

## Princip činnosti tranzistoru s indukovaným kanálem

Princip činnosti [tranzistoru MOSFET](#) s indukovaným kanálem N vysvětlíme s využitím obr. 237.

Vysvětlení tranzistoru s indukovaným kanálem P by bylo obdobné.

[Polovodič typu P](#) obsahuje volné kladně nabitě [díry](#), ale také část vodivostních [elektronů](#) (ty nejsou na obr. 237 zakresleny). [Polovodič N](#) obsahuje pouze [volné elektrony](#) - polovodič je silně dopován, proto počet vodivostních elektronů výrazně převyšuje počet vodivostních děr (i nad rámec [poměru](#) počtu těchto [částic](#), který je běžný v běžném [polovodiči typu N](#)). Elektrody S, G, D a B jsou zapojeny podle příslušného schématu.

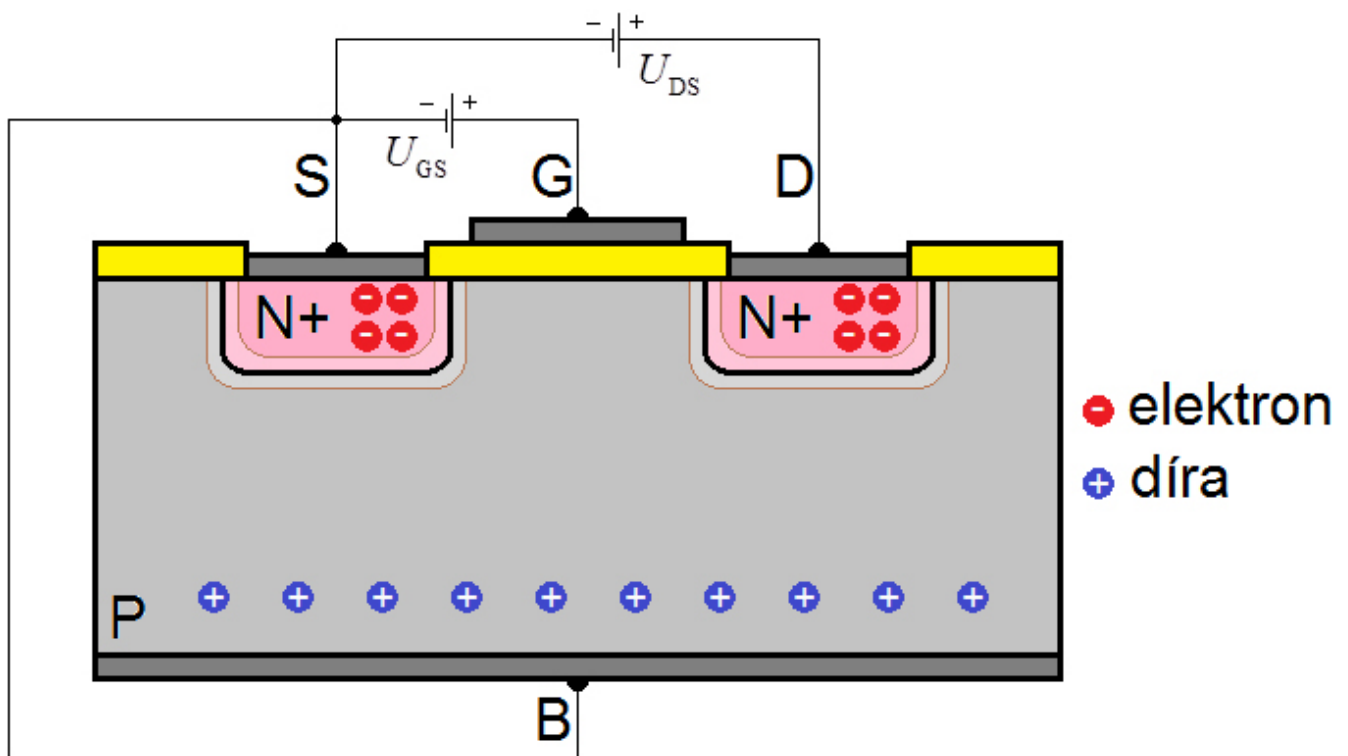
Díry v polovodiči P i elektrony v polovodiči N jsou umístěny symetricky v celém objemu daného typu polovodiče.

Nyní rozebereme postupně několik situací.

