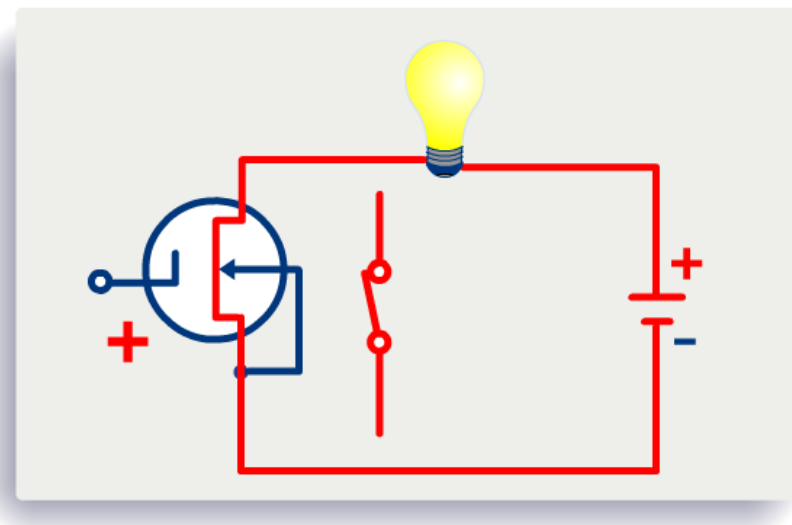
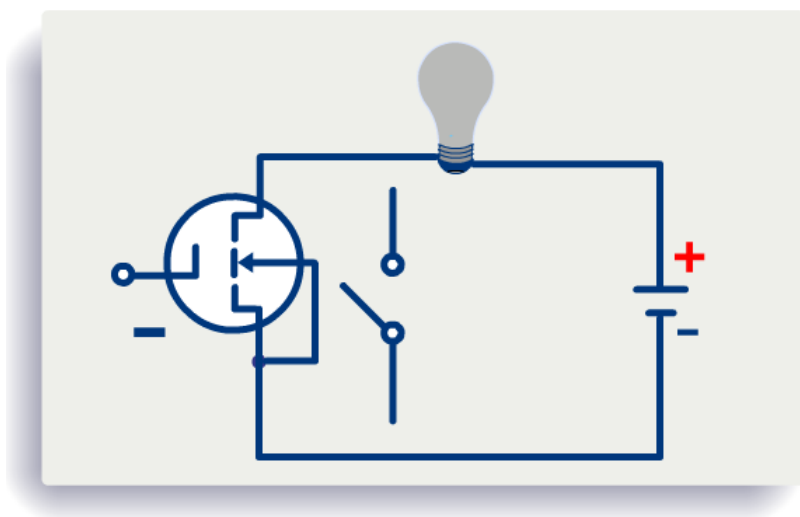




MOS транзистори



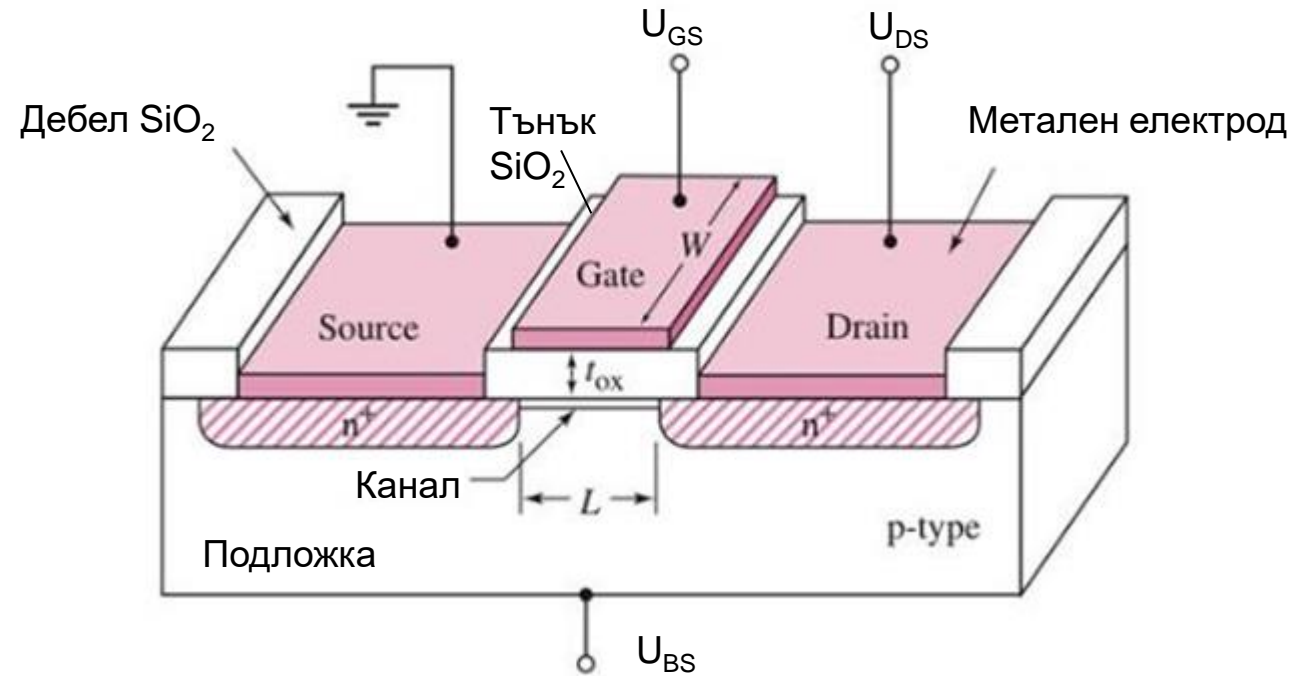
Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor – MOSFET



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.

MOSFET – Структура на латерален транзистор



MOS транзисторът има четири области – сорс (**source** – S), гейт (**gate** – G), дрейн (**drain** – D) и подложка (**body** - B). Гейтът е изолиран от подложката с тънък окис(SiO₂ или Si₃Ni₄) с дебелина t_{ox} . Повърхността на транзистора е покрита с дебел SiO₂.

Между сорса и дрейна се формира канал с дължина L и широчина W . За n-канален транзистор областите на сорса и дрейна са с n⁺-тип проводимост (с висока концентрация на примесите), докато подложката е от p-тип.

