

8.4 Tranzistory

Tranzistory¹ jsou zesilovací (aktivní) polovodičové prvky. Je možno je dělit na bipolární² a unipolární³ tranzistory (**tabulka 1**) podle toho, zda se na zesilování podílí oba typy nosičů nábojů (vodivostní elektrony a díry), nebo jen jeden typ nosičů.

8.4.1 Bipolární tranzistory

Bipolární tranzistory jsou většinou vyráběny na bázi křemíku. Skládají se ze tří na sobě ležících polovodičových vrstev, tvořených střídavě polovodiči typu P a typu N (**obr. 1**). Podle sledu těchto tří vrstev rozlišujeme typ PNP nebo NPN (**tabulka 2**). Oba tyto typy tranzistorů se chovají vzájemně komplementárně⁴. Jako jednotlivé tranzistory se používají převážně tranzistory typu NPN.

Všechny tři polovodičové vrstvy mají vyvedeny přívody ven. Střední vrstva se nazývá **báze**, vnější vrstvy pak **emitor**⁵ a **kolektor**⁶. Emitor vysílá (emituje) nosiče nábojů a kolektor je přijímá. Na přechodech z N k P-polovodiči se vytvářejí závěrné vrstvy, které jsou u bipolárního tranzistoru dvě.

Pokus 1: Připojte výkonový tranzistor, např. BD 135 a dva ampérmetry na dva zdroje podle **obrázku 2**. Měřte zdrojem G1 proud báze I_B a sledujte změny kolektorového proudu I_C .

Malé změny proudu báze ΔI_B vyvolávají velké změny kolektorového proudu ΔI_C .

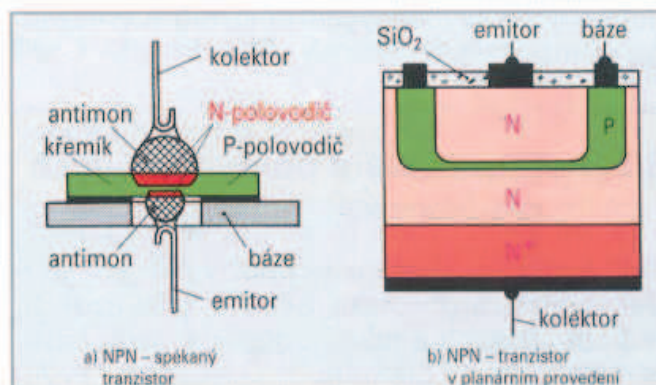
Cesta báze-emitor je při činnosti tranzistoru v propustném směru, přechod báze-kolektor je pólován (nastaven) v závěrném směru (emitorová šipka ve schematické značce tranzistoru udává technický směr proudu).

Malá změna proudu báze I_B způsobí v tranzistoru velkou změnu proudu kolektoru I_C (tranzistor má velké proudové zesílení).

Emitorová oblast je u bipolárního tranzistoru silně dotována, kolektorová oblast je dotována méně. Mimořádně tenká vrstva báze (silná jen několik μm) obsahuje jen malé množství cizích atomů. Teče-li proud báze, přetéká sem z emitoru mnoho nosičů nábojů (např. elektronů v případě NPN-tranzistoru) přes tenkou vrstvu báze. Tato vrstva je jen málo dotována, proto může rekombinovat jen malou část elektronů vlastními dírami. Proto je proud báze jen velmi malý.

Tabulka: Typy tranzistorů

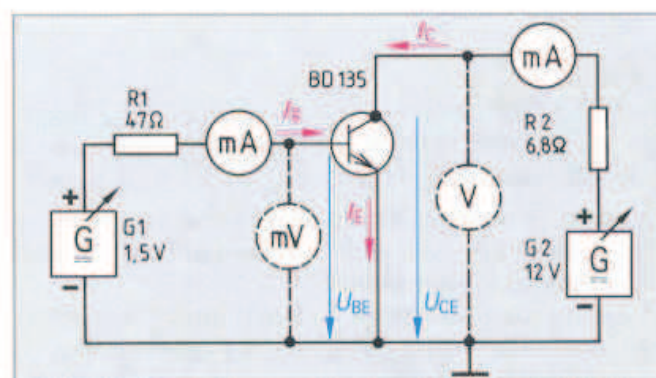
bipolární tranzistory	unipolární tranzistory							
	unipolární tranzistor	FET-tranzistory						
		JFET a MESFET tranzistory		MOSFET-tranzistory				
		P-kanál	N-kanál	indukovaný	zabudovaný	indukovaný	zabudovaný	
NPN	PNP	typ-N	P-kanál	N-kanál	indukovaný	zabudovaný	indukovaný	zabudovaný