Začneme situací, ve které je  $U_{GS} = 0$ . Vzhledem k tomu, že elektroda G je oddělena od polovodiče P nevodivou destičkou, nemůže téct mezi elektrodami G a S žádný [elektrický proud](#). Bude-li platit i  $U_{DS} = 0$ , pak žádným vodičem nepoteče elektrický proud.

Budeme-li postupně zvyšovat napětí  $U_{DS}$  (ale přitom stále  $U_{GS} = 0$ ), bude [přechod PN](#) pod elektrodou D zapojen v [závěrném směru](#). Tím se zvětší oblast, v níž nejsou žádné vodivostní částice. Druhý přechod PN (pod elektrodou S) je zapojen v [propustném směru](#), a proto se oblast bez vodivostních částic zmenší. Vzhledem k tomu, že jeden z přechodů je zapojen v propustném směru a druhý v nepropustném směru, elektrický proud mezi elektrodami D a S procházet nebude.

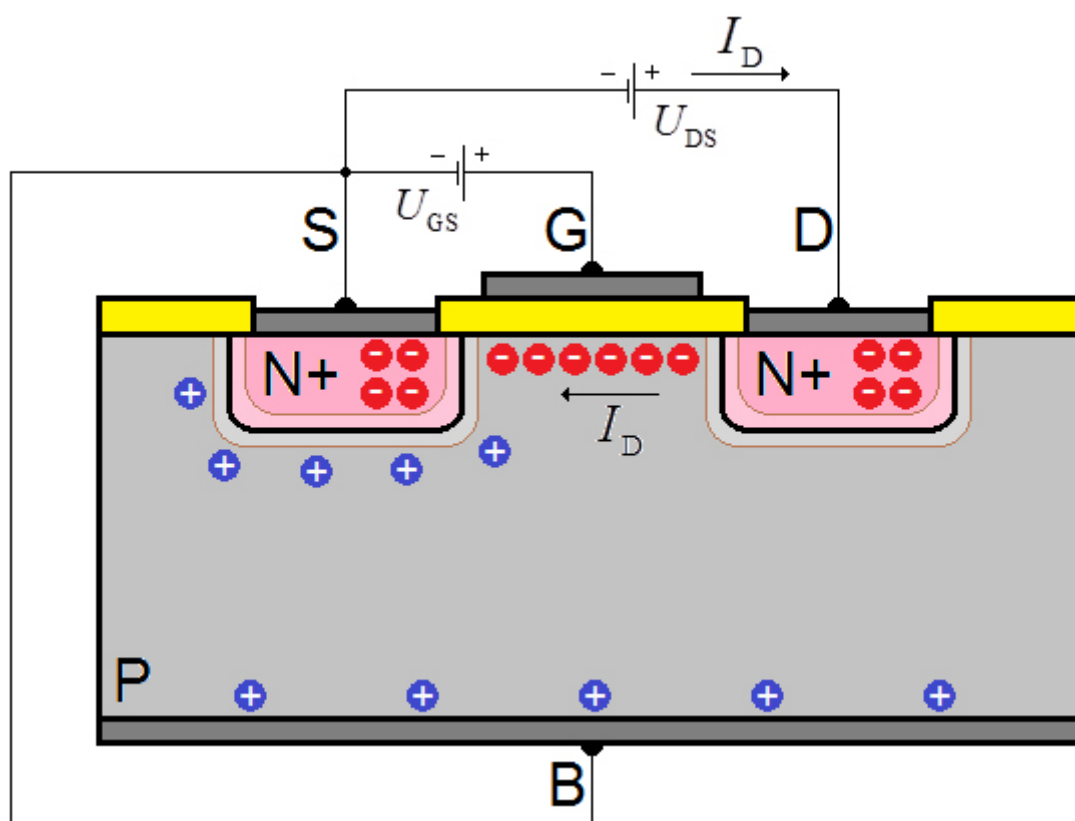
Přechodem zapojeným v propustném směru by elektrický proud procházet mohl, ale druhý přechod (zapojený v nepropustném směru) představuje pro elektrický proud (tj. pro vodivostní částice) bariéru.



Obr. 237

Pokud budeme nyní zvyšovat napětí  $U_{GS}$ , budou se elektrony přítomné v polovodiči P přitahovat do oblasti pod elektrodou G. Na elektrodě G se nedostanou - polovodič je od elektrody oddělen nevodivou vrstvou. Ale budou v oblasti pod touto elektrodou (viz obr. 238). Kladně nabitě díry polovodiče P se budou přitahovat k zápornému pólu zdroje - tedy k elektrodám B a S. S rostoucím napětím  $U_{GS}$  se bude zvyšovat počet elektronů pod elektrodou G. Při určité hodnotě napětí  $U_{GS}$ , která se označuje symbolem  $U_T$  (*threshold voltage*), začnou elektrony z oblasti pod elektrodou G přecházet do polovodiče typu N pod elektrodou D. Vytvořený **indukovaný kanál** se tedy otevřel.