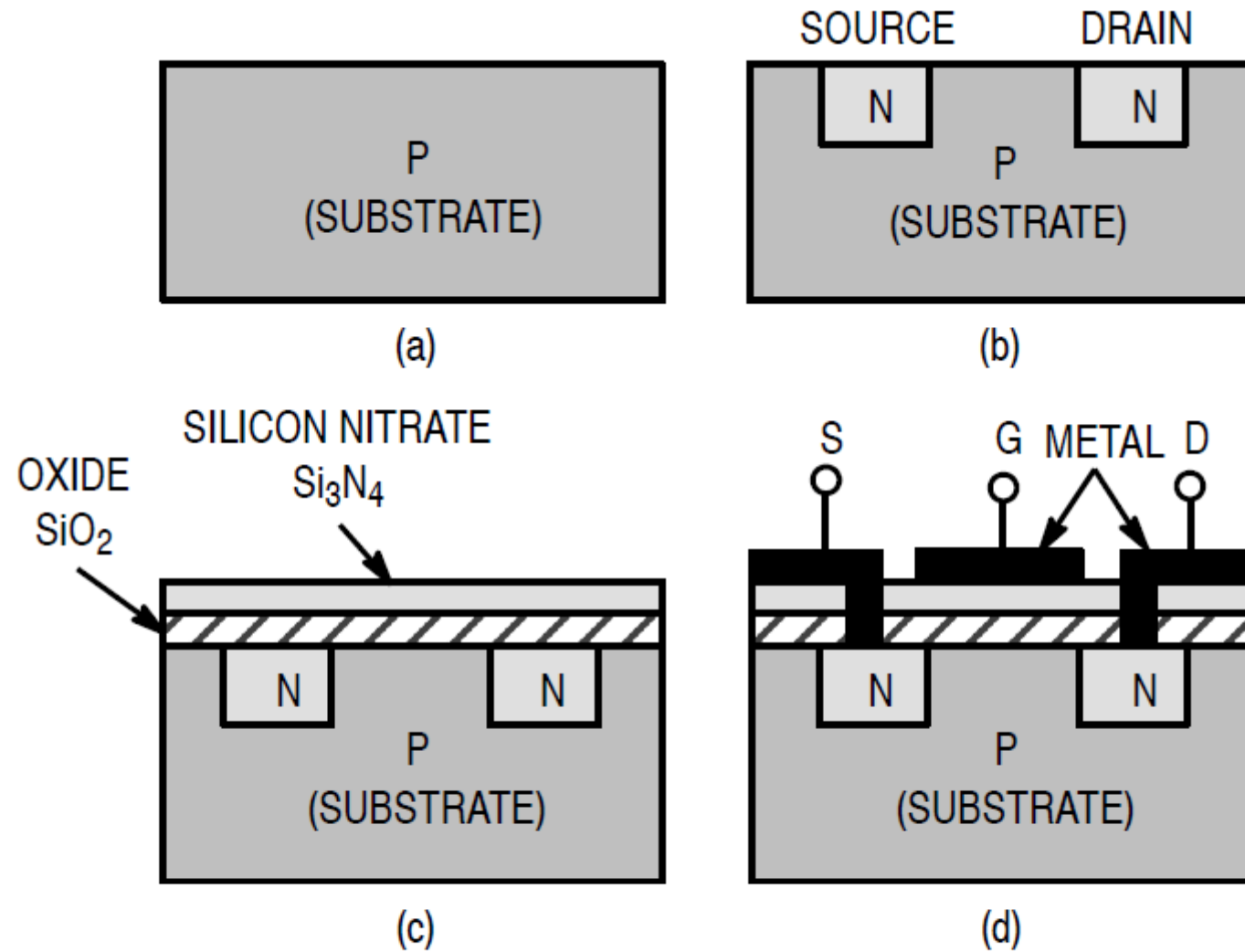
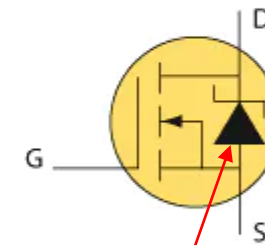
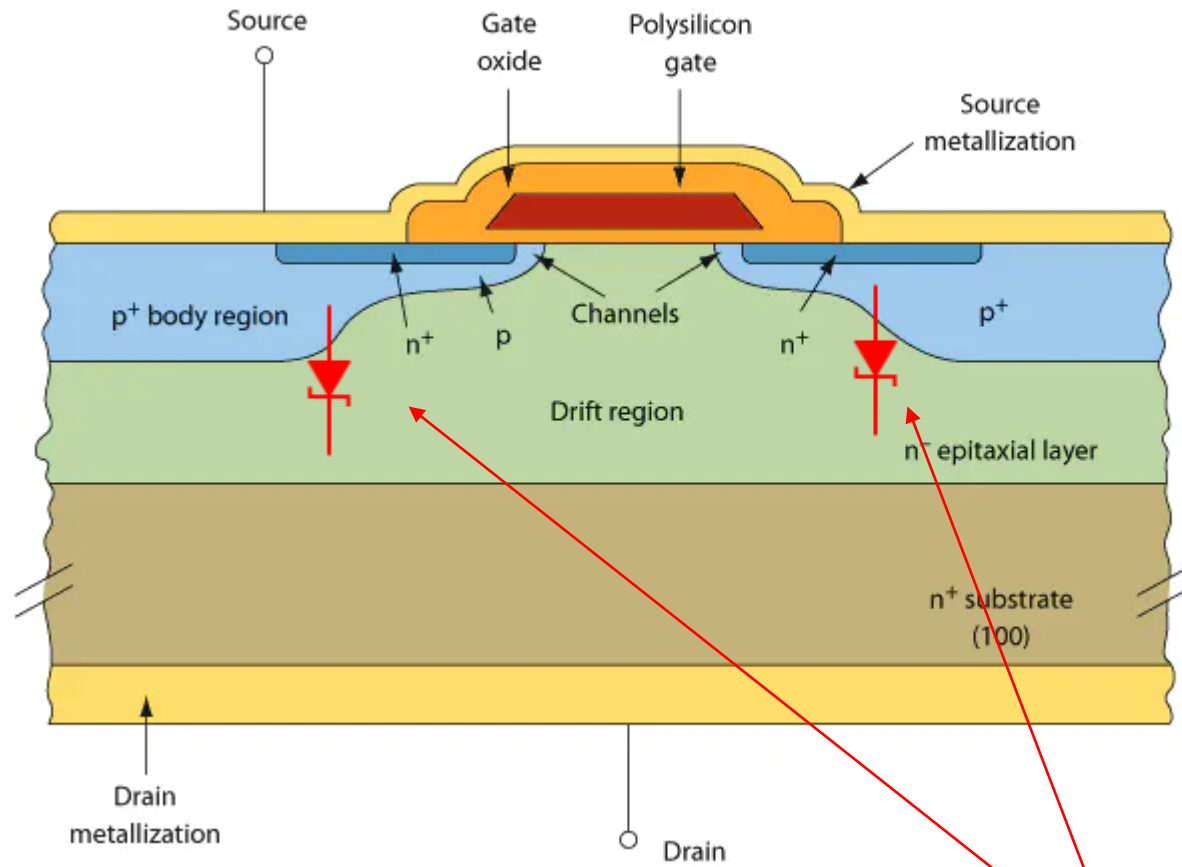


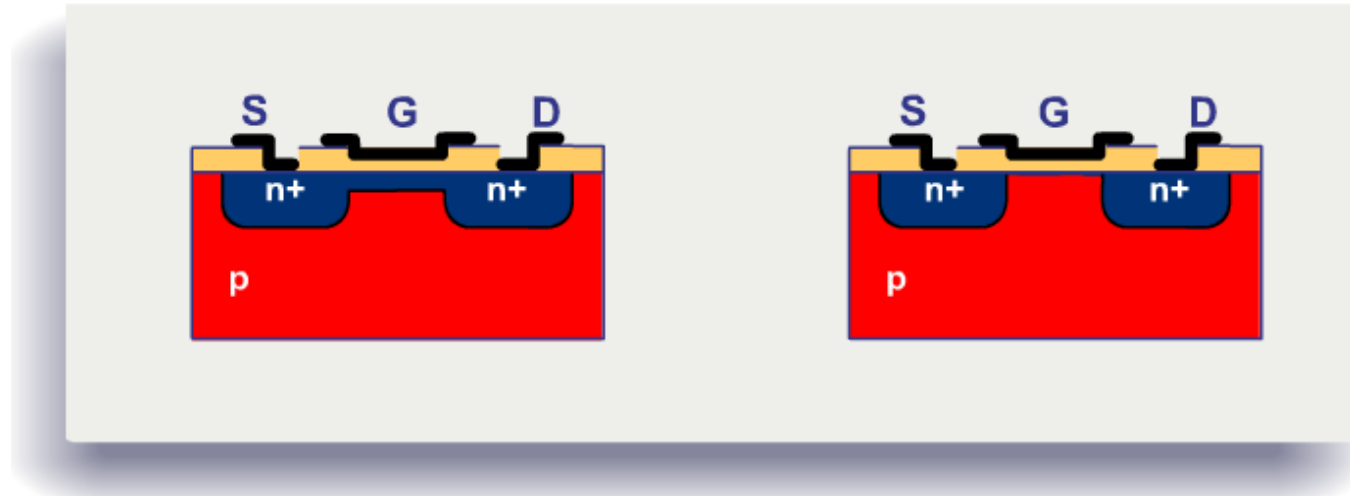
Figure 4. Development of Enhancement-Mode N-Channel MOSFET

