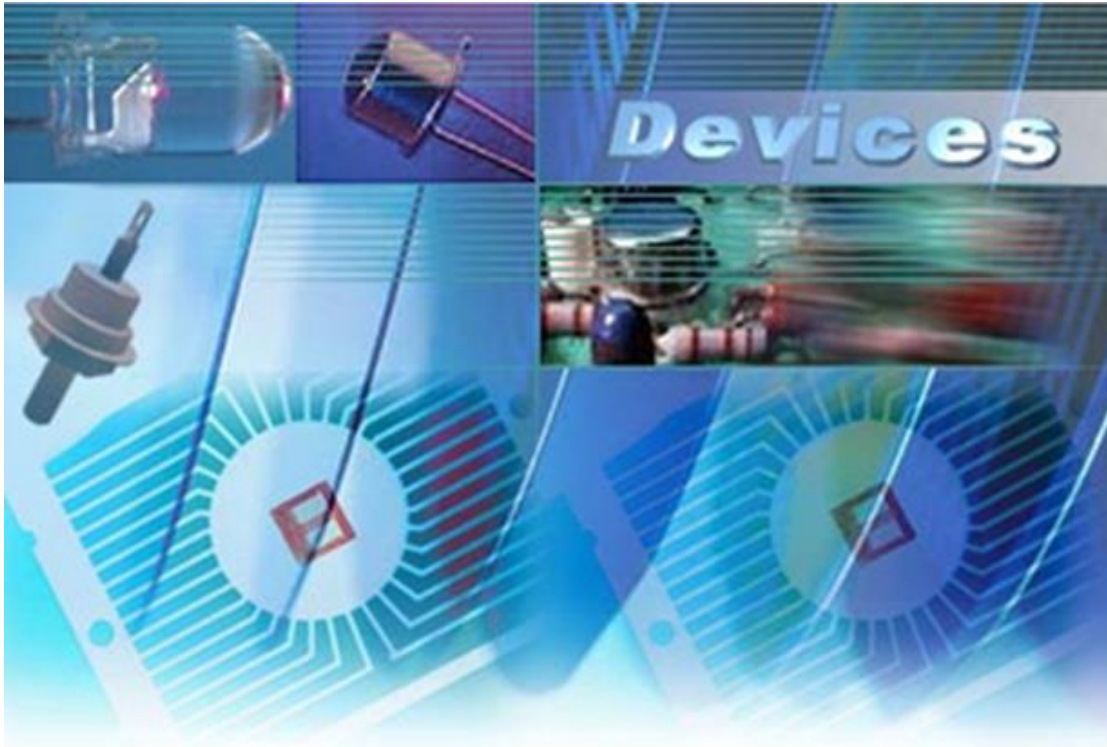


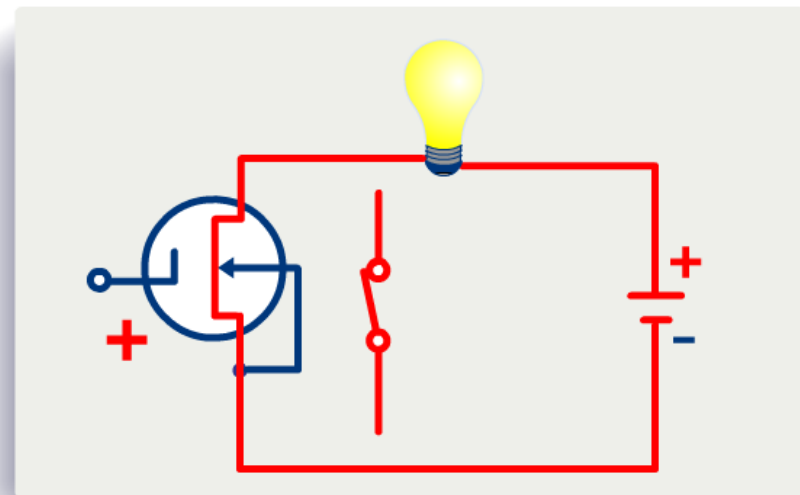
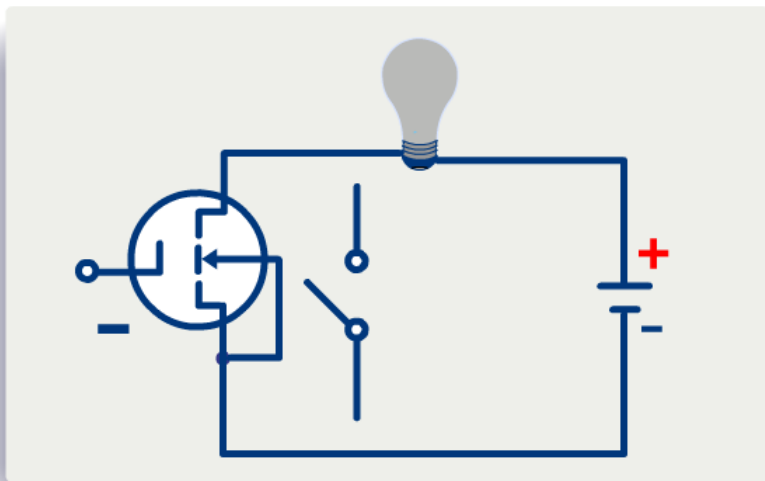


MOS транзистори



Полупроводникови
елементи

Какво означава MOSFET?



MOSFET е съкращение от **Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor** (метал – окис – полупроводник транзистор с полеви ефект). Той представлява електронна версия на ключ.

Предимства: високо входно съпротивление, ниска консумация на мощност, по-добра температурна стабилност, слаба чувствителност към радиация.

Приложения



MOS транзисторите се използват в силовата електроника, аудио техниката, медицинската електроника. Те са основни компоненти на съвременните интегрални схеми, които намират приложение в безжичките комуникации, компютърна, автомобилна, авиационна/космическа индустрии, домакински уреди и др.

Цели и предпоставки

Разглеждат се структурата, принципът на действие, характеристиките и параметрите на полеви транзистори с изолиран управляващ електрод.

Познавате

Разбирате

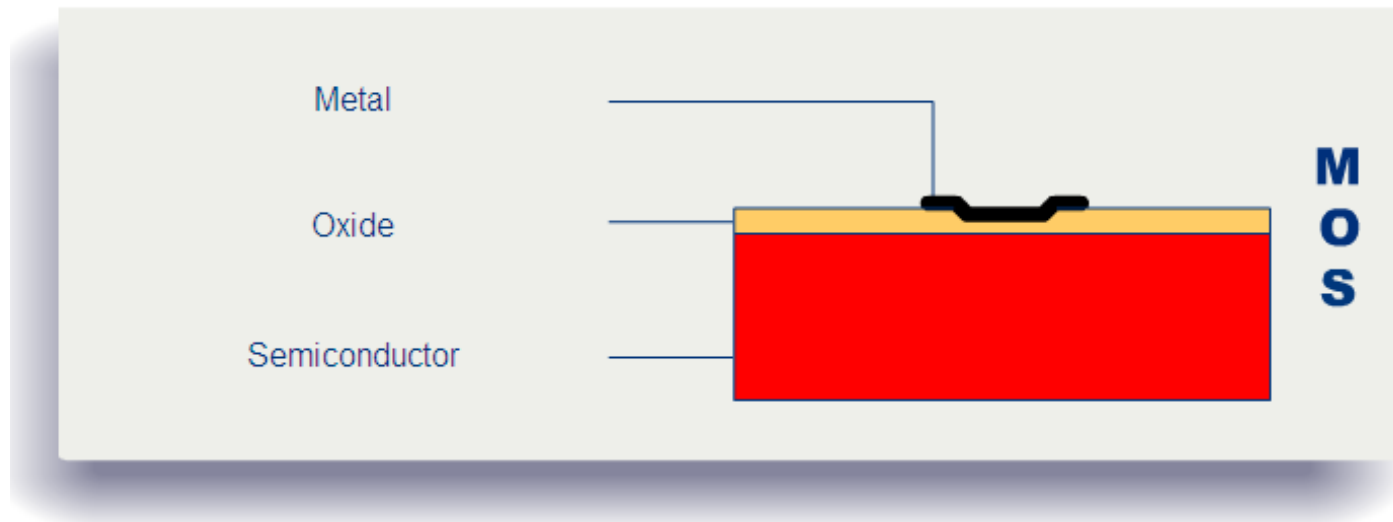
Анализирате

След изучаване на материала вие би трябвало да:

- ✚ Видовете MOS транзистори и тяхната структура
- ✚ Режимите на работа, характеристиките и параметрите
- ✚ Принципът на действие на MOS транзистора
- ✚ Процесите, протичащи в областите на транзистора
- ✚ Как се защитава структурата от пробив в тънкия окис
- ✚ Режимите на работа на MOS транзистора и токовете, протичащи през него
- ✚ Токовете и напреженията в схеми с MOS транзистори

Предпоставки: свойства на полупроводниците, диод

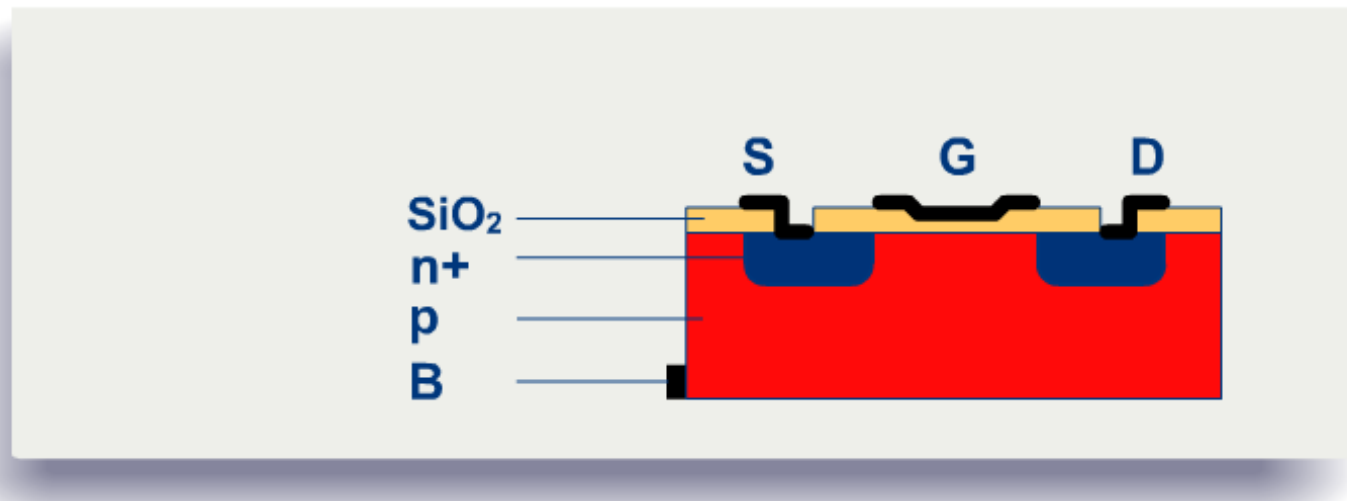
MOS структура



MOS структурата се състои от **метал**, разположен върху **окис**, който е създаден върху пластина от **полупроводник** (силиций).