Obr. 1 Konstrukce bipolárních tranzistorů

Tabulka 2: Konstrukce a schematické značky bipolárních tranzistorů

typ	pořadí zón	diodový ekvivalent	schematická značka
NPN	N - kolektor P - báze N - emitor		
PNP	P - kolektor N - báze P - emitor		



Obr. 2 Zapojení pro měření charakteristik NPN - tranzistoru (v zapojení se společným emitorem)

¹ ze slovního spojení TRANSfer reSISTOR = změna odporu

² z latinského bis = dva (krát)

³ z latinského unus = jeden

⁴ komplement = doplněk

⁵ emitovat = vysílat

⁶ kolektor = shromažďovač

Většinu nosičů nábojů tlačí elektrické pole závěrné vrstvy báze-kolektor do kolektoru (obr. 1). Tak vzniká velký kolektorový proud, který je 10-krát až 500-krát větší než proud báze. Poměr mezi proudem kolektoru a odpovídajícím proudem báze nazýváme stejnosměrné zesílení B .

V bipolárním tranzistoru je kolektorový proud řízen proudem báze. K řízení je zapotřebí jen malý výkon.

Je-li napětí báze emitor $U_{BE} = 0$ V nebo menší než mezni hodnota asi 0,4 V, je tranzistor zavřený. Teče jen zanedbatelný závěrný proud, který je způsoben páry nábojů vzniklými v závěrné vrstvě přechodu báze kolektor působením tepla.

Pokus 2: Uvažujte charakteristiky tranzistoru, např. BD 135 (zapojení na obr., str. 172) a sice charakteristiku $I_C = f(U_{CE})$ pro různé proudy báze a charakteristiku $I_B = f(U_{BE})$ a $I_C = f(I_B)$ vždy pro pevné napětí U_{CE} , např. pro $U_{CE} = 6$ V.

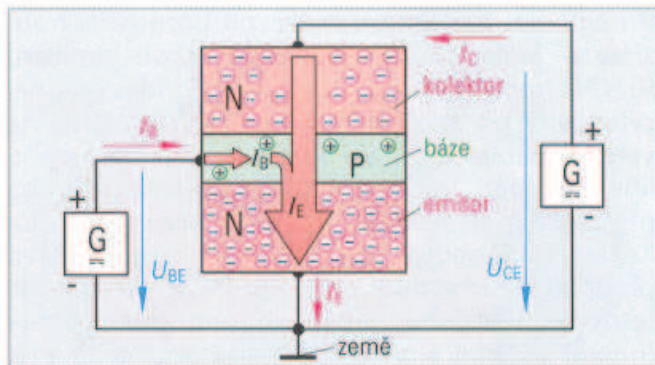
Soustava charakteristik $I_C(U_{CE})$ ukazuje výstupní charakteristiky pro pevné proudy báze. Charakteristika $I_B(U_{BE})$ je charakteristikou diody báze-emitor. Funkční závislost $I_C(I_B)$ dává informaci o proudovém zesílení.

Podle zvoleného zapojení rozlišujeme charakteristiky tranzistoru (obr. 2) vstupní (obvod báze-emitor): $I_B = f(U_{BE})$ a výstupní (obvod kolektor-emitor): $I_C = f(U_{CE})$. Šipky označující směry proudů je třeba zvýraznit, neboť emitorový proud je součtem proudu báze a proudu kolektoru (obr. 1). Orientační šipky napětí jsou dány pólováním napájecích provozních napětí.

Krystal tranzistoru i s vývody je vestavěn v pouzdře (tabulka), které je buď z plastu nebo z kovu.

8.4.2 Nastavení pracovního bodu

Tranzistor se používá jako zesilovač, nebo jako spínač. Nejběžnější zapojení je **zapojení se společným emitorem**. V tomto zapojení je emitor připojen na zem (obr. 1), je tedy společným připojením vstupu i výstupu. Vstupní signál je přiveden na bázi (proti zemi, čili emitoru) a výstupní signál je na kolektoru (proti zemi, čili emitoru). Změny kolektorového proudu způsobené změnami proudu báze se na odporu zátěže mění na změny napětí. V zapojení tranzistoru je napětím kolektor emitor U_{CE} a stejnosměrným předpětím báze-emitor U_{BE} nastaven pracovní bod tranzistoru.

