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 nabité 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.

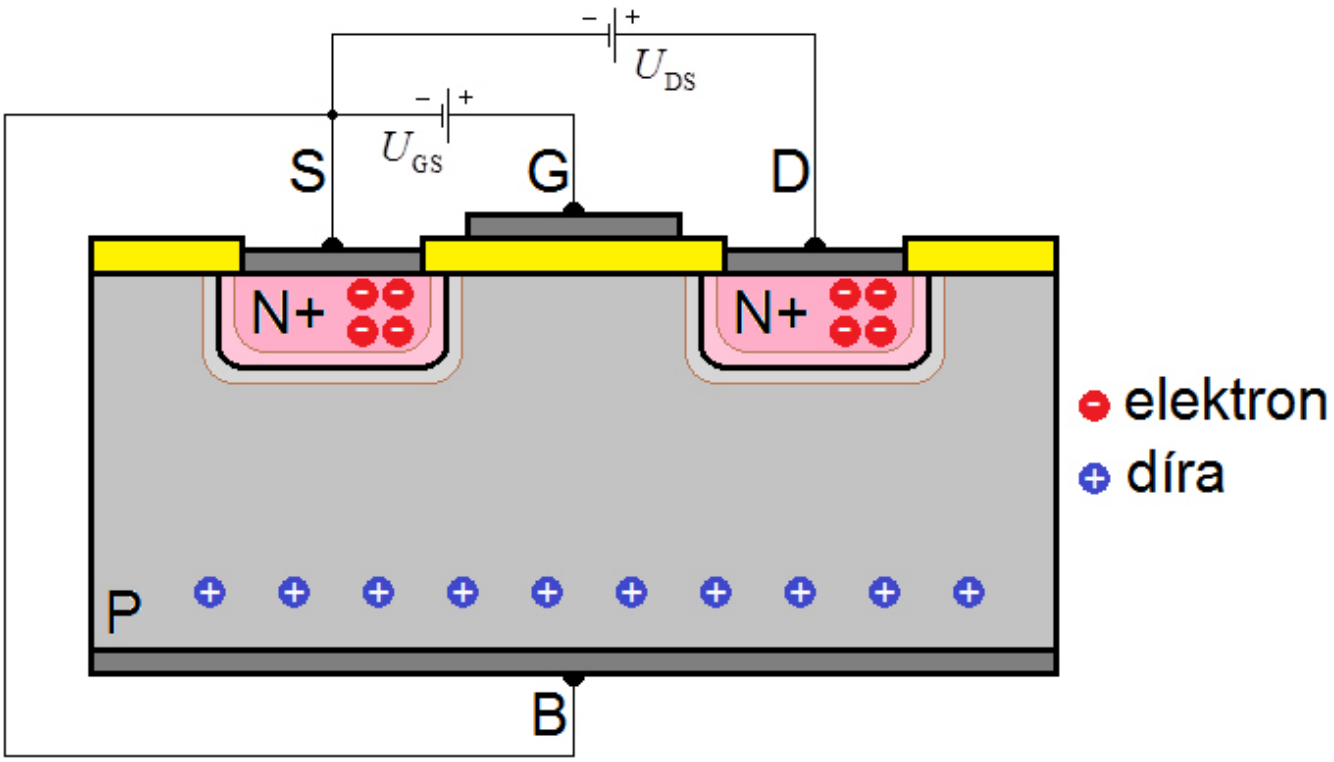
Díry v polovodiči P i elektrony v polovodiči N jsou umístěny symetricky v celém objemu daného typu polovodiče.

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.