MOSFET се среща и като **IGFET** (Insulated-Gate FET) – транзистор с изолиран управляващ електрод, поради факта, че гейтът е изолиран от подложката посредством SiO_2 (изолатор).

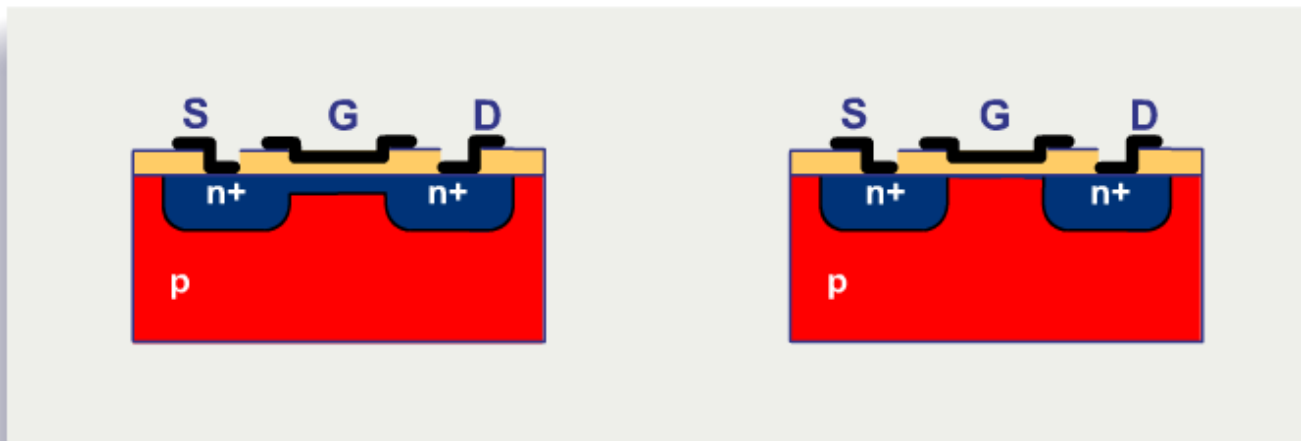
Изводи на MOS транзистора



MOS транзисторът има четири извода – сорс (**source** – S), гейт (**gate** – G), дрейн (**drain** – D) и подложка (**body** - B).

Големината на тока между сорса и дрейна зависи от напреженията, които са приложени на тези изводи. MOS транзисторът се **управлява по напрежение**.

Типове MOS транзистори

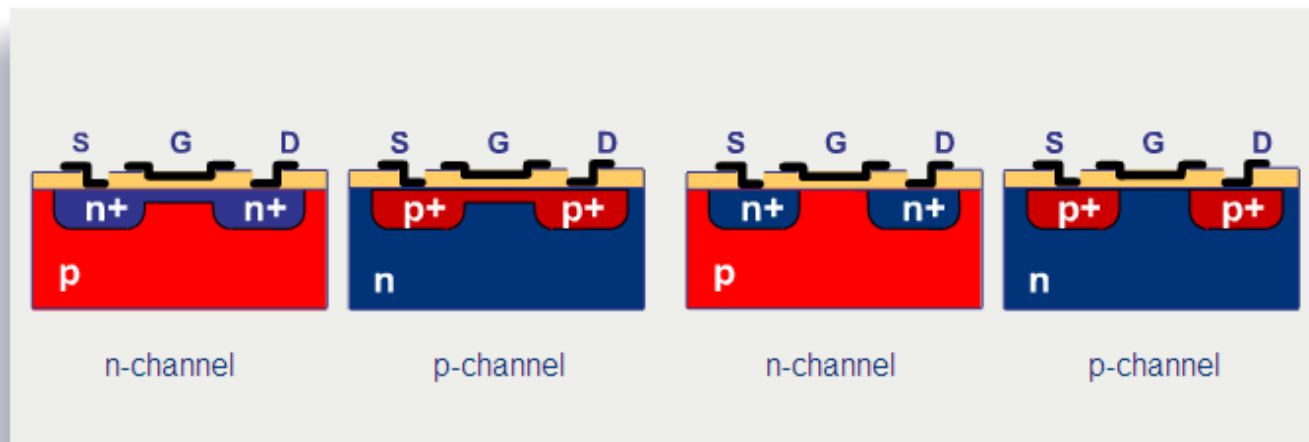


MOSFET с вграден канал

MOSFET с индуциран канал

Според начина на създаване на канала се различават два типа MOS транзистори. При транзисторите **с вграден канал** проводимият канал под гейта се формира по технологичен начин. В MOS транзисторите с **индуциран канал**, проводящ канал се създава **при прилагане на напрежение** с определена полярност между гейта и подложката.

MOS транзистор с N- и P-канал



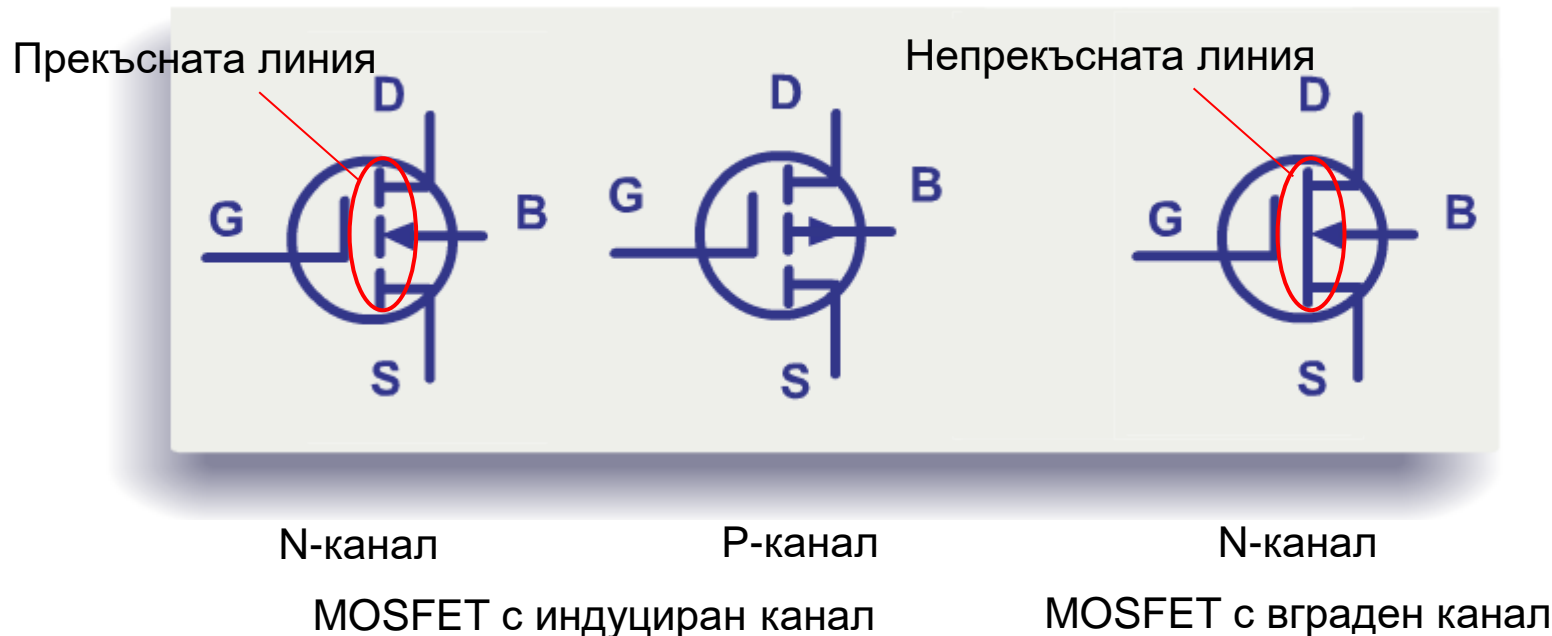
MOSFET с вграден канал

MOSFET с индуциран канал

Според проводимостта на канала двата типа MOS транзистори се срещат с **n-канал** или с **p-канал**.