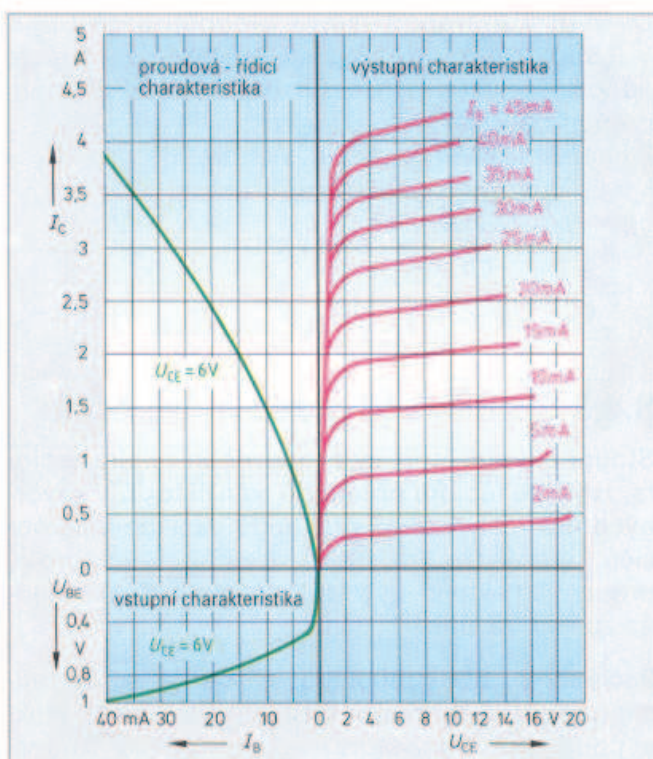


Obr. 1 Proudý v tranzistoru NPN (zapojení se společným emitorem)

B stejnosměrné proudové zesílení
 I_C proud kolektoru
 I_B proud báze
 I_E proud emitoru

$$B = \frac{I_C}{I_B}$$

$$I_E = I_B + I_C$$



Obr. 2 Soubor charakteristik bipolárního tranzistoru

Tabulka: Pouzdra tranzistorů

pohledy	označení	pohledy	označení
	10 A 3 (TO 92)		14 A 3 (TO 220)
	18 A 3 (TO 18)		50 A 3 (TO 50)
	12 A 3 (TO 126)		3 B 2 (TO 3)
			B báze C kolektor E emitor

Při činnosti tranzistoru musí mít báze NPN-tranzistoru stále kladný potenciál proti emitoru (u NPN tranzistoru stále záporný). Střídavý signál přiváděný na bázi proti zemi (emitoru), tj. na vstup zesilovače, může budit vstup jen v rozpětí lineární části vstupní charakteristiky, jinak by mohlo dojít při zesílení ke zkreslení tvaru signálu. Ke splnění tohoto požadavku je třeba nastavit předpětí vstupu (báze proti zemi či emitoru) a na toto stejnosměrné napětí se pak superponuje (přičte) vstupní signál. Předpětí báze nastavujeme buď předřadným odporem z napájení (**obr. 2a**) nebo vstupním děličem (**obr. 2b**). Vstupní dělič je odolnější proti rozptylu parametrů konkrétně použitého tranzistoru i proti kolísání okolní teploty a nastavené předpětí je stabilnější než při nastavení jediným předřadným odporem.

Příklad: Pro tranzistor BCY 59 v emitorovém zapojení (se společným emitorem) při napájení $U_b = 16 \text{ V}$ je třeba nastavit předpětí báze $U_{BE} = 0,62 \text{ V}$ vstupním děličem dle obr. 2b. Určete odpory R_1 a R_2 děliče při povoleném příčném proudu děličem $I_q = 9 \cdot I_B$. Z charakteristik tranzistoru nalezneme pro $U_{BE} = 0,62 \text{ V}$ hodnotu $I_B = 0,2 \text{ mA}$.

$$R_2 = \frac{U_{BE}}{9 \cdot I_B} = \frac{0,62 \text{ V}}{1,8 \text{ mA}} = 0,344 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = \frac{U_b - U_{BE}}{10 \cdot I_B} = \frac{16 \text{ V} - 0,62 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = 7,69 \text{ k}\Omega$$