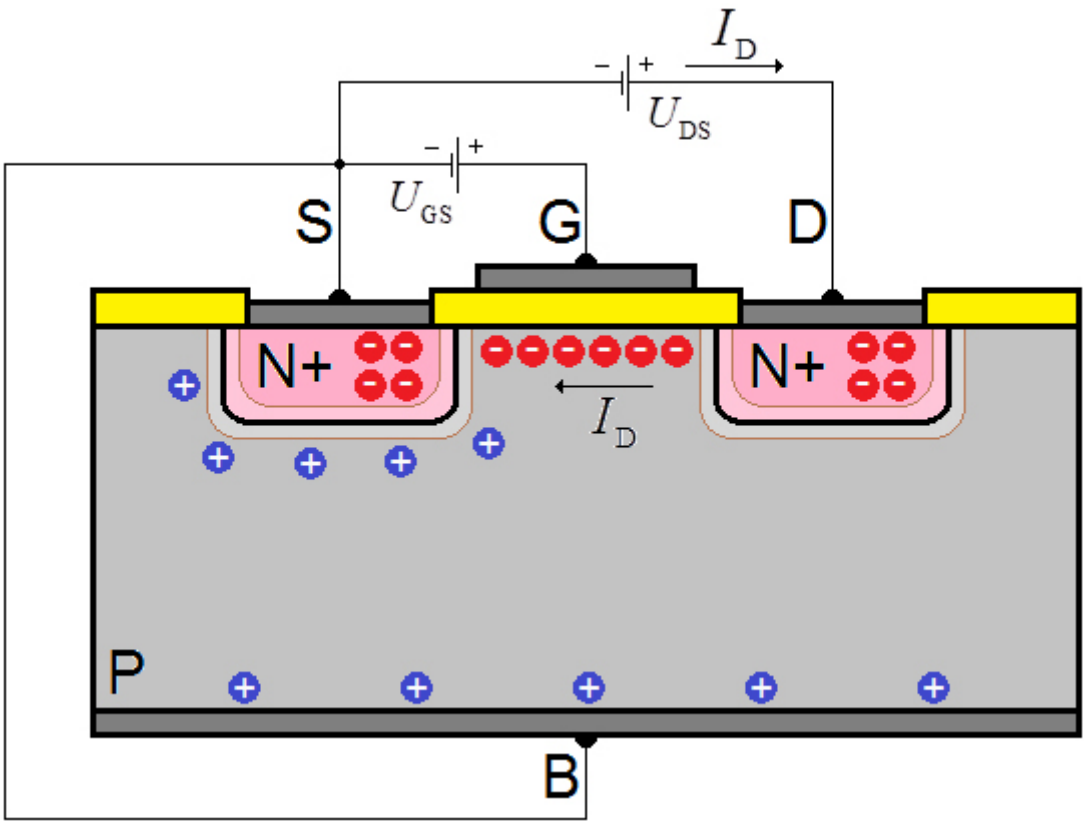
Přechodem zapojeným v propustném směru by elektrický proud procházet mohl, ale druhý přechod (zapojený v nepropustném směru) představuje pro elektrický proud (tj. pro vodivostní částice) bariéru.



Obr. 237

Pokud budeme nyní zvyšovat napětí U_{GS}, budou se elektrony přítomné v polovodiči P přitahovat do oblasti pod elektrodu G. Na elektrodu G se nedostanou - polovodič je od elektrody oddělen nevodivou vrstvou. Ale budou v oblasti pod touto elektrodou (viz obr. 238). Kladně nabité 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 nabité zbytky, které vznikly odtržením vodivostních elektronů od původně neutrálních atomů. Navíc budou elektrony přitahovány ke kladně nabité elektrodě D.



Obr. 238

Hodnota prahového napětí U_T je přibližně z intervalu $(1;5)\,\mathrm{V}$.

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 napětí 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.

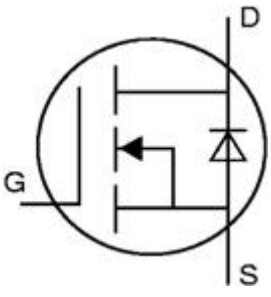
Při připojení střídavého napětí mezi elektrody G a S proto mezi elektrodami G a S poteče elektrický proud, který je daný změnou hustoty elektronů v indukovaném kanále (tj. změnou právě popsané kapacity). Hodnoty tohoto proudu jsou uvedeny v příslušné dokumentaci k tranzistorům.

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).

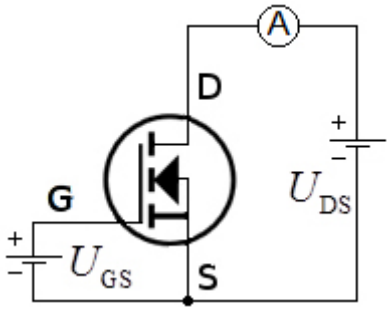
Díky konstrukci tranzistoru tohoto typu se oblast mezi elektrodami S a D chová jako dioda, jejíž zapojení si lze představit tak, jak je zobrazeno na obr. 239. Tato dioda se pak projeví jako ochranná dioda při vzniku přechodových jevů nebo při zapojení cívek do obvodu s tranzistorem a ovlivní i otevření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