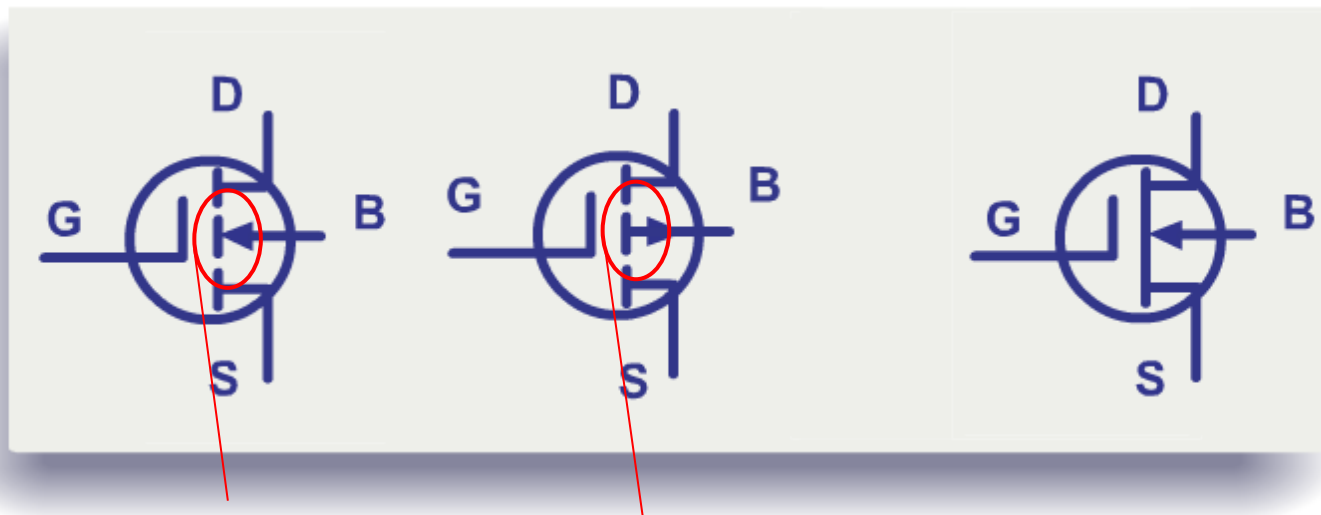
MOS транзисторът е **униполярен** елемент. Действието му се определя **само** от един тип токоносители (**основни**) – електрони или дупки, но никога от двата едновременно.

Условни графични означения



Символите за MOS транзистори с **индуциран канал** имат прекъсната линия между сорса и дрейна (липсва технологично създаден канал), докато за транзисторите с **вграден канал** линията е непрекъсната.

Условни графични означения



N-канал

MOSFET с индуциран канал

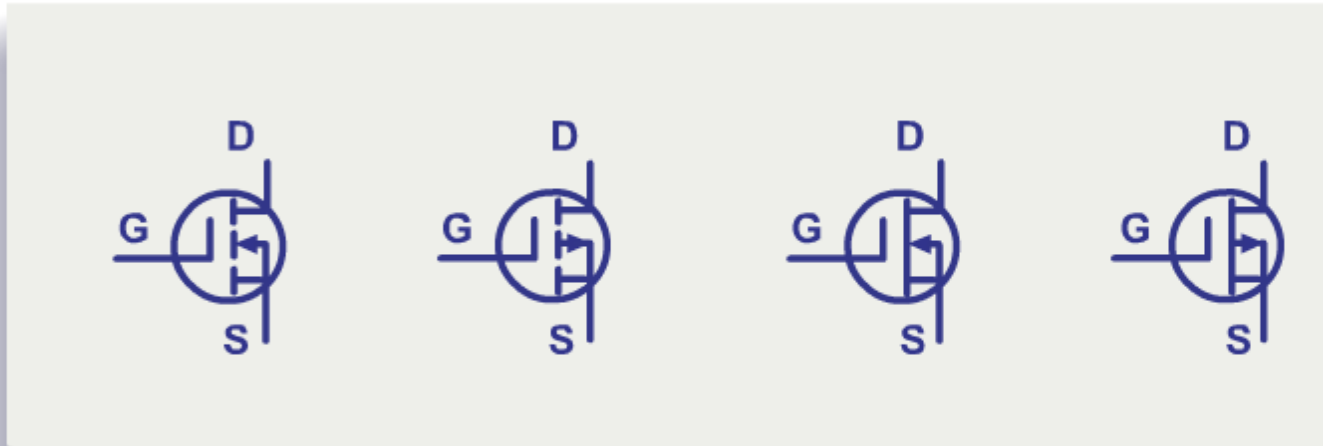
P-канал

N-канал

MOSFET с вграден канал

За **n-каналните** транзистори стрелката към p-подложката сочи **навътре**, докато за **p-каналните** MOSFET стрелката е **навън**.

Символи за дискретни MOSFET



N-канал

P-канал

N-канал

P-канал

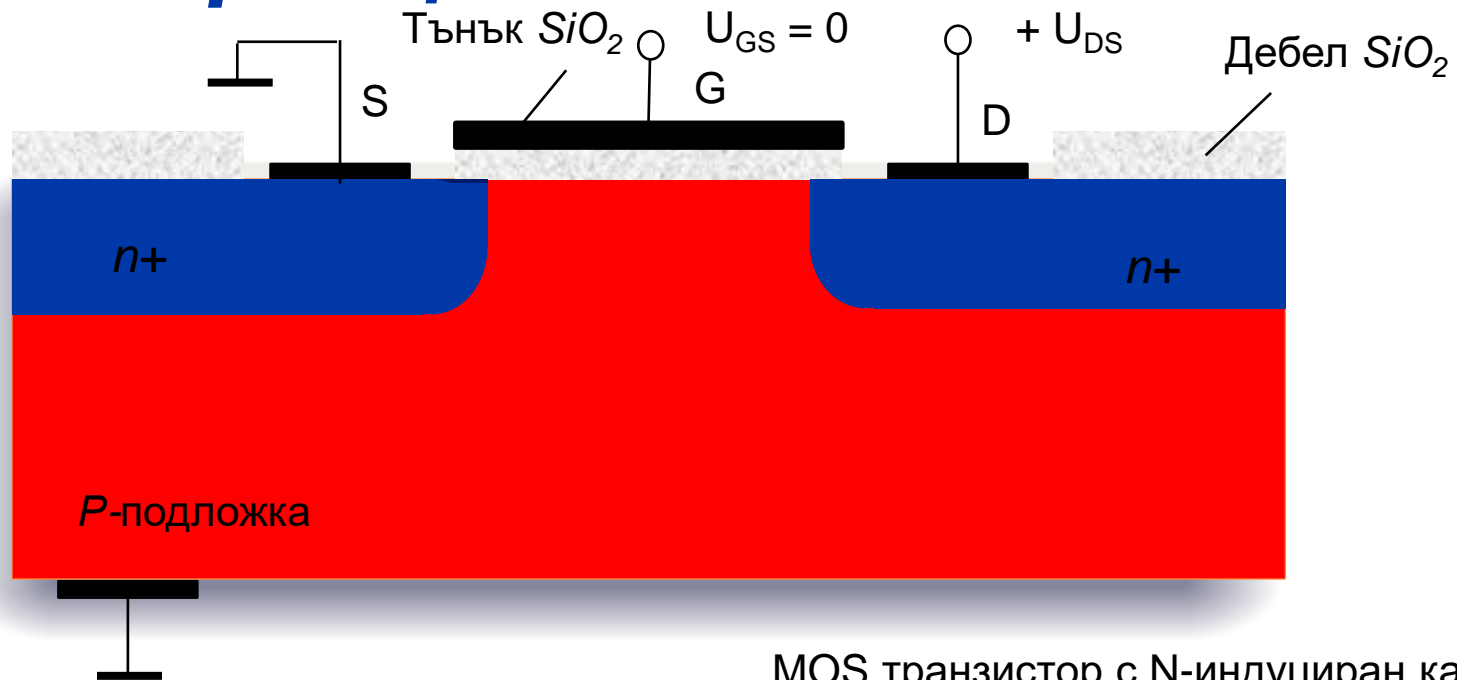
MOSFET с индуциран канал

MOSFET с вграден канал

В някои приложения (в интегралните схеми) на подложката се подава напрежение, с което допълнително се контролира токът през канала.

В повечето приложения (**за дискретни елементи**) подложката се свързва към сорса и транзисторът фактически става с три извода.