MOSFET – Структура на вертикален транзистор



Body Diodes

MOSFET – Вграден и индуциран канал



MOSFET с вграден канал
Depletion MOSFET

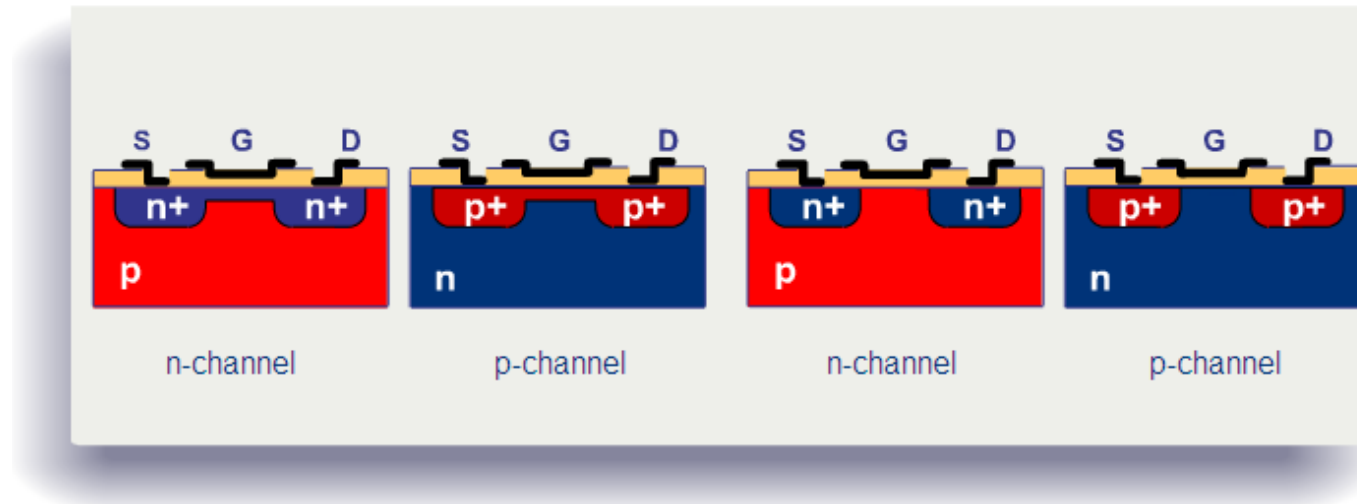
MOSFET с индуциран канал
Enhancement MOSFET

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.