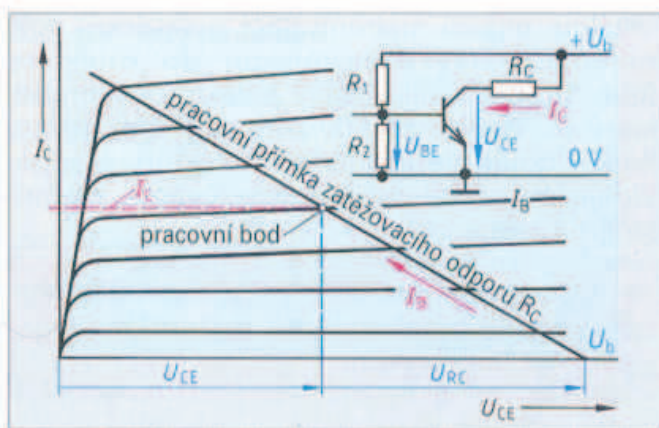
8.4.3 Stabilizace pracovního bodu

Stoupne-li kolektorový proud nebo okolní teplota, zvýší se teplota přechodů tranzistoru. V závěrných vrstvách v okolí přechodů vznikne více nosičů nábojů a tím opět stoupne kolektorový proud a kolektorová ztráta (termo-elektrická kladná zpětná vazba).

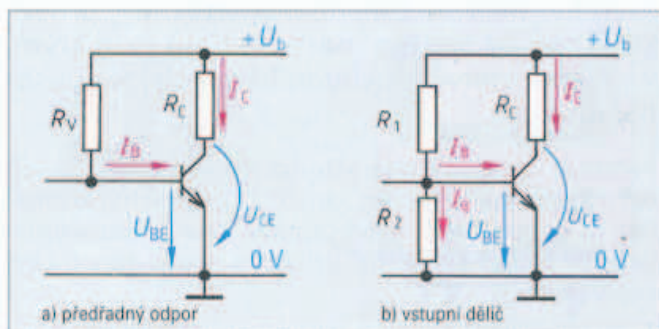
Potřebnou stabilizaci pracovního bodu může zajistit např. NTC-termistor (**obr. 3**), který má kontakt s pouzdrem tranzistoru. Při zahřátí se zmenší odpor termistoru, tím klesne předpětí U_{BE} a v důsledku toho klesne kolektorový proud I_C . Pro přizpůsobení teplotní charakteristiky termistoru se k němu připojuje paralelně ještě ohmický odpor, což je nutné např. u výkonových tranzistorů.

Pokud nepřipojíme vstupní dělič na napájení, ale přímo na kolektor (**obr. 4a**), bude působit přes odpor R_1 **záporná napěťová zpětná vazba**. Při nárůstu I_C , klesne U_{CE} a tím i předpětí U_{BE} . Tato záporná zpětná vazba zeslabí i vstupní signál a tedy i zesílení zesilovače.

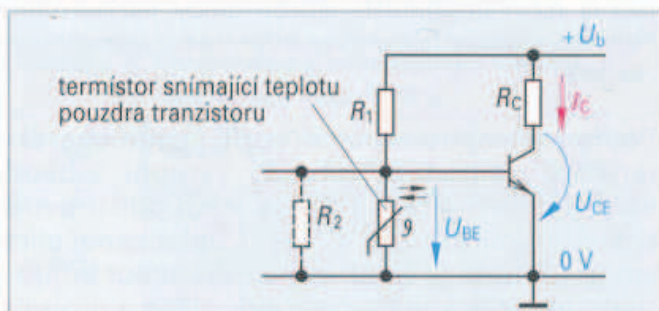
Tuto nevýhodu odstraňuje nejčastěji používaná **negativní proudová vazba** přes emitorový odpor R_E (**obr. 4b**). Nárůst kolektorového proudu způsobí nárůst úbytku napětí na emitorovém odporu R_E a tím zmenší předpětí báze U_{BE} . Aby potenciál emitoru vůči zemi nekolísal v rytmu zesilovaného střídavého signálu (a tím i pracovní bod), je střídavý signál zkratován z emitoru na zem emitorovým kondenzátorem C_E .



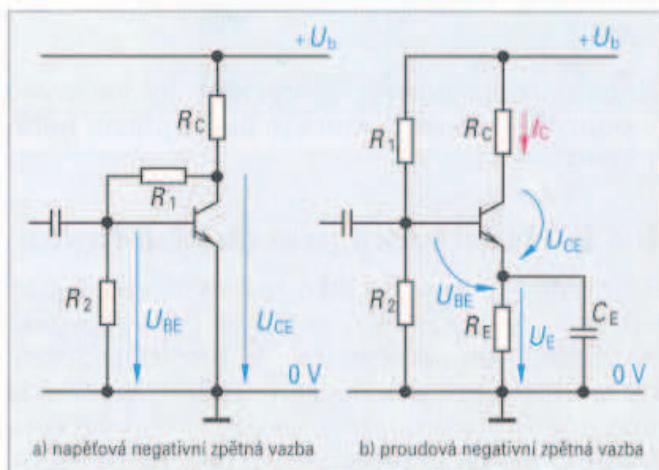
Obr. 1 Určení pracovního bodu



Obr. 2 Nastavení předpětí báze-emitor



Obr. 3 Stabilizace pracovního bodu NTC-termistorem



Obr. 4 Stabilizace pracovního bodu pomocí napěťové a proudové negativní zpětné vazby