Принцип на действие

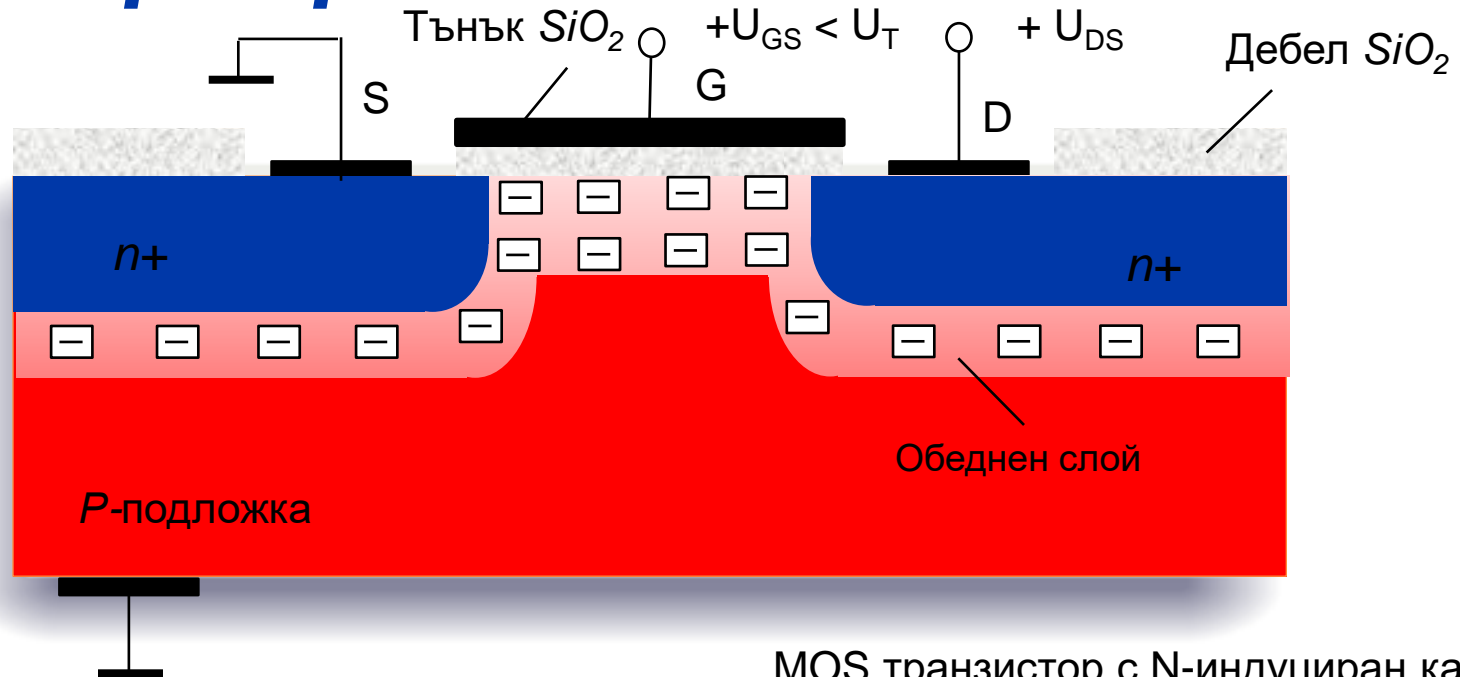


MOS транзистор с N-индуциран канал

Принипът на действие на MOS транзисторите се основава на **полевия ефект** – възможността за промяна на проводимостта на канала между сорса и дрейна чрез напрежение, приложено на гейта.

Когато на гейта не е подадено напрежение ($U_{GS} = 0$), във веригата дрейн-сорс не протича ток, защото тя е прекъсната поради липса на проводящ канал.

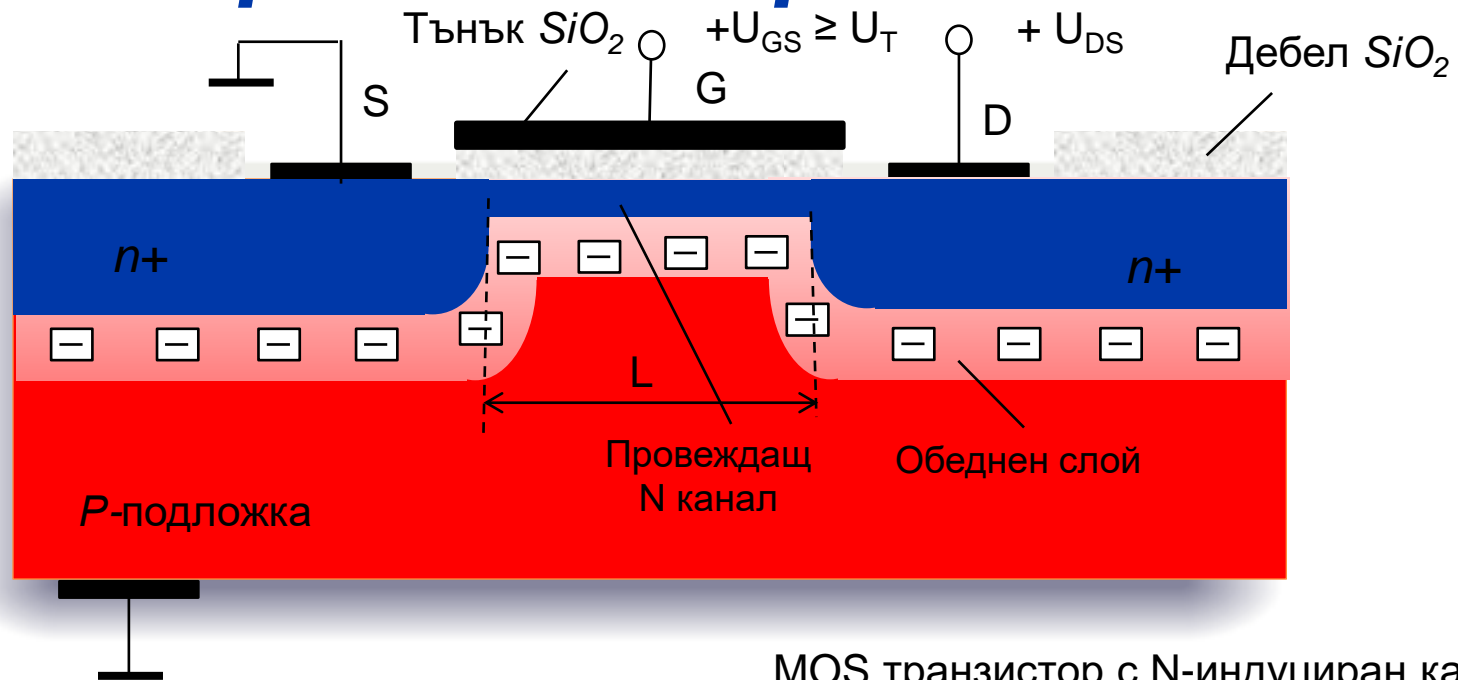
Формиране на обеднен слой



MOS транзистор с N-индуциран канал

При подаване на положително напрежение на гейта ($U_{GS} > 0$) дупките от подложката се отблъскват във вътрешността ѝ. На повърхността се образува **обеднен слой**, който съдържа предимно некомпенсирани заряди на отрицателните акцепторни йони. Ток не тече.

Прагово напрежение



MOS транзистор с N-индуциран канал

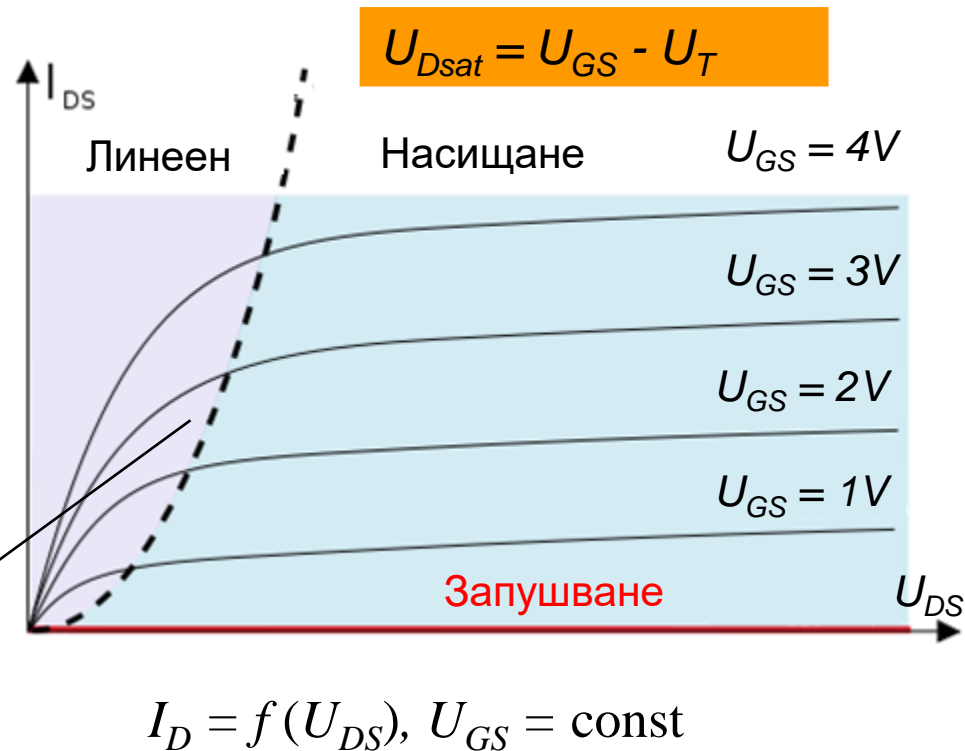
При увеличаване на положителното напрежение U_{GS} към повърхността се привличат електрони, които създават слой с **инверсна** проводимост. Напрежението U_{GS} , при което се създава инверсен слой в подложката и протича минимален дрейнов ток се нарича **прагово напрежение U_T** . Ако $U_{GS} > U_T$ каналът **се обогатява** с токоносители и токът I_D нараства.

Изходни VA характеристики

На фиг. е показано семейството изходни статични характеристики $I_D = f(U_{DS})$ при $U_{GS} = \text{const}$ за MOS транзистор с N- индуциран канал.

В тях се различават две области – **линейна** (омична, триодна) и област на **насищане** (пентодна).