MOSFET – n-канал и p-канал



MOSFET с вграден канал

Depletion MOSFET

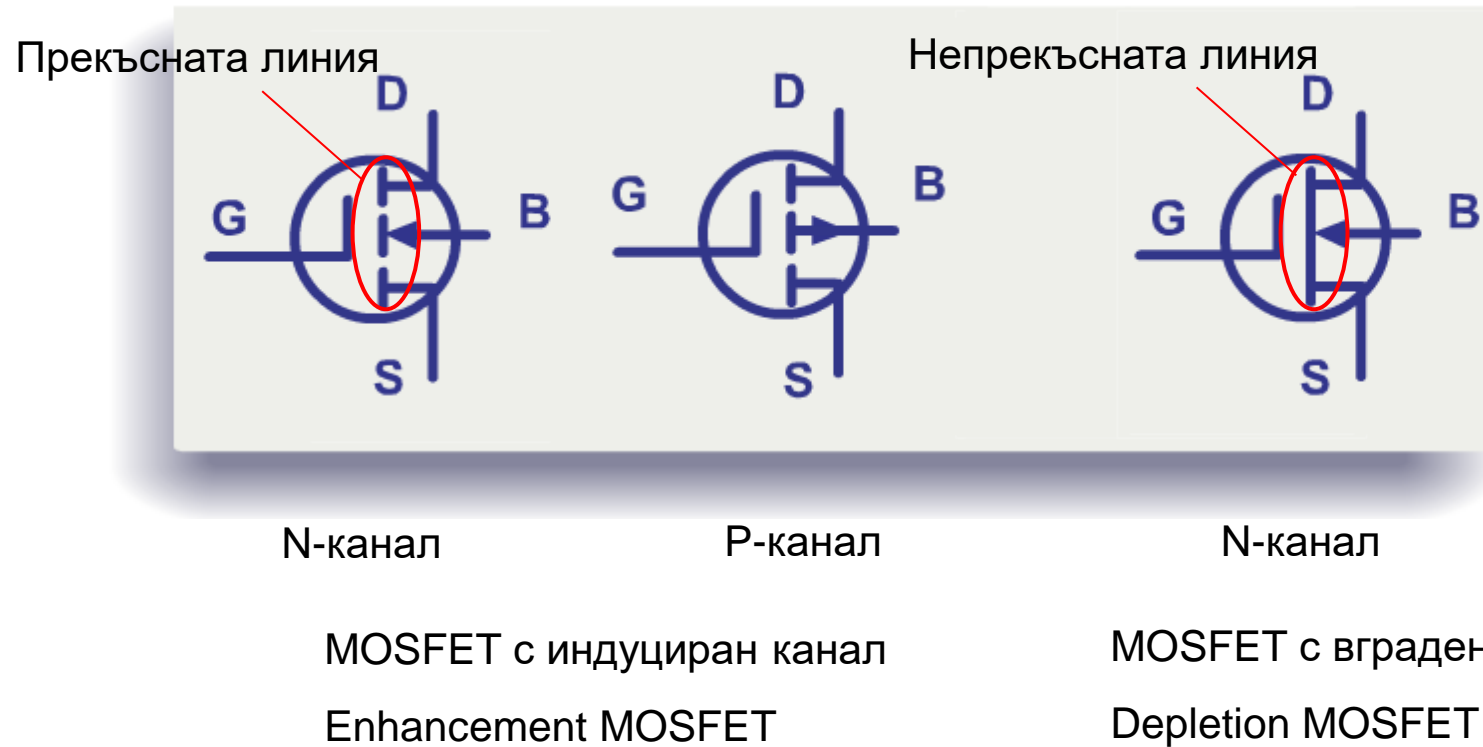
MOSFET с индуциран канал

Enhancement MOSFET

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

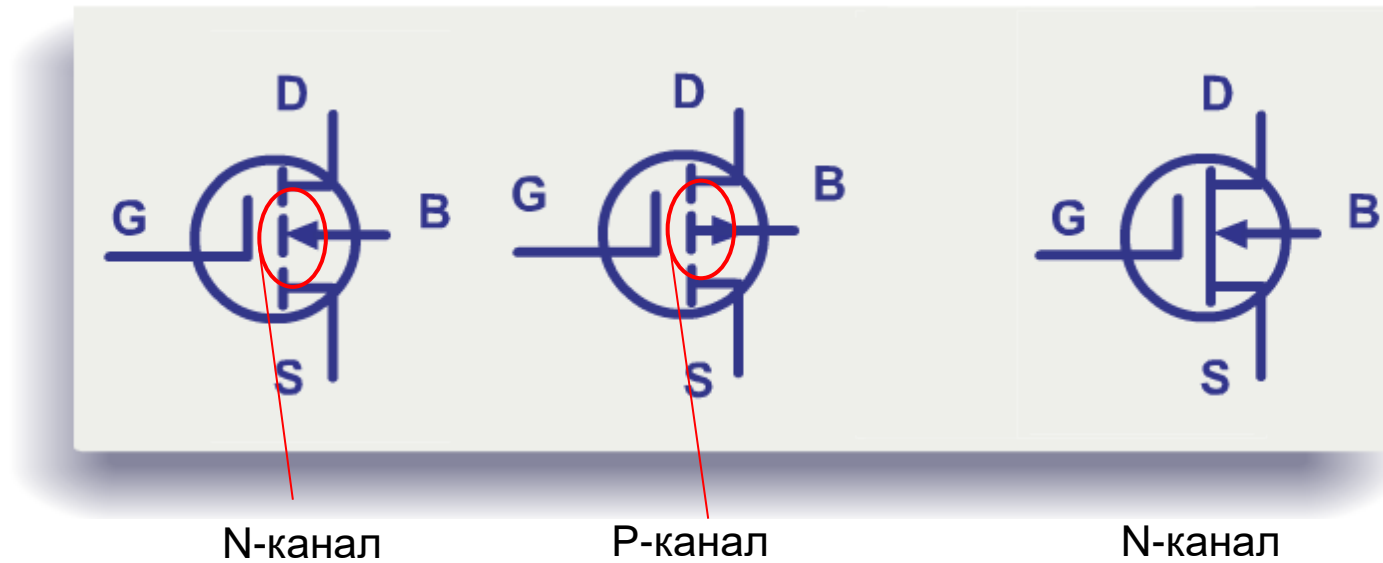
MOS транзисторът е **униполярен** елемент. Действието му се определя **само** от един тип токоносители (**основни**) – електрони или дупки, но никога от двата едновременно.

MOSFET – схемни символи



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.

MOSFET – схемни символи



N-канал

P-канал

N-канал

MOSFET с индуциран канал

MOSFET с вграден канал

Enhancement MOSFET

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

MOSFET – схемни символи



N-канал

MOSFET с индуциран канал

Enhancement MOSFET



P-канал



N-канал

MOSFET с вграден канал

Depletion MOSFET

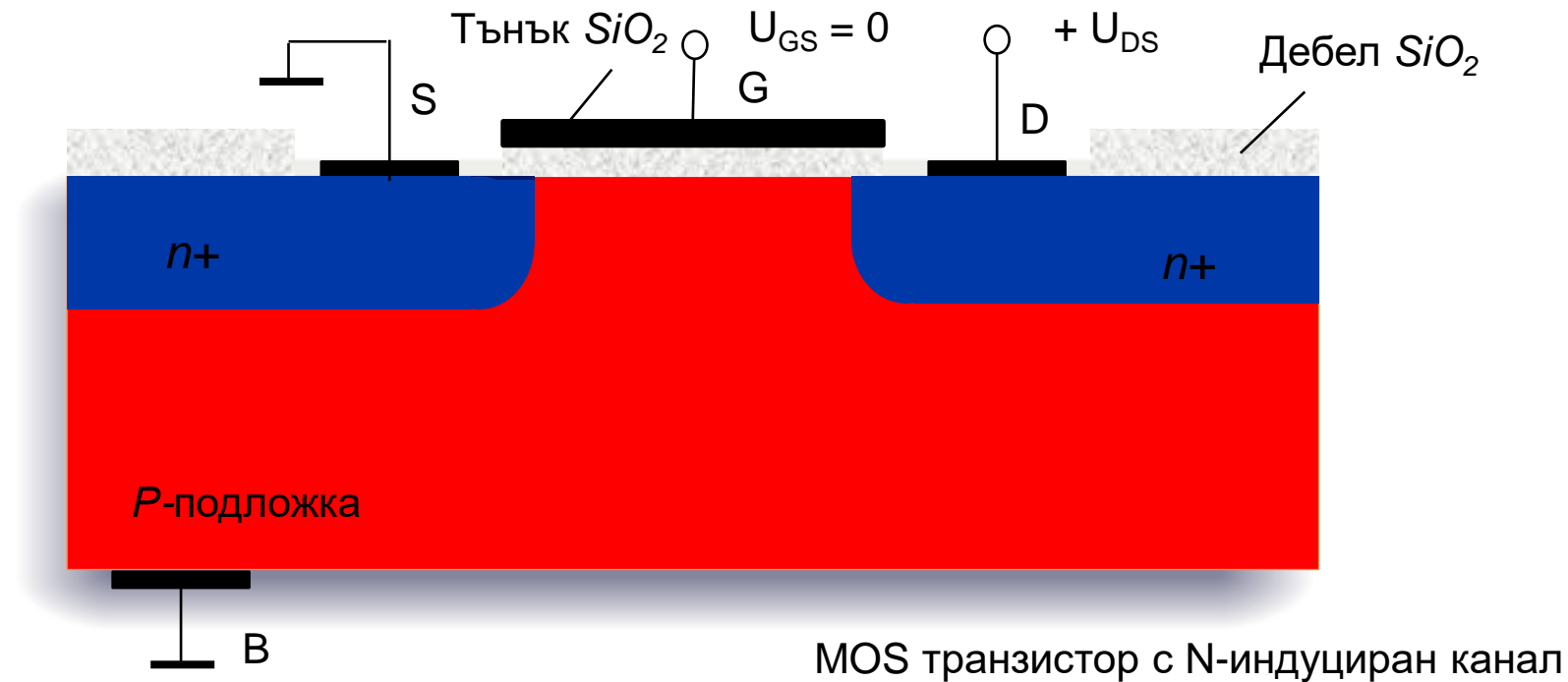


P-канал

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.