8.4.4 Tranzistory řízené polem (FET)

V unipolárních tranzistorech je ovlivňováno zesílení jen jedním druhem nábojů, buď jen elektrony, nebo jen dírami. Tranzistory řízené polem (**Field-Effect Transistor, FET**) jsou tvořeny křemíkovým monokrystalem s dotací typu N nebo P (obr. 1), který je na obou koncích opatřen vodivými kontakty. Vysoká dotace příměsí na kontaktních plochách (P^+ na obr. 1) přitom zabraňuje vytvoření závěrné vrstvy mezi polovodičem a kovem. Závěrná vrstva se vytváří až mezi P^+ a N kanálem (závěrná vrstva tranzistoru J^1 -FET s vodivým spojením hradla-gate a kanálu). Hlavní elektrody FET tranzistoru se označují jako **Source**² (zdroj volných nosičů) a **Drain**³ (odsavač volných nosičů). Po stranách dráhy mezi Source (S) a Drain (D) jsou 2 propojené plošky tvořící řídicí elektrodu **Gate**⁴ (G), resp. hradlo. Silně dotované zóny hradla (P^+) odpuzují kolem procházející nosiče nábojů a vyklánějí jejich dráhy do středu mezi plošky hradla. Při zapojení napětí mezi G a S v závěrném směru se rozšíří kolem plošek hradla zóny bez volných nosičů nábojů a zúží se tím vodivý kanál pro nosiče nábojů. Závěrné napětí hradla zmenšuje průřez kanálu.

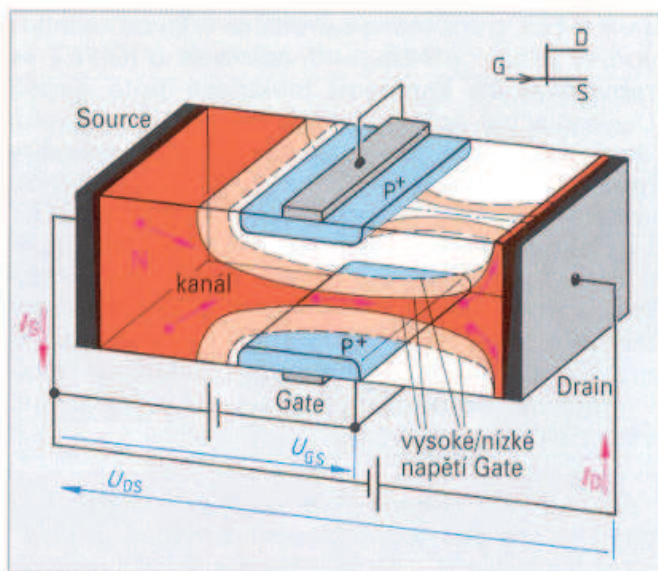
V unipolárním FET tranzistoru je odpor v kanálu mezi elektrodami Source a Drain řízen elektrickým polem kolmým ke kanálu.

Velké záporné napětí G-S, U_{GS} zmenšuje průřez kanálu na minimum, utáhne jej. Proud sací elektrody (Drain) I_D , vyvolaný napětím sací elektrody U_{DS} , závisí kromě jiného také na průřezu kanálu. Sací (Drain) proud způsobuje v FET tranzistoru úbytek napětí, který posune oblasti prostorových nábojů směrem k Drain elektrodě. Tím se směrem k Drain elektrodě posune i nejužší místo vodivého kanálu, resp. uzavřené místo kanálu, dosáhne-li G-S napětí velikosti **uzavíracího napětí** (pole charakteristik $I_D = f(U_{DS})$ v obr. 2).