Парабола на насищане

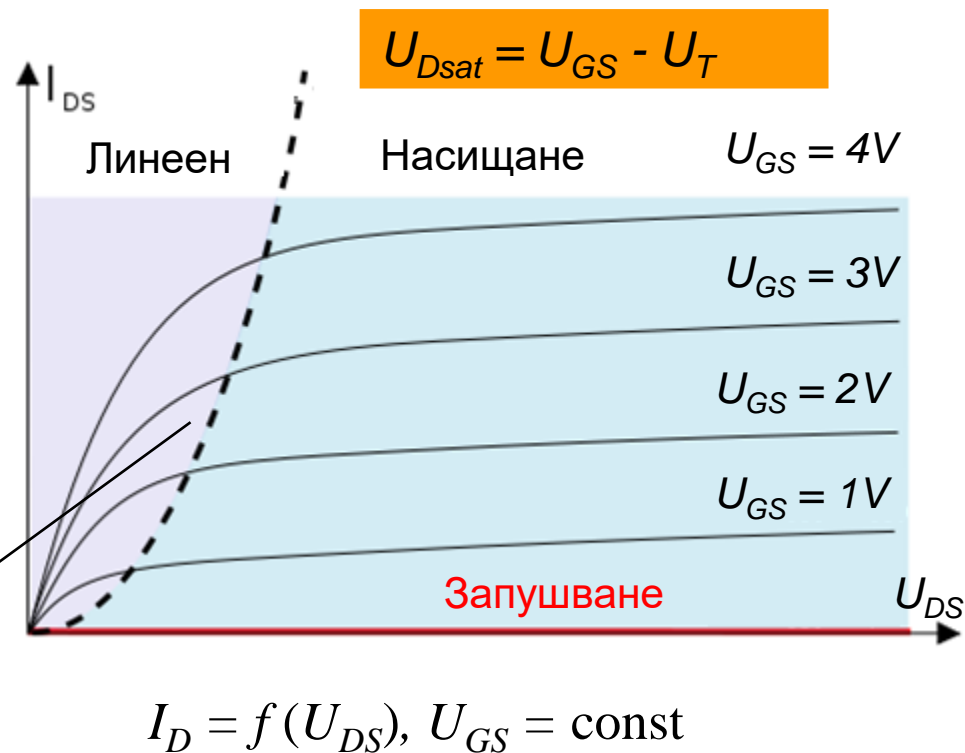


MOS транзисторите с индуциран канал работят **само в режим на обогатяване**.

Линейна област

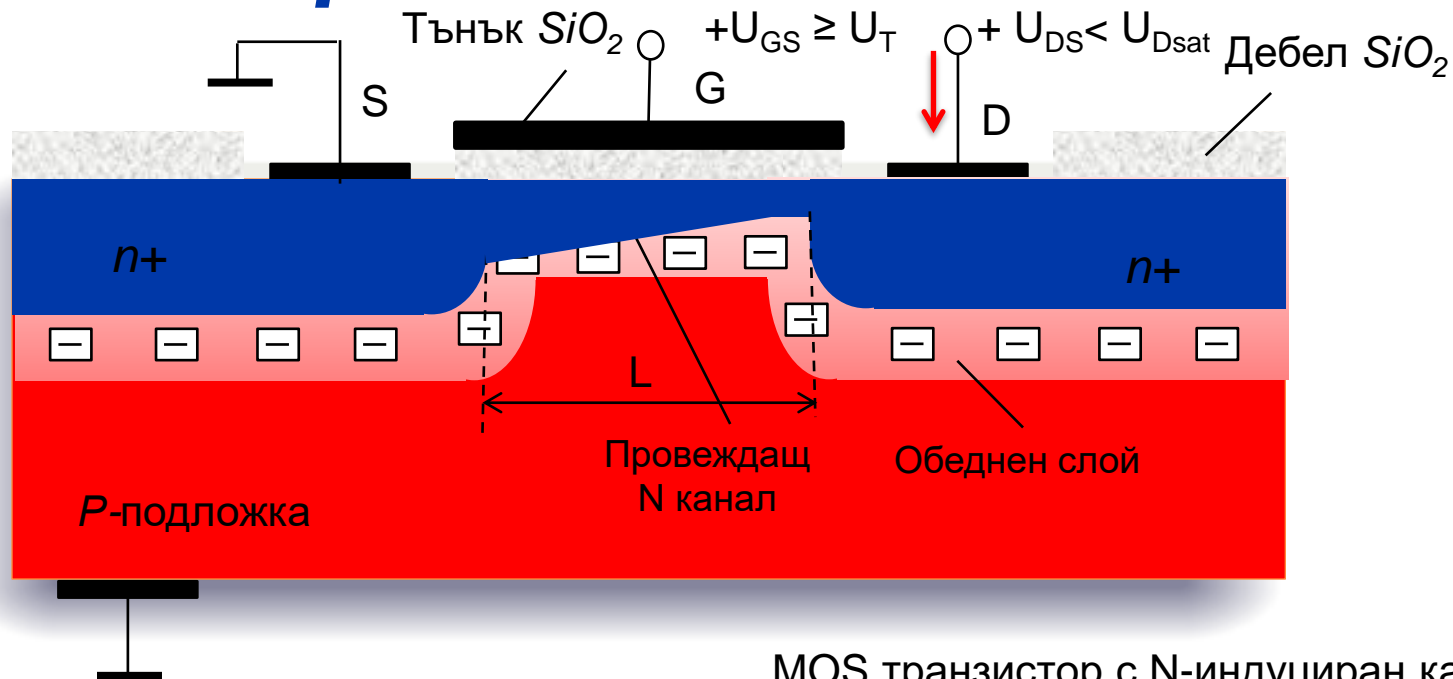
При по-голямо увеличение на U_{DS} , съответно нараства и I_D . Протичането на тока в канала предизвиква вътрешен пад на напрежението върху омичното съпротивление на канала, което довежда до отклонение от линейната зависимост между дрейновите ток и напрежение.

Парабола на насищане



В линейната област с увеличаване напрежението на дрейна U_{DS} **ТОКЪТ** I_D **нараства линейно**.

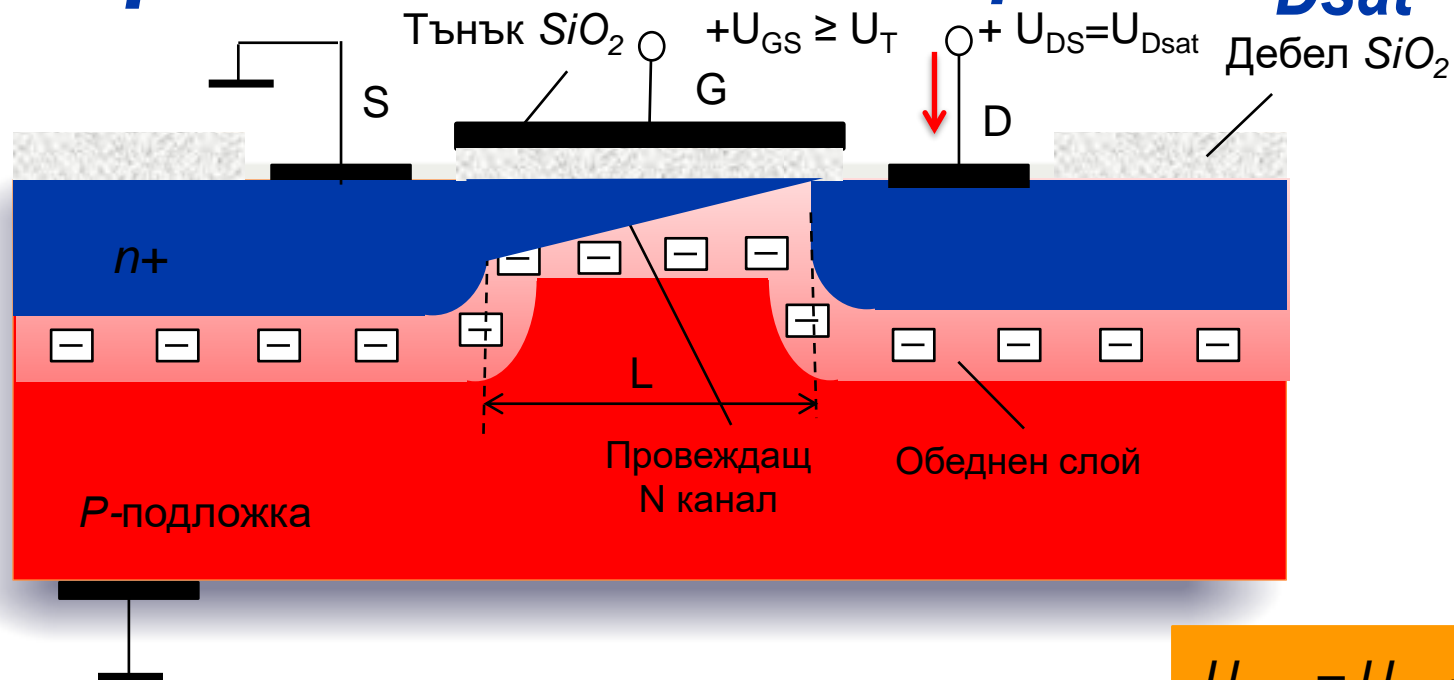
Вътрешен пад в канала



MOS транзистор с N-индуциран канал

Омичното съпротивление на канала нараства с увеличаване на дължината на канала от **S** към **D**, като нараства и падът върху него. Напрежението, което индуцира канала, е разлика между постоянното U_{GS} и вътрешния пад в канала и съответно намалява от **S** към **D**. Това довежда до изменение на сечението на канала.