MOSFET – принцип на действие

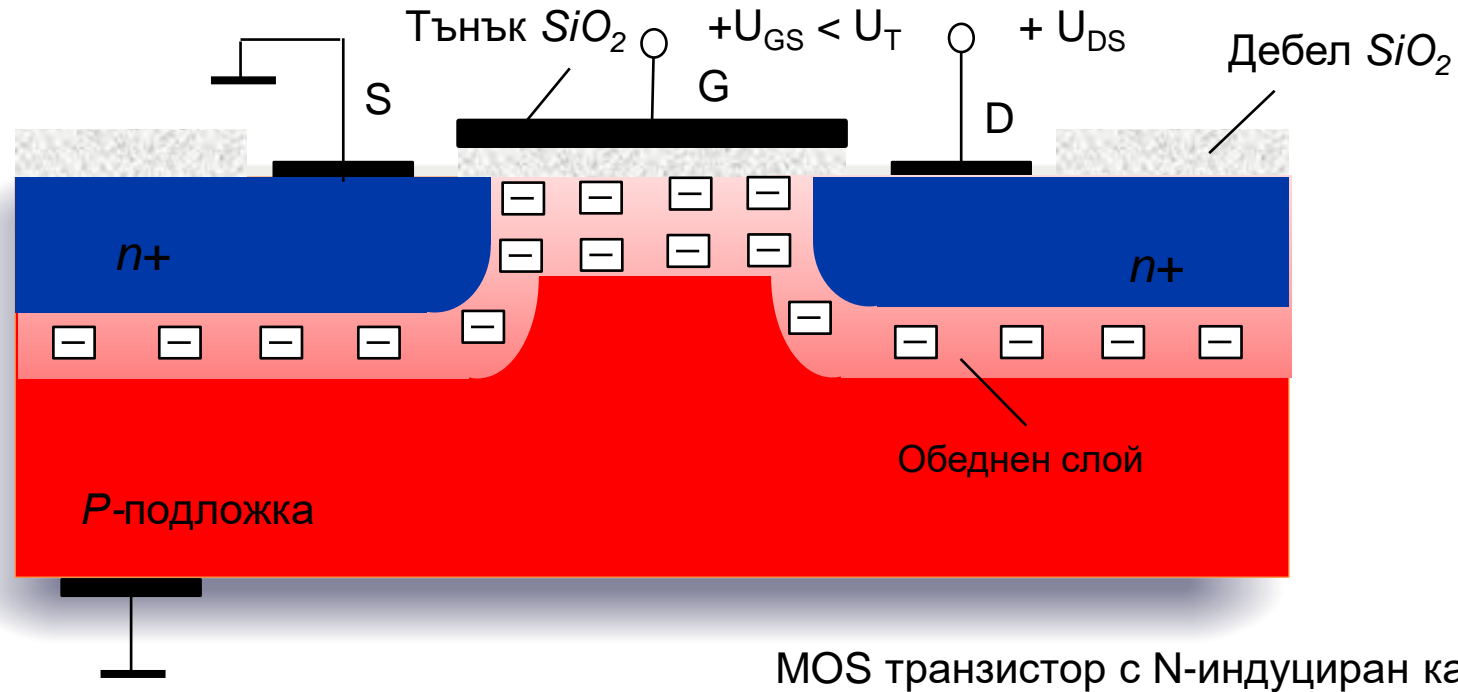


Принипът на действие на MOS транзисторите се основава на **полевия ефект** – възможност за промяна на проводимостта на канала между сорса и дрейна чрез напрежение, приложено между гейт и подложка $U_{GB} = U_{GS}$.

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.

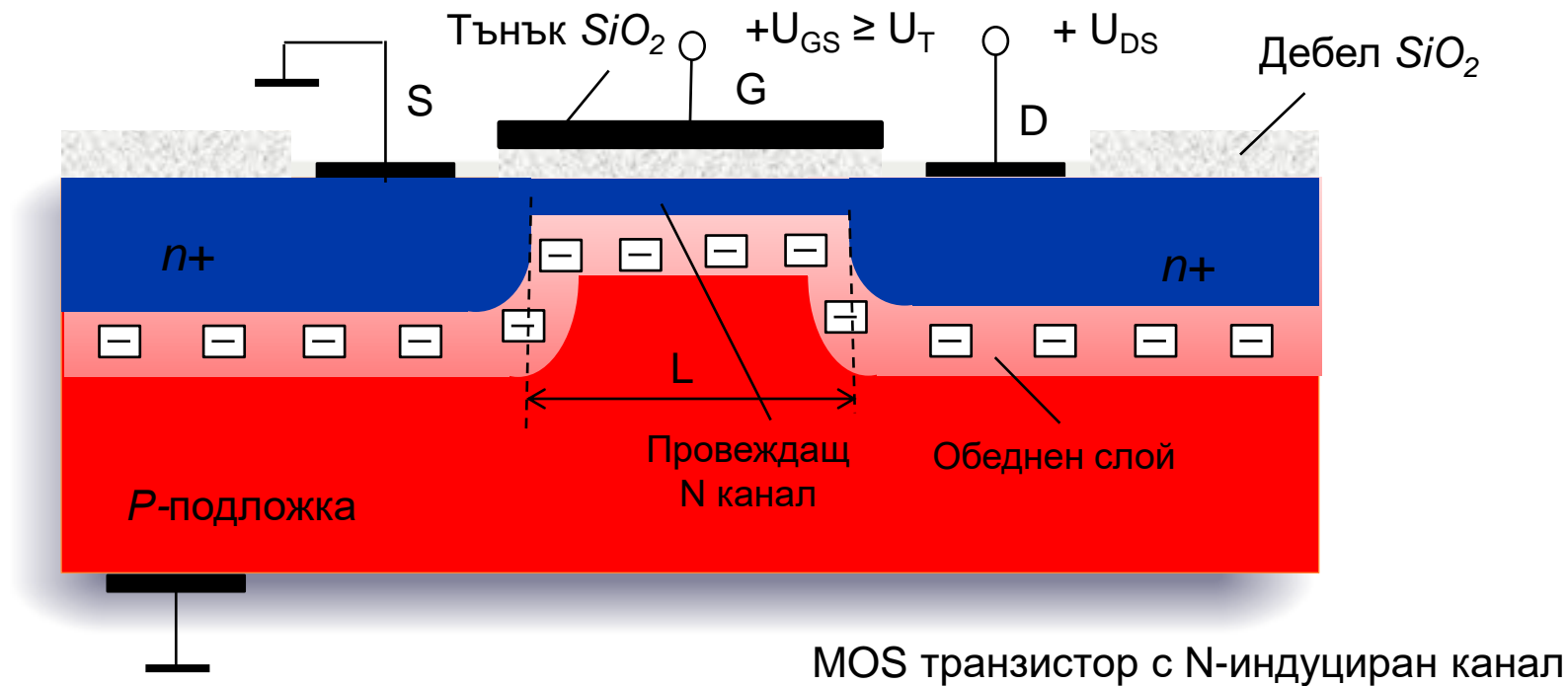
<https://www.youtube.com/watch?v=stM8dgcY1CA>