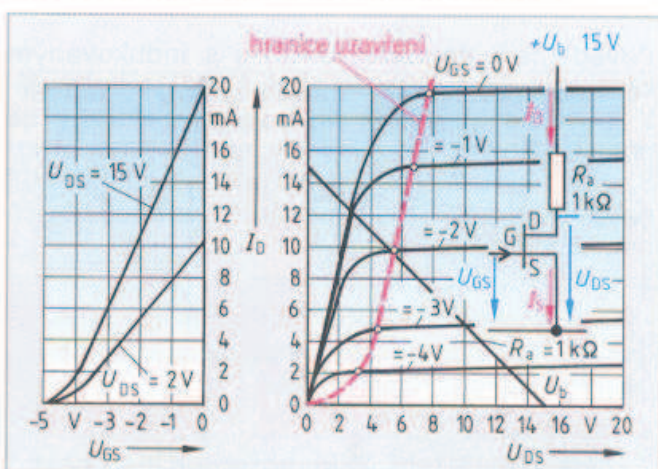
Tranzistory typu J-FET se v současnosti dělají převážně planární technologií (obr. 3). Přitom se struktura tranzistoru vytváří na povrchu křemíkového krystalu. Tyto tranzistory lze řídit nepatrnou energií, mají velký vstupní odpor a hradlem (G) teče jen nepatrný proud v závěrném směru, způsobený tepelným pohybem nosičů nábojů v závěrné vrstvě.

V FET-tranzistorech je výstupní (Drain) proud řízen nepatrným vstupním výkonem (napětím U_{GS}).

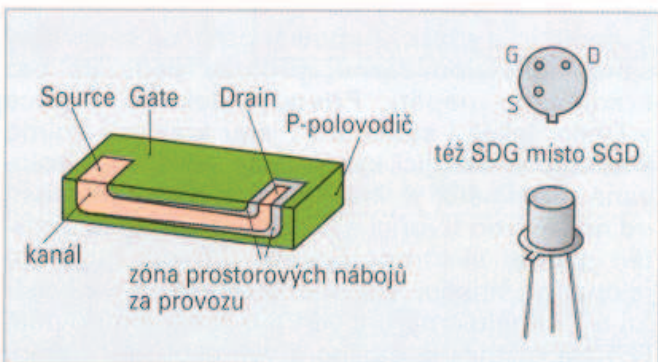
Mimořádně malý hradlový (Gate) proud lze úplně potlačit, odděluje-li kovové elektrody hradla (Gate) od křemíkového krystalu (vodivého kanálu) izolační vrstva (oxidu křemíčitého). Mluvíme pak o FET tranzistorech s izolační vrstvou (IG-FET)⁵. Tyto tranzistory se pro svoji technologii nazývají **Metal-Oxid-Semiconductors**⁶ (MOSFET). Izolaci hradla (Gate) se dosáhne extrémně vysokého vstupního odporu (10^{12} – $10^{15} \Omega$), který je nezávislý na velikosti a polaritě napětí U_{GS} . Přes hradlo (Gate) teče nepatrně malý proud několik femtoampérů ($1fA = 10^{-15} A$).



Obr. 1 Činnost tranzistoru řízeného polem



Obr. 2 Pole charakteristik JFET s N-kanálem



Obr. 3 JFET s N-kanálem v planární provedení

¹ z anglického Junction = spojení

² z anglického Source = zdroj

³ z anglického Drain = odvod

⁴ z anglického Gate = brána, závora, hradlo

⁵ z anglického Isolated Gate = izolované hradlo

⁶ z anglického Semiconductor = polovodič

Je-li u FET tranzistoru s izolační vrstvou (IGFET) vodivý kanál i při $U_{GS} = 0$, jedná se o **IG-FET se zabudovaným kanálem**. Elektrické pole napětí U_{GS} vytlačuje pohyblivé nosiče nábojů z kanálu, který je tak ochuzen o elektrony, případně díry (obr. 1a). Také FET tranzistory se závěrnou vrstvou jsou takové **ochuzované typy**. **MOSFET s indukovaným kanálem** (obr. 1b) není bez napětí U_{GS} vodivý. Vodivý kanál se vytvoří vhodně polarizovaným napětím U_{GS} . Např. při fosforové dotaci křemíkového krystalu (substrát typu P) převažují díry a vodivostní elektrony jsou v menšině. Poměr koncentrací děr a elektronů však zůstává zachován.

Při nulovém Source-Gate napětí U_{GS} protéká IG-FET-em se zabudovaným kanálem proud Source-Drain I_{SD} , MOSFET-em s indukovaným kanálem při $U_{GS} = 0$ neteče I_{SD} .

Přivedeme-li na Gate IG-FET-u s indukovaným kanálem typu N (obr. 1b) kladné narůstající napětí, přitáhne elektrické pole volné elektrony na povrch krystalu, tzn. vznikne vodivá cesta mezi Source a Drain elektrodami. Zvětšujeme-li na Gate napětí, obohacuje se množství nosičů nábojů v kanále.