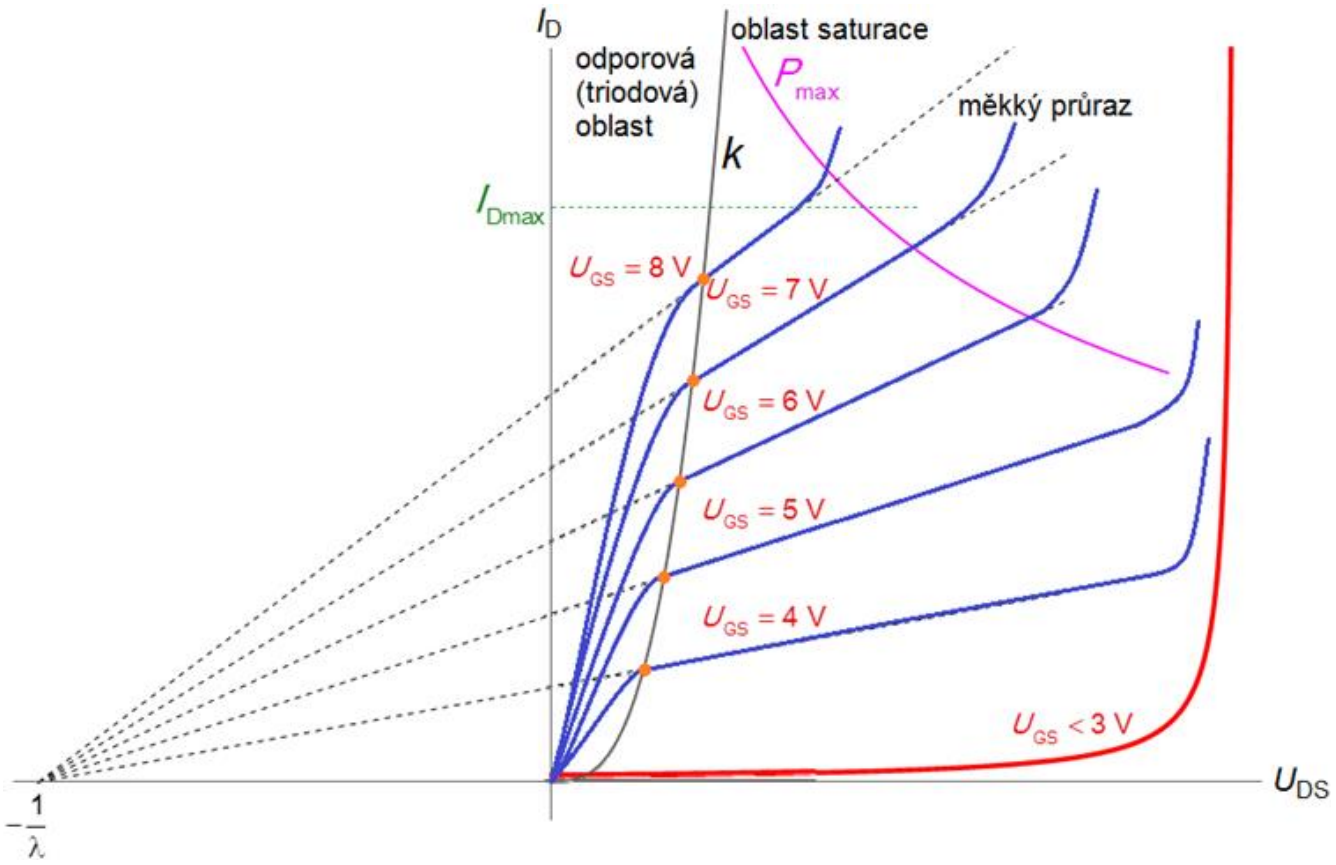
Uvažujme tranzistor, pro který je $U_T = 3\,\mathrm{V}$. Křivka, která je nejdříve téměř konstantní a poté velmi strmě roste, odpovídá napětí $U_{GS} < 3\,\mathrm{V}$. Tato křivka tedy popisuje tranzistor, který je zavřený

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 zaškrcení kanálu. Průsečíky křivky *k* s modrými

křivkami se nazývají **body zaškrcení 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 λ odpovídá tzv. Earlymu napětí u bipolárních tranzistorů.

Pro tento typ tranzistoru platí $-\frac{1}{\lambda} \doteq -200\,\mathrm{V}$, 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 Všetička
Licence http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/ zakazuje úpravy a komerční distribuci.