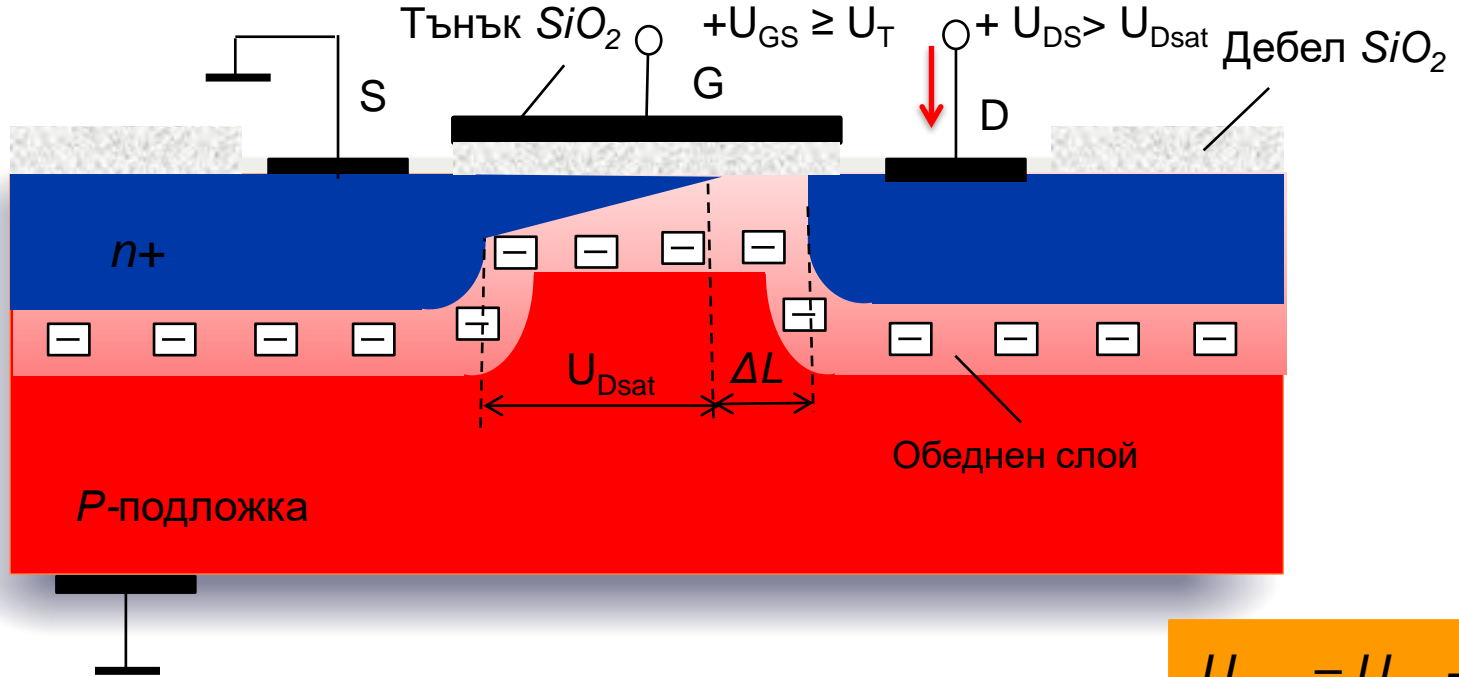
Напрежение на насищане U_{Dsat}



$$U_{Dsat} = U_{GS} - U_T$$

При достигане на напрежението на насищане U_{Dsat} каналът в областта до дрейна се “прищипва”, защото индуциращото го напрежение в тази точка става равно на праговото. По-нататъшното увеличаване на U_{DS} води до насищане на тока I_D . Това е областта на **насищане** (пентодна).

Режим на насищане



$$U_{Dsat} = U_{GS} - U_T$$

Ако $U_{DS} > U_{Dsat}$ каналът се скъсява, като напрежението върху него остава постоянно и равно на U_{Dsat} , което определя постоянния ток I_{Dsat} . Разликата $\Delta U_D = U_{DS} - U_{Dsat}$ пада върху обеднената област с дължина ΔL . Протичането на ток се дължи на екстракцията на електроните от канала и дрейфовото им движение през обеднената област до дрейна.

Уравнения на дрейновия ток

Линеен режим $U_{DS} < U_{Dsat}$

$$U_{Dsat} = U_{GS} - U_T$$

$$I_D = \frac{\mu_{eff} C_0 W}{L} \left[(U_{GS} - U_T) U_{DS} - \frac{1}{2} U_{DS}^2 \right]$$

$$k = \frac{\mu_{eff} C_0 W}{L}, \frac{mA}{V^2}$$

Специфична стръмност

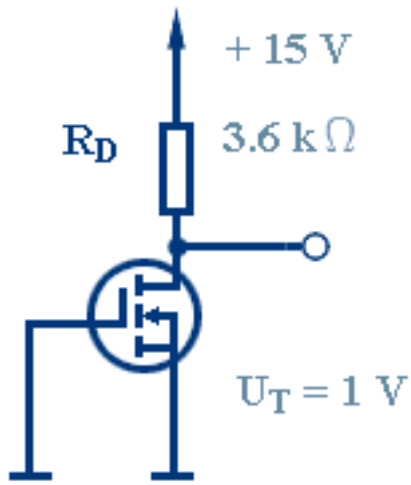
$$I_D = k \left[(U_{GS} - U_T) U_{DS} - \frac{1}{2} U_{DS}^2 \right]$$

Режим на насищане $U_{DS} \geq U_{Dsat}$

$$I_D = \frac{1}{2} k U_{Dsat}^2$$

$$I_D = \frac{k}{2} (U_{GS} - U_T)^2$$

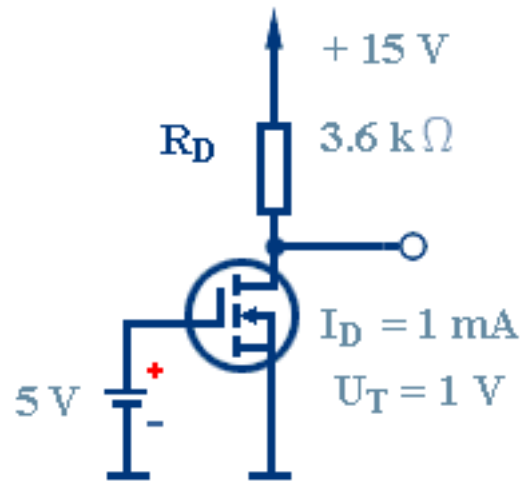
Примери



Режим на работа?

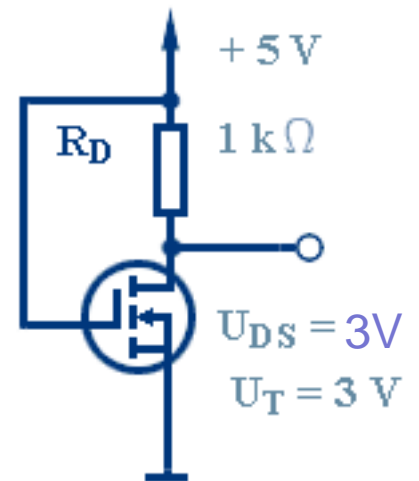
$$I_D = ?$$

$$U_{DS} = ?$$



Режим на работа?

$$U_{DS} = ? k = ?$$

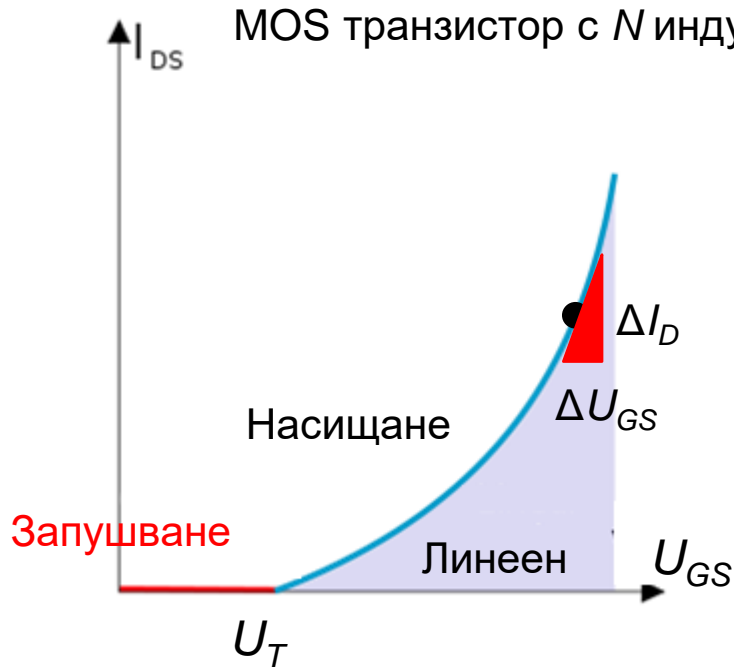


Режим на работа?

$$I_D = ?$$

$$k = ?$$

Предавателна характеристика



$$I_D = f(U_{GS}), U_{DS} = \text{const}$$

Стръмност на предавателната характеристика g_m , (S)

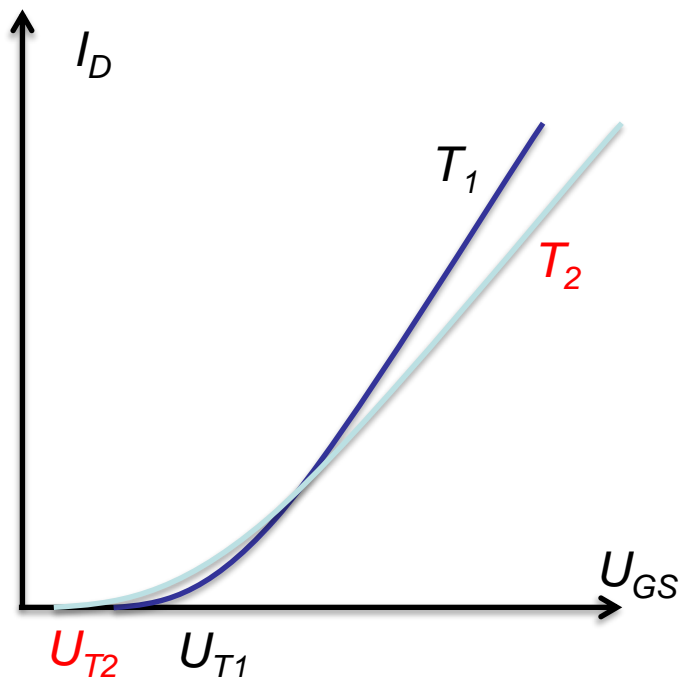
$$g_m = S = \frac{dI_D}{dU_{GS}} = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}}, U_{DS} = \text{const}$$