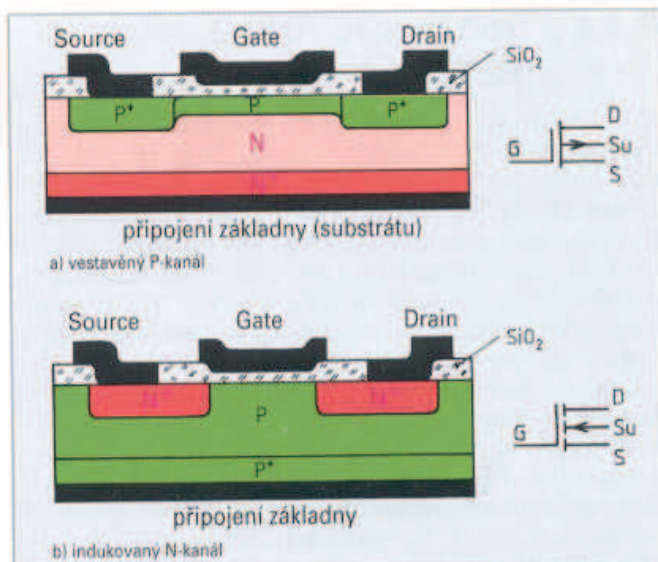
Obohacované MOSFETy (IG-FETy) pracují s indukovaným kanálem, ochuzované IG-FETy mají vestavěný kanál.

Z charakteristik (obr. 2) je možno určit strmost S (převodní charakteristiky) a hodnotu diferenciálního odporu r_{DS} (z výstupní charakteristiky).

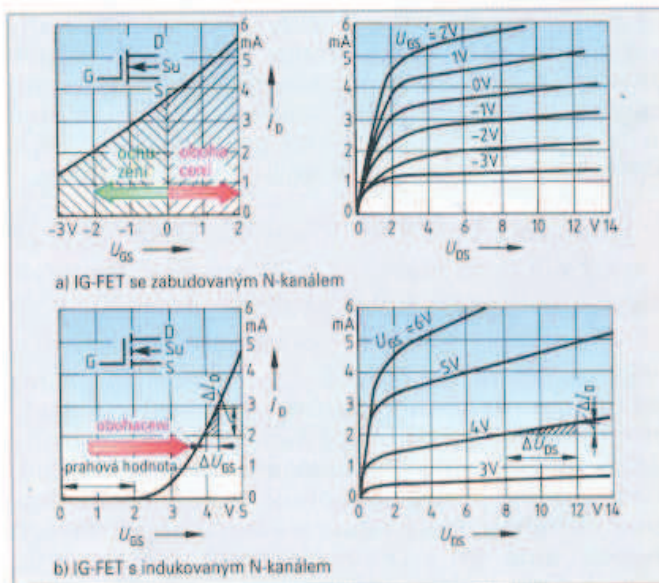
Schematické značky (tabulka) označují vestavěný kanál souvislou čarou, protože vede již bez hradlového napětí. Přívody elektrod Source a Drain, jakož i substrátu¹, jsou kresleny kolmo k úsečce označující kanál. Gate elektroda, izolovaná od kanálu, je kreslena v malé vzdálenosti od něj. Přívod (tvořící s Gate písmeno L) je umístěn naproti elektrodě Source. Přívod substrátu je opatřen šipkou, jejíž orientace určuje typ kanálu, u P-kanálu směřuje ven a u N-kanálu dovnitř. FET tranzistory je možno s výjimkou tranzistorů Unijuktion rozdělit na tranzistory se závěrnou vrstvou, tj. s připojeným hradlem (JFET nebo MESFET²) a s izolovaným hradlem (IG FET, které jsou převážně MOSFET). Dalším kritériem dělení jsou převážně MOSFET). Dalším kritériem dělení (kromě připojení G k substrátu) je typ nosičů nábojů v kanále P nebo N a dále typ kanálu (vestavěný nebo indukovaný), viz tabulka 1 na str. 177. MESFET dostaneme z JFET, nahradíme-li P-N přechod mezi G-S Shottkyho diodou, tj. přechodem kov-polovodič. MESFETy se většinou nevyrábějí z křemíku, ale z GaAs, kde je přibližně třikrát větší pohyblivost elektronů.