MOSFET – принцип на действие – обеднен слой



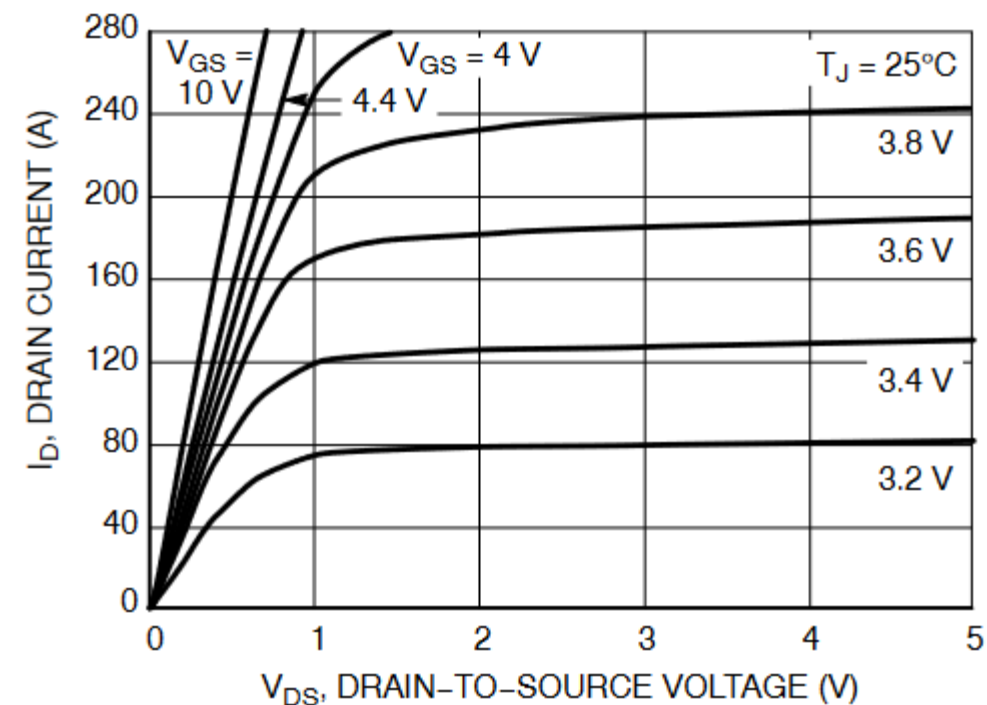
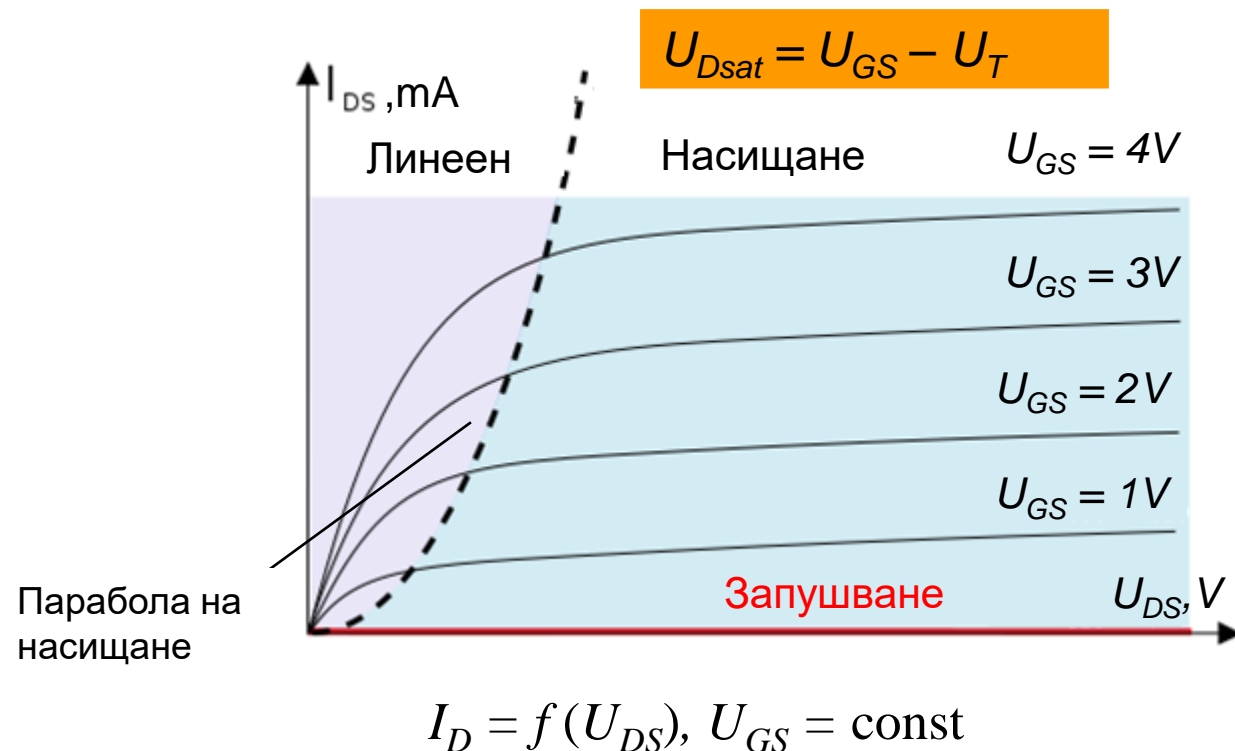
При подаване на положително напрежение на гейта ($U_{GS} > 0$) дупките от подложката се отблъскват във вътрешността ѝ. На повърхността се образува **обеднен слой**, който съдържа предимно некомпенсираните заряди на отрицателните акцепторни йони. Ток не тече.

MOSFET – принцип на действие – прагово напрежение



При увеличаване на положителното напрежение U_{GS} към повърхността се привличат електрони, които създават слой с **инверсна** проводимост.