$$g_m = kU_{DS} \quad \text{за линеен режим}$$

$$g_m = k(U_{GS} - U_T) \quad \text{за насищане}$$

Влияние на температурата

$$I_D = f(U_{GS}), U_{DS} = \text{const}$$



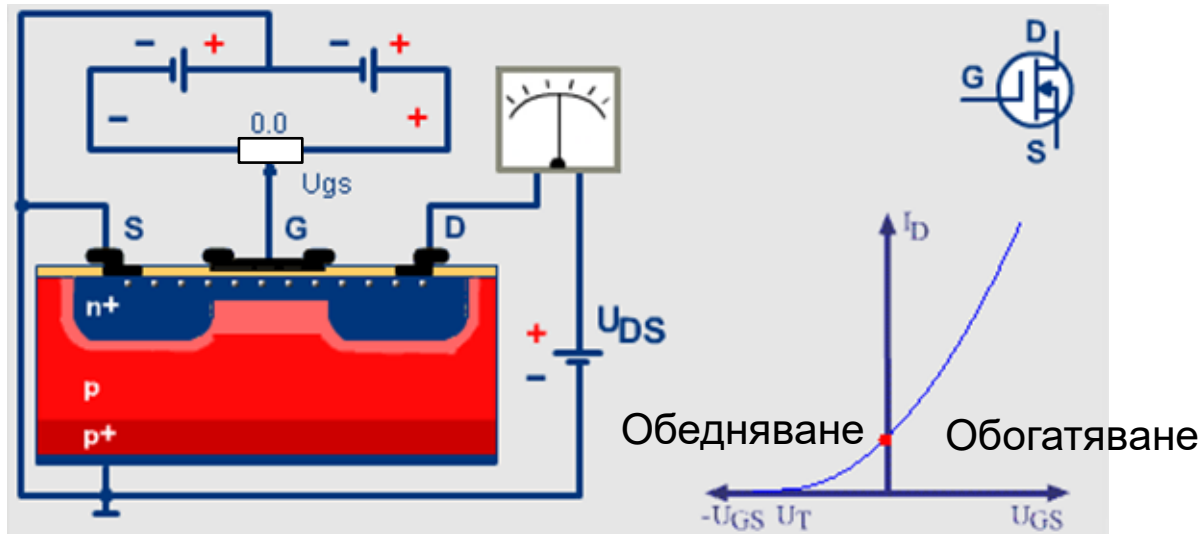
При повишаване на температурата се:

- ✚ **Намалява праговото напрежение** U_T , което предизвиква увеличаване на I_D
- ✚ **Намалява подвижността** на токоносителите μ_n , което предизвиква намаляване на тока I_D .
- ✚ В резултат MOS транзисторите имат **термостабилна точка**.

MOS транзистор с N индуциран канал

При MOS транзисторите с повишаване на температурата има област от характеристиката, където токът намалява. Поради това при мощните MOS транзистори не възникват проблеми, характерни за мощните биполярни.

MOS транзистор с вграден канал

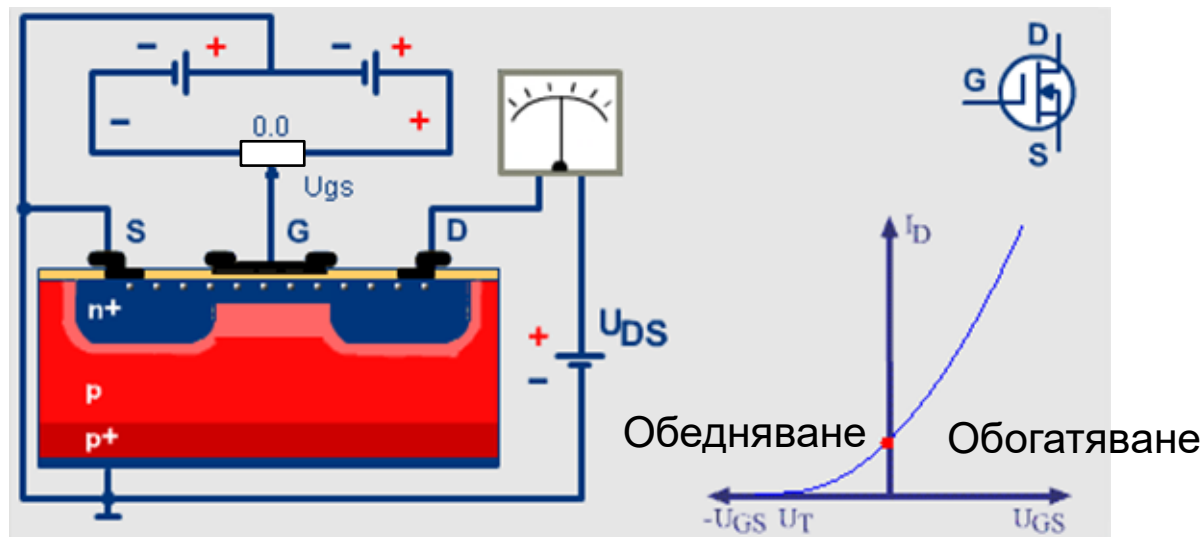


MOS транзистор с N
вграден канал

MOS транзисторът с вграден канал е отпушен при $U_{GS} = 0 \text{ V}$ защото каналът е създаден при производството му.

Количеството на токоносители в канала (проводимостта му) зависи от поляритета на приложеното напрежение на гейта.

Принцип на действие

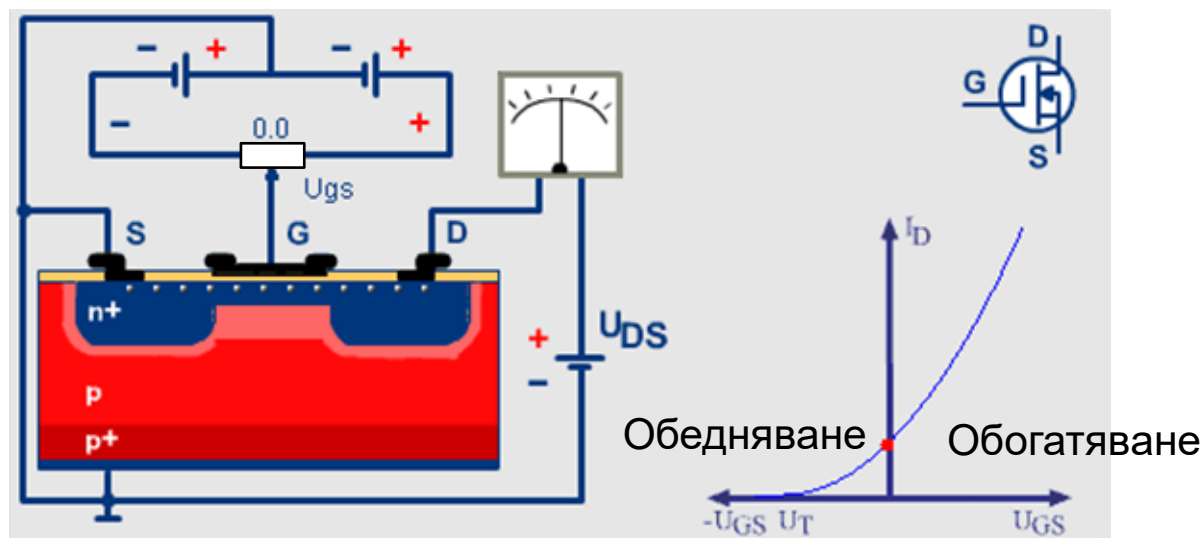


MOS транзистор с N
вграден канал

При положително напрежение $U_{GS} > 0$ се привличат електрони, каналът се **обогатява** с токоносители и проводимостта му, респективно токът расте.

Ако напрежението е отрицателно $U_{GS} < 0$ електроните се отблъскват от повърхността, каналът **обеднява** на токоносители и токът намалява.

Прагово напрежение



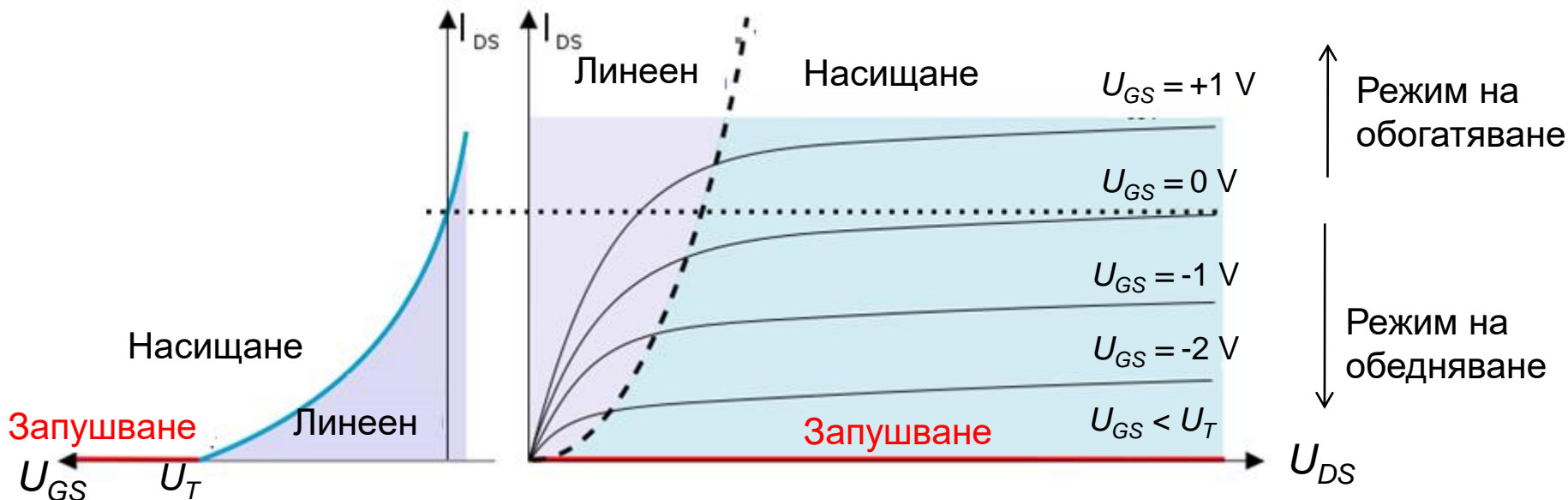
MOS транзистор с N
вграден канал

MOS транзисторът с вграден канал е отпушен при $U_{GS} = 0 \text{ V}$ защото каналът е създаден при производството му.