¹ z anglického substrat = podložka

² MESFET z anglického Metal Semikonduktor FET



Obr. 1 Průřez tranzistorem IG-FET (MOSFET)



Obr. 2 Charakteristiky tranzistorů IG FET

S strmost převodní charakteristiky
 ΔI_D změna proudu Drain
 ΔU_{GS} změna napětí Gate
 r_{DS} diferenciální výstupní odpor
 ΔU_{DS} změna napětí Drain-Source

$$S = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}}$$

$$r_{DS} = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_D}$$

Tabulka: Schematické značky MOSFET

s vestavěným kanálem	s indukovaným kanálem
N-kanál	P-kanál

MOSFET-y se vyrábějí jako jednotlivé (diskrétní)¹ součástky, nebo jako prvky integrovaných² obvodů vyráběných planární technologií na bázi křemíku (**tabulka 2**). Ve vlhké atmosféře se nejprve křemíková destička, dotovaná např. fosforem, pokryje při 900°C izolační vrstvičkou oxidu křemičitého SiO₂. Na tuto vrstvu se nanese fotocitlivý lak a ten je přes masku osvětlen. Kyselina fluorovodíková (HF) vyleptá osvětlená místa z vrstvičky SiO₂. Do vyleptaných míst může být nanesen např. bor jako dotující prvek, a to difuzí z par diboran-hydridu (B₂H₆). Hradlová vrstva oxidu smí být silná jen 0,12 μm. Získá se suchou oxidací:



Tato vrstvička oxidu je velmi kompaktní a má relativní permitivitu $\epsilon_r = 3,84$. Přívody elektrod Source, Gate a Drain se získají napařením hliníku ve vysokém vakuu a následným odleptáním přebytečných ploch.

U FET tranzistorů se získává předpětí-Gate pro MOSFET-y s indukovaným kanálem pomocí děliče napětí (**tabulka 3**). U MOSFET-u s vestavěným kanálem vzniká předpětí-Gate automaticky na odporu source R_S . Tento odpor R_S zároveň slouží ke stabilizaci pracovního bodu pomocí proudové zpětné vazby. Paralelně zapojený kondenzátor C_S zabrání zpětnovazebnímu účinku střídavého napětí.

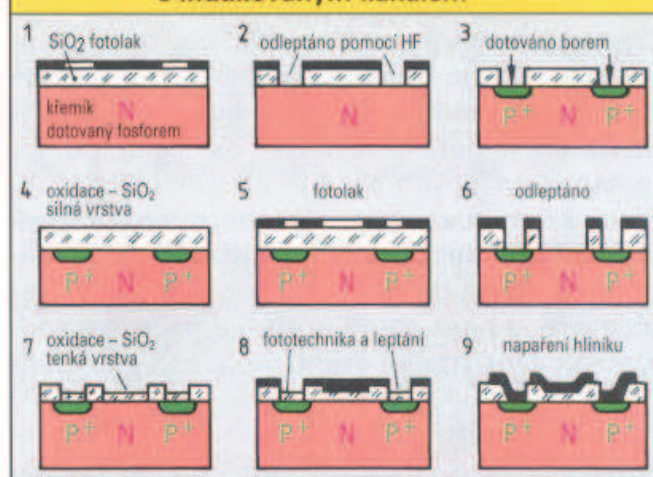
Otázky k opakování

1. Čím se liší bipolární tranzistory od unipolárních?
2. Jak se nazývají vývody a) bipolárního, b) unipolárního tranzistoru?
3. Popište konstrukci planárního NPN tranzistoru.
4. Čím lze řídit kolektorový proud tranzistoru?
5. Jaká je souvislost mezi kolektorem, bází a emitorem?
6. Které charakteristiky tranzistoru jsou třeba k návrhu zesilovače?
7. Čím lze nastavit pracovní bod bipolárního tranzistoru?
8. Proč je třeba stabilizovat nastavení pracovního bodu?
9. Vysvětlíte efekt pole při řízení unipolárního tranzistoru.
10. Co se rozumí u FET tranzistoru uzavíracím napětím?

Tabulka 1: FET-tranzistory kromě Unijunktion – tranzistorů

polovodičový prvek	typ kanálu	nosiče nábojů	schematická značka
FET se závěrnou vrstvou JFET	N-kanál	ochuzované	
	P-kanál	ochuzované	
MOSFET IGFET	N-kanál	obohacované	
	N-kanál	ochuzované	
	P-kanál	ochuzované	
	P-kanál	obohacované	

Tabulka 2: Výroba tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem



Tabulka 3: Vytvoření předpětí hradla (Gate)

IGFET (N-kanál indukovaný)	IGFET (N-kanál vestavěný)	JFET (P-kanál)
předpětí pomocí děliče napětí	C_S propouští střídavý proud, odpor $R_G \leq 5\text{M}\Omega$ slouží k odvedení elektrostatických nábojů	

¹ z anglického discrete = oddělený

² z anglického integrate = tvořit komplex