Tento přechod je možný - v polovodiči typu N jsou neobsazené kladně nabitě zbytky, které vznikly odtržením vodivostních elektronů od původně neutrálních atomů. Navíc budou elektrony přitahovány ke kladně nabitě elektrodě D.



Obr. 238

Hodnota prahového napětí  $U_T$  je přibližně z intervalu (1; 5) V .

Otevřením indukovaného kanálu se tedy otevřel tranzistor - mezi elektrodami D a S tak teče elektrický proud.

Tak jako se bipolární tranzistor otevírá elektrickým proudem přivedeným do jeho báze, unipolární tranzistor (např. MOSFET) se otevírá vhodným napětím  $U_{GS}$  .

Elektrony tedy projdou přes elektrodu D a zdroj napětí do elektrody S. Přechod PN pod elektrodou S je zapojen pro elektrony v propustném směru, a proto budou elektrony pokračovat dále k elektrodě D. Část polovodiče P pod elektrodou G je již vodivá (díky přiloženému napětí  $U_{GS}$  ), takže elektrický proud  $I_D$  může procházet.

Směr elektrického proudu  $I_D$  na obr. 238 je zakreslen jako domluvený směr elektrického proudu - tj. jako pohyb kladně nabitých částic (tedy proti směru pohybu skutečně se pohybujících elektronů).

S rostoucím napětím  $U_{GS}$  roste i šířka indukovaného kanálu. Při konstantním napětí  $U_{DS}$  se bude hodnota elektrického proudu  $I_D$  tekoucího přes elektrody D a S zvětšovat a bude určena hodnotou napětí  $U_{GS}$ .

Větší napětí  $U_{GS}$  znamená širší vodivou cestu pro elektrony, a tedy i vyšší hodnotu procházejícího proudu.

Bude-li naopak napětí  $U_{GS}$  konstantní a budeme-li zvyšovat napětí  $U_{DS}$ , bude se elektrický proud  $I_D$  zvyšovat také. Nárůst napětí  $U_{DS}$  totiž také rozšíří indukovaný kanál vytvořený v polovodiči typu P.

Pro praktické použití těchto typů tranzistorů je nutné si uvědomit, že oblast mezi elektrodami G a S má vlastnosti **kondenzátoru**, tj. mezi danými elektrodami naměříme jistou kapacitu. Tento jev vzniká díky přítomnosti izolátoru, který odděluje elektrodu G od polovodiče typu P, a rozložení elektronů a děr v blízkosti elektrod S a D (viz obr. 238). Hodnota kapacity takto vytvořeného virtuálního kondenzátoru je řádově:

1. jednotky pF pro nízkovýkonové tranzistory;
2. jednotky nF pro vysokovýkonové tranzistory.

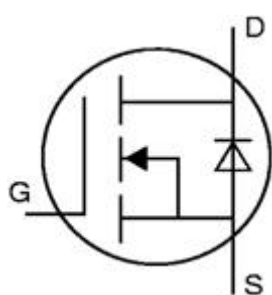
Při připojení **střídavého napětí** mezi elektrody G a S proto mezi elektrodami G a S poteče elektrický proud, který je daný změnou hustoty elektronů v indukovaném kanále (tj. změnou právě popsané kapacity). Hodnoty tohoto proudu jsou uvedeny v příslušné dokumentaci k tranzistorům.

Typická hodnota napětí  $U_{GS}$  bývá 5 V až 20 V, hodnota napětí  $U_{DS}$  může být až 1000 V aniž by byl tranzistor zničen **elektrickým průrazem**. Průraz mezi elektrodami G a S může nastat i vlivem statického náboje (vznikajícímu při pouhé běžné manipulaci s tranzistorem).

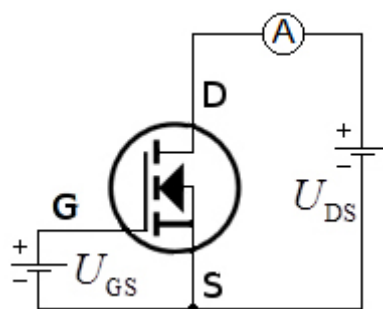
Díky konstrukci tranzistoru tohoto typu se oblast mezi elektrodami S a D chová jako **dioda**, jejíž zapojení si lze představit tak, jak je zobrazeno na obr. 239. Tato dioda se pak projeví jako ochranná dioda při vzniku přechodových jevů nebo při zapojení **cívek** do obvodu s tranzistorem a ovlivní i otevření tranzistoru.