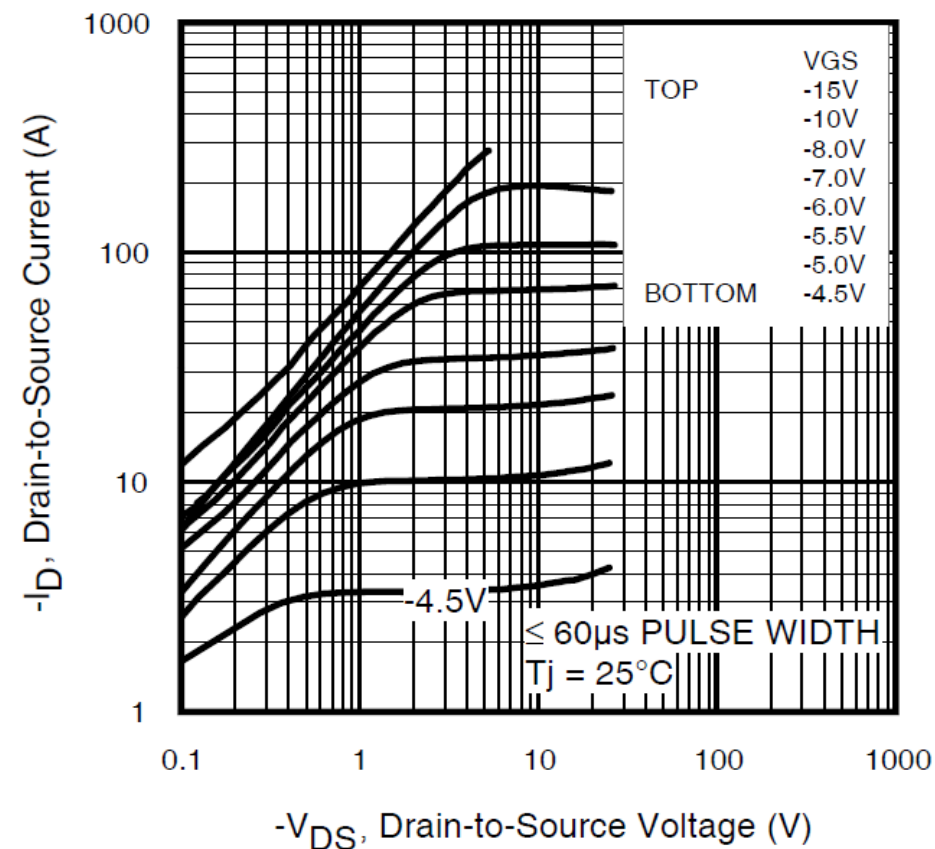
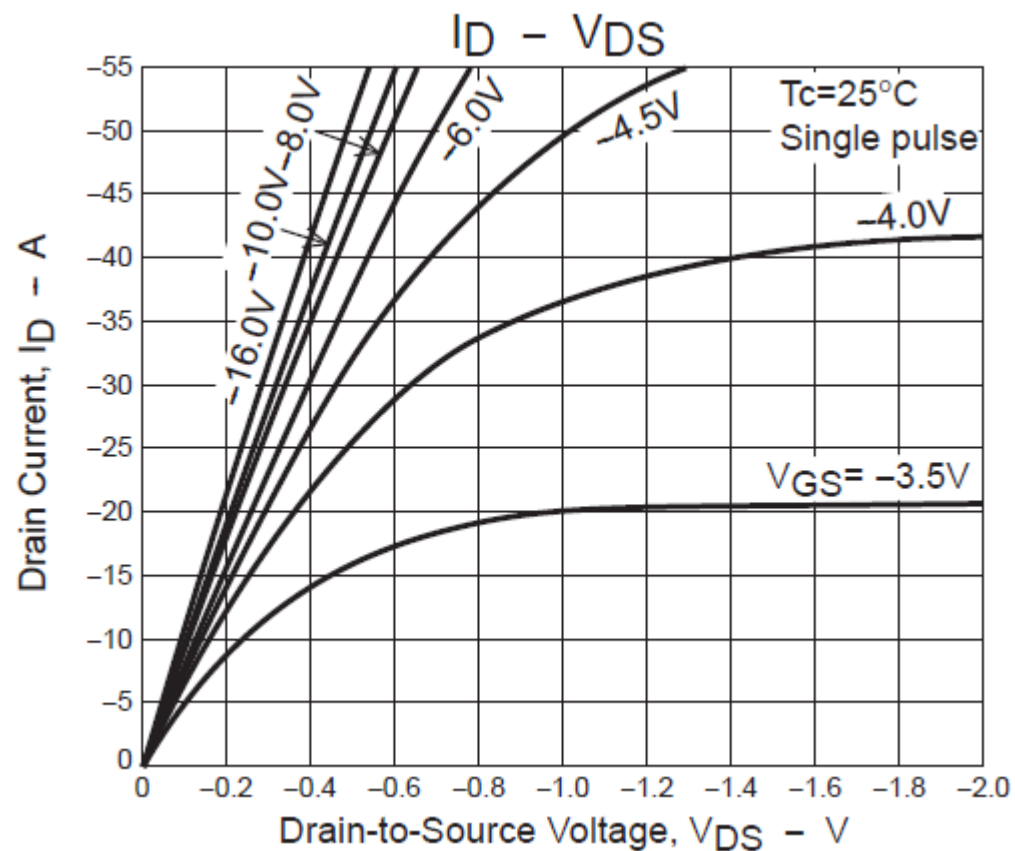
Напрежението U_{GS} , при което се създава инверсен слой в подложката и протича минимален дрейнов ток се нарича **прагово напрежение** U_T . Ако $U_{GS} > U_T$ каналът **се обогатява** с токоносители и токът I_D нараства.



N-канален MOS транзистор с индуциран канал
N-channel, enhancement MOSFET

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.

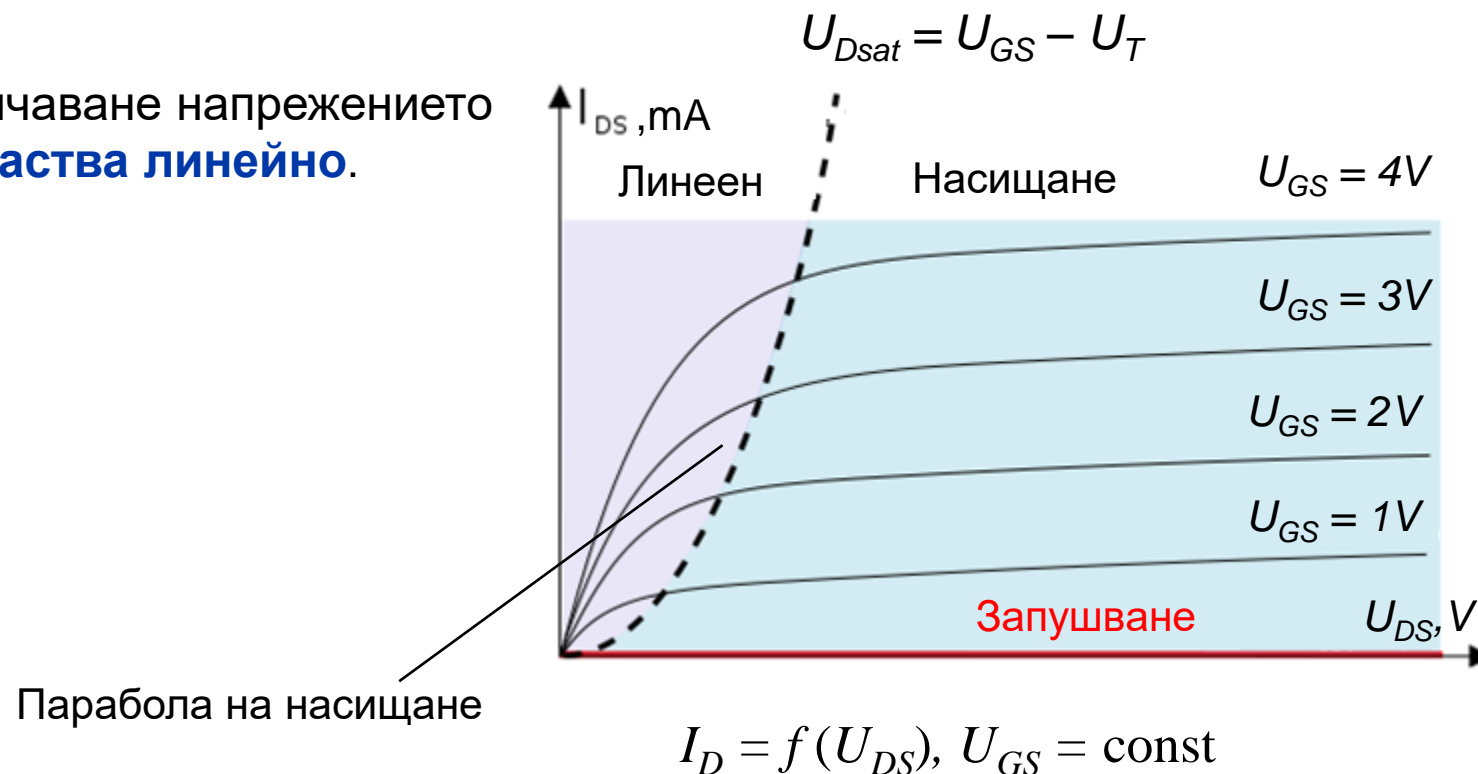
В тях се различават две области – **линейна** (омична, триодна) и област на **насищане** (пентодна).



Примери на изходни характеристики на pmos транзистори с индуциран канал. Обърнете внимание, че стойностите на напреженията U_{ds} , U_{gs} и токът I_d са отрицателни.