Количеството на токоносители в канала (проводимостта му) зависи от поляритета на приложеното напрежение на гейта.

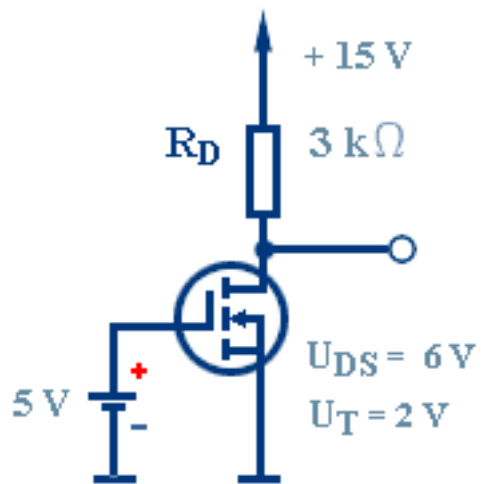
VA характеристики

MOS транзистор с N вграден канал



При $U_{GS} = 0\text{ V}$ протича ток. При $U_{GS} > 0$ транзисторът работи в **режим на обогатяване** и токът I_D расте с нарастване на U_{GS} . При $U_{GS} < 0$ транзисторът работи в **режим на обедняване** и I_D намалява. При определена стойност на напрежението U_{GS} , наречено **прагово напрежение** или **напрежение на запусване**, каналът изчезва и транзисторът се запушва.

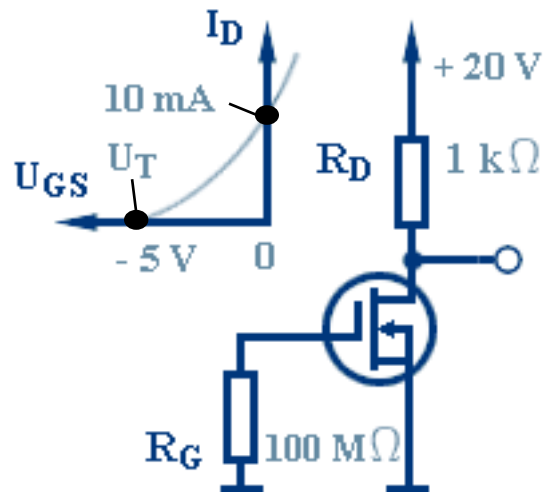
Примери



Режим на работа?

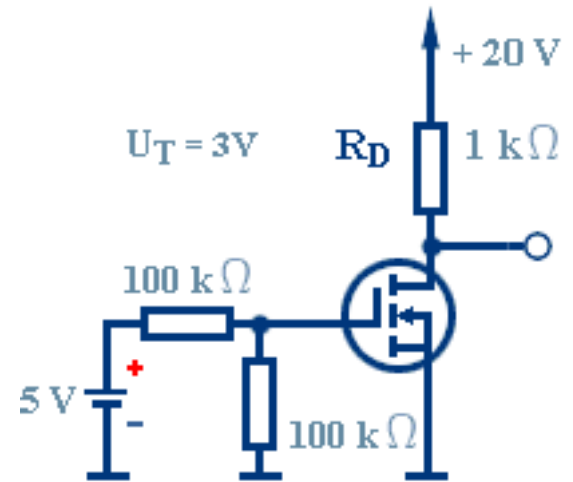
$$I_D = ?$$

$$k = ?$$



Режим на работа?

$$U_{DS} = ?$$

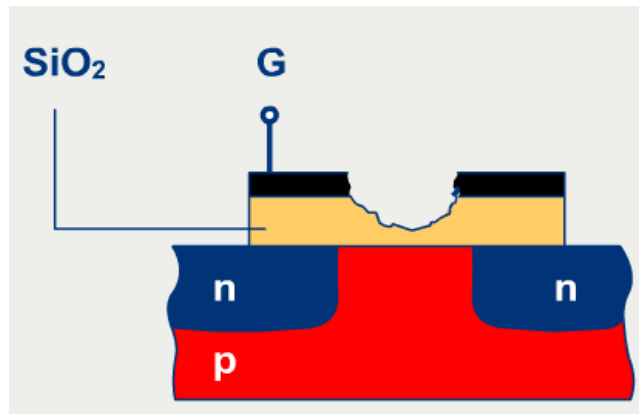
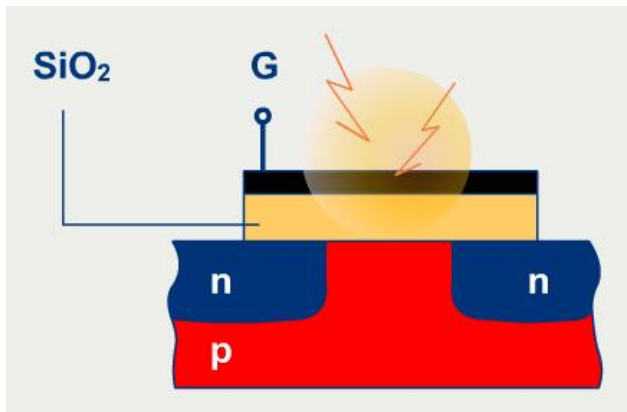


Режим на работа?

$$I_D = ?$$

$$U_{DS} = ?$$

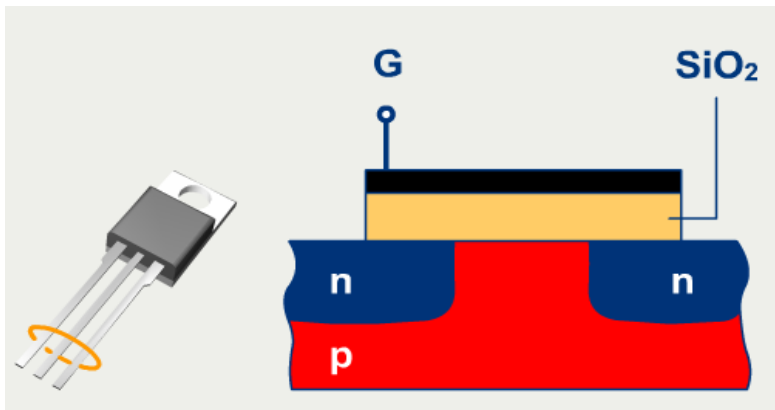
Пробив в окиса



Ако стойността на напрегнатостта на полето, създадено от U_{GS} стане прекалено голяма, тогава настъпва пробив в изолатора под гейта. Този пробив е **разрушителен** и транзисторът преставя да функционира.

Пробив в окиса настъпва, когато транзисторът не е свързан в схема. Поради много високото входно съпротивление, **статичните заряди**, натрупани върху гейта, могат да предизвикат напрегнатост на полето, достатъчна, за да настъпи пробив в тънкия окис.

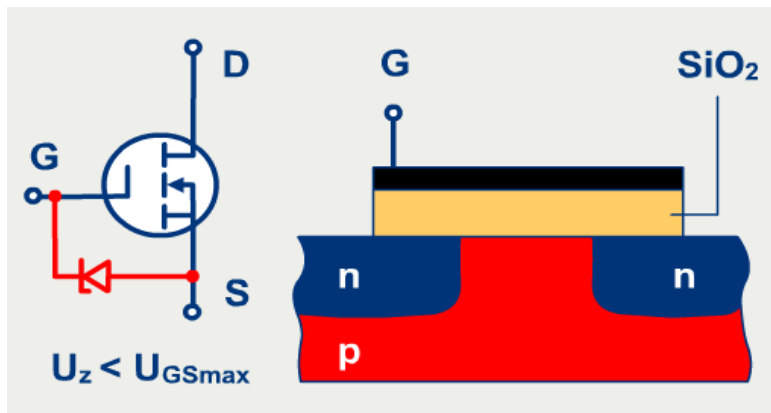
Защита на MOS транзистор



Пробив в окиса настъпва, когато транзисторът не е свързан в схема. Поради много високото входно съпротивление, **статичните заряди**, натрупани върху гейта, могат да предизвикат напрегнатост на полето, достатъчна, за да настъпи пробив в тънкия окис.

За да се предпазят транзисторите от натрупване на статични заряди, те се съхраняват, обвити във фолио като изводите им се свързват накъсо. Това свързване не трябва да се премахва до включване на MOS транзистора в схемата. При работа с MOS транзистори се заземява не само поялникът, но и човекът, работещ с транзисторите.

Защита на MOS транзистор



Някои транзистори имат фабрична защита с Ценеров диод, чието пробивно напрежение е по-малко от напрежението на пробив на окиса. Диодът сработва само, ако се превиши пробивното напрежение, защитавайки транзистора.

Основни параметри

- ✚ **Прагово напрежение U_T** -- определя се от конструктивно-технологични параметри на структурата.
 - ✚ **Стърмност на предавателната характеристика $g_m(S)$** – характерен параметър, който изразява усилвателните свойства на MOS транзистора.
 - ✚ **Динамично изходно съпротивление** – определя се от изходните характеристики.
 - ✚ **Входен ток** ($10^{-13} - 10^{-8}$ A) – дължи се на утечки през диелектрика и по повърхността.
 - ✚ **Входно съпротивление по постоянен ток** – ($10^9 - 10^{16}$ Ω)
 - ✚ **Капацитети C_{GB} , C_{GS} , C_{GD} , C_{DB} , C_{SB}** и капацитети на припокриване C_{RS} , C_{RD}
-

Еквивалентна схема