Dioda ve skutečnosti v tranzistoru zapojená není, ale materiál využitý při výrobě tranzistoru a rozložení **elektrických nábojů** v tomto materiálu chování diody připomíná.

Nyní se podíváme na výstupní voltampérovou charakteristiku tohoto typu tranzistoru MOSFET. Budeme uvažovat zapojení, které jsme právě popsali a které je schematicky zobrazeno na obr. 240.



Obr. 239



Obr. 240

V grafu zobrazeném na obr. 241 je nutné nejdříve vyznačit křivku  $P_{max}$ . Ta vyznačuje je maximální **výkon**, kterým může být tranzistor zatížen. Je to fyzikální omezení z hlediska tepelných ztrát. Vyšší výkon by zvyšoval **jouleovo teplo** uvolňované průchodem elektrického proudu a tranzistor by se již začal přehřívat nad únosnou mez.

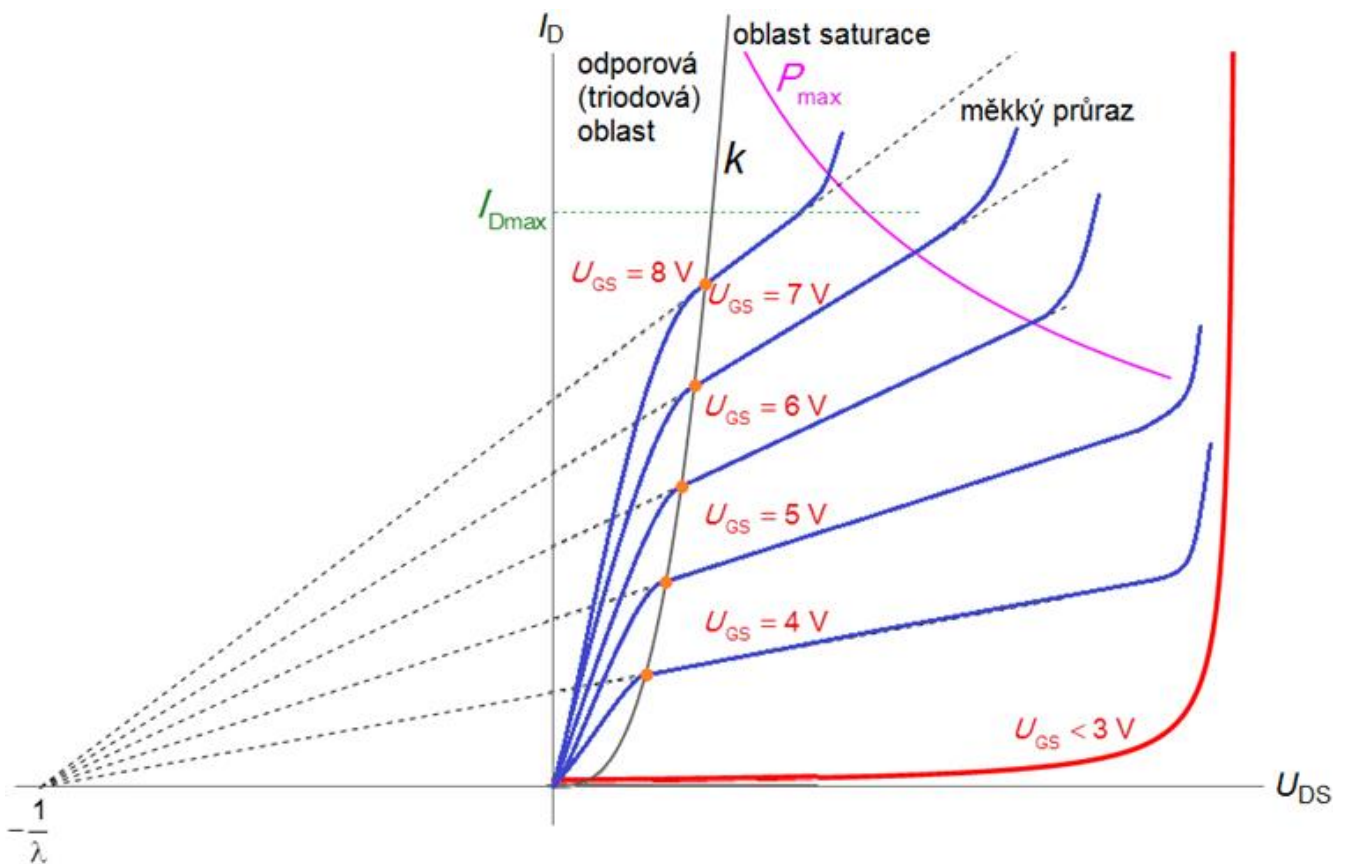
Uvažujme tranzistor, pro který je  $U_T = 3 \text{ V}$ . Křivka, která je nejdříve téměř konstantní a poté velmi strmě roste, odpovídá napětí  $U_{GS} < 3 \text{ V}$ . Tato křivka tedy popisuje tranzistor, který je zavřený

