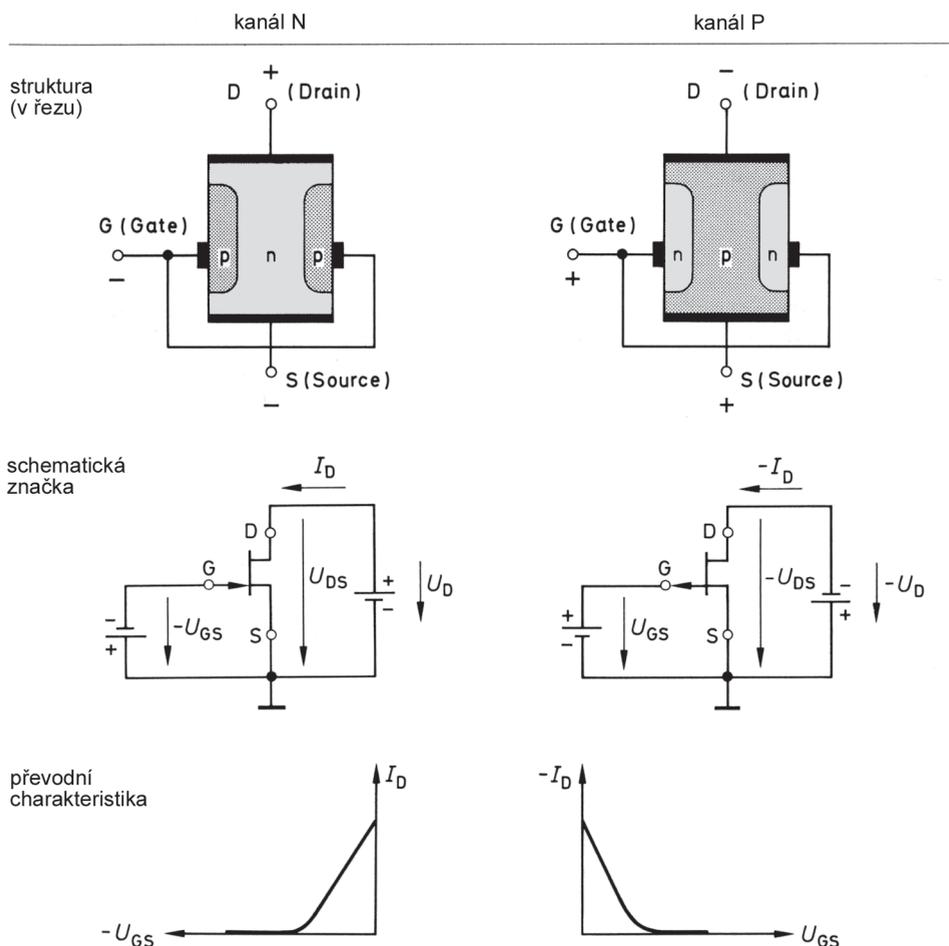
Na obr. 3.5 jsou také normalizované schematické značky obou typů JFET. Šipka v přívodu hradla (gate) označuje vždy směr přechodu od vrstvy p k vrstvě n. Kromě toho jsou zde také uvedena napětí U_{DS} a U_{GS} , potřebná pro normální provoz tranzistoru. Také jsou zde uvedeny převodní charakteristiky pro oba typy. V obou případech se při zvětšování hodnoty napětí U_{GS} a $-U_{GS}$ proud I_D zmenšuje.

3.2.3 Charakteristiky

3.2.3.1 Převodní charakteristika

Řízení průtoku proudu kanálem je u unipolárních tranzistorů s přechodovým hradlem prováděno změnou závěrného napětí na přechodech PN. Z obr. 3.4 je zřejmé, že se vyprázdňené zóny v kanálu nerozšiřují rovnoměrně. Ve směru k elektrodě drain dochází

FET s přechodovým hradlem (JFET)



Obr. 3.5 Řezy strukturou, schematické značky a převodní charakteristiky pro JFET s kanálem N a P

ke klínovitému zúžení, protože se rozdíl napětí mezi elektrodami G a D postupně zvyšuje. Když se napětí mezi gate a source $-U_{GS}$ zvýší natolik, že se závěrné oblasti dotknou, je kanál zaškracen a tím je prakticky zavřen. Napětí, při kterém k tomuto jevu dojde, je označováno jako prahové napětí U_P , anglicky *pinch-off-voltage* (napětí pro zaškracení).

Závislost proudu elektrodou drain I_D na napětí gate–source $-U_{GS}$ může být stanovena v zapojení podle obr. 3.6. Při vyšetřování vlastností typu s kanálem P postačí pouze změnit polaritu obou napětí.