a kterým teče zbytkový elektrický proud přibližně 1 nA. Při překročení jisté hodnoty napětí  $U_{DS}$  nastává **průraz tranzistoru** mezi elektrodami D a B.

Křivka  $k$  rozděluje uvažovanou oblast napětí, v níž může tranzistor pracovat, na dvě části. Tato křivka odpovídá stavu, kdy nastane saturace elektrického proudu ve vytvořeném indukovaném kanálu (tj. nastane vyrovnání potenciálů). Jedná se o tyto dvě oblasti:

1. odporová (triodová oblast) - v této části roste elektrický proud  $I_D$  lineárně v závislosti na [elektrickém napětí](#) mezi elektrodami D a S při daném napětí mezi elektrodami G a S;
2. oblast saturace - tranzistor má pro dané hodnoty elektrického proudu a napětí stejné vlastnosti jako zdroj elektrického proudu.

Každá modře zakreslená křivka tedy odpovídá konkrétní hodnotě napětí  $U_{GS}$ , která vlastně nastavuje míru otevření tranzistoru. Při změně napětí  $U_{DS}$  mezi elektrodami D a S se pak mění elektrický proud  $I_D$ .



Obr. 241

Blíží-li se hodnota elektrického proudu  $I_D$  hodnotě ležící na křivce  $k$ , přestává být průběh elektrického proudu v závislosti na napětí  $U_{DS}$  lineární - elektrický proud se postupně saturuje. Překročí-li hodnota elektrického proudu  $I_D$  hodnotu, která při daném napětí  $U_{GS}$  odpovídá maximálnímu výkonu  $P_{max}$ , nastává tzv. **měkký elektrický průraz** tranzistoru.

Nelinearita průběhu elektrického proudu v závislosti na přiloženém napětí je způsobena tím, že vytvořený indukovaný kanál už není ovlivňován pouze elektrickým [polem](#) vytvořeným napětím  $U_{GS}$  (které tento kanál vlastně vytvořilo), ale i elektrickým polem napětí  $U_{DS}$ . Vodivý kanál se proto v oblasti pod elektrodou S začíná rozšiřovat a v oblasti pod elektrodou D se začíná zužovat. Tomuto jevu se říká **zaškrcování kanálu**.

V oblasti saturace (přibližně od 3 V) již nastalo zaškrcoení kanálu. Průsečíky křivky  $k$  s modřými

křivkami se nazývají **body zaškrčení kanálu**. Od těchto bodů se elektrický proud zvyšuje jen velmi pozvolna a to vlivem tzv. **modulace délky kanálu**.

Tranzistory jsou navrhovány a používány tak, že pracují primárně v oblasti saturace. Pro tuto oblast platí  $U_{DS} > U_{GS} - U_T$ . Tranzistory ale mohou pracovat i v odporové oblasti.

Parametr  $\lambda$  odpovídá tzv. Earlymu napětí u bipolárních tranzistorů.

Pro tento typ tranzistoru platí  $-\frac{1}{\lambda} \doteq -200 \text{ V}$ , a proto je nutné si uvědomit, že v grafu zobrazeném na obr. 241 nejsou dodrženy poměry na osách.

Teplotní závislost popsané křivky je poměrně stabilní - stabilnější, než je stejný typ křivky pro bipolární tranzistory.

Fakt, že je daná závislost stabilní, znamená, že graf zobrazený na obr. 241 je pro všechny [teploty](#) z rozsahu pracovních teplot daného tranzistoru téměř stejný.

---

© **Encyklopedie Fyziky** (<http://fyzika.jreichl.com>); **Jaroslav Reichl, Martin Všeticka**

Licence <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/> zakazuje úpravy a komerční distribuci.