NMOS – Изходна характеристика – Линейна област

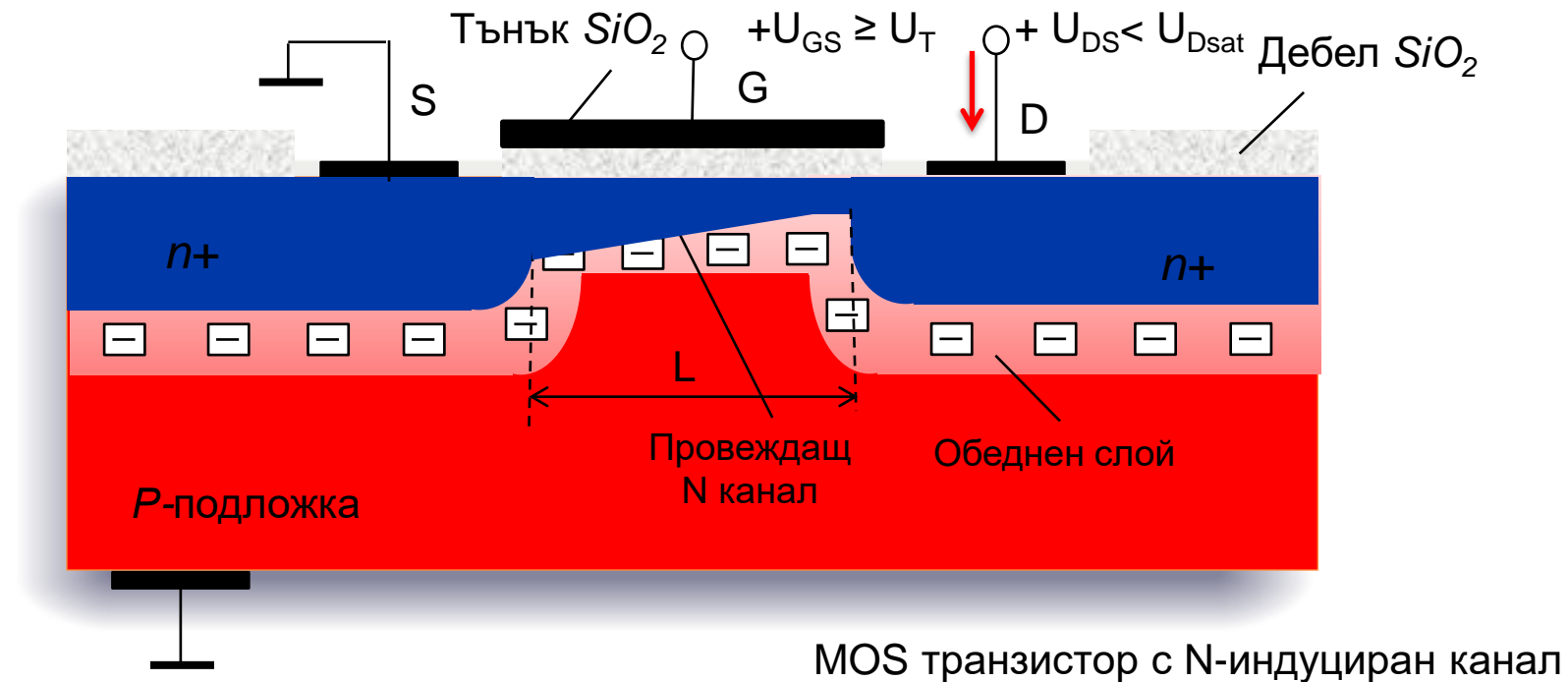
В линейната област с увеличаване напрежението на дрейна U_{DS} **токът I_D нараства линейно**.



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.

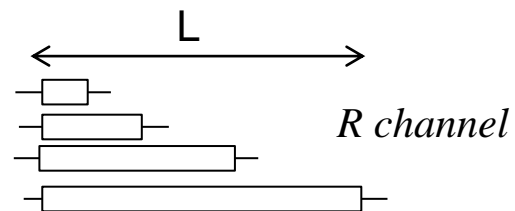
MOSFET – Пад на напрежение в канала



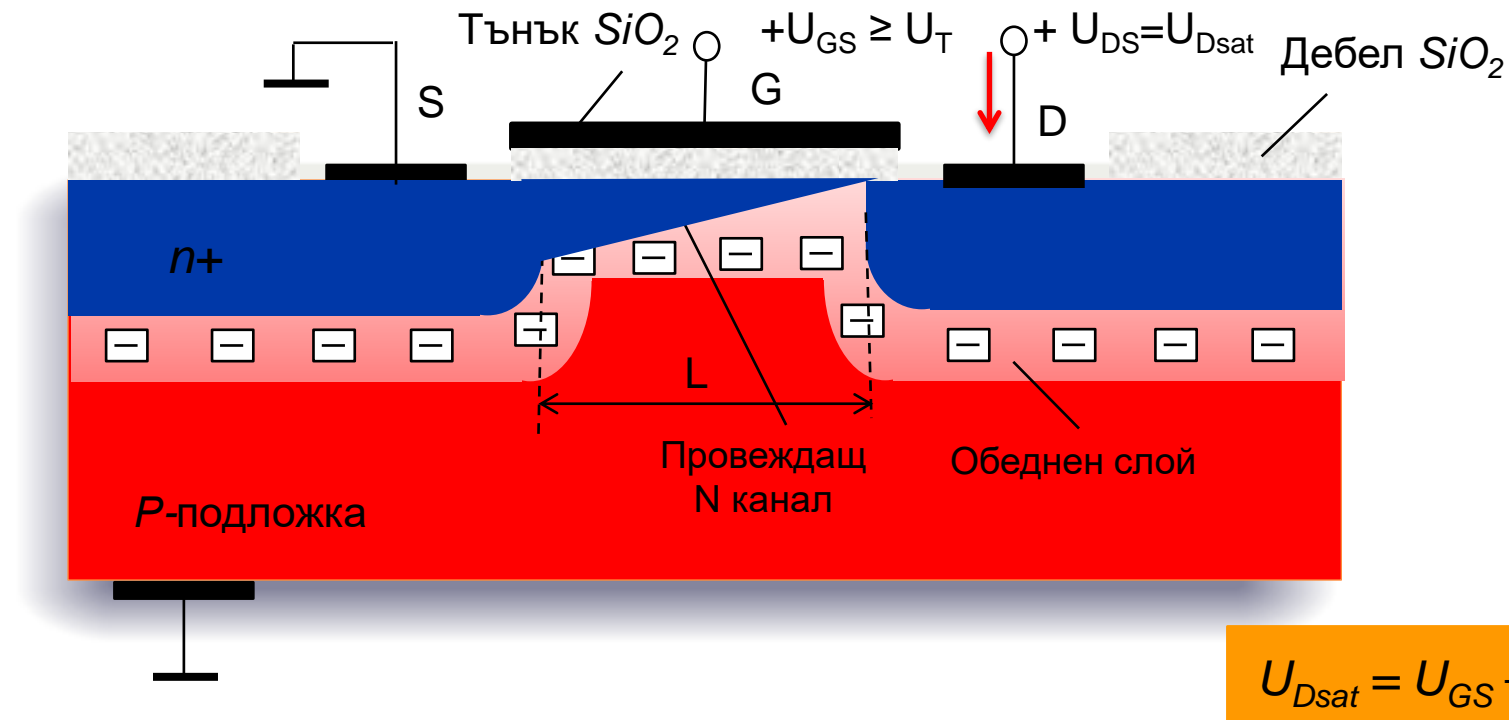
Омичното съпротивление на канала нараства с увеличаване на дължината на канала от S към D, като нараства и падът върху него.

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.

$$U_{channel} = U_{GS} - I_D \cdot R_{channel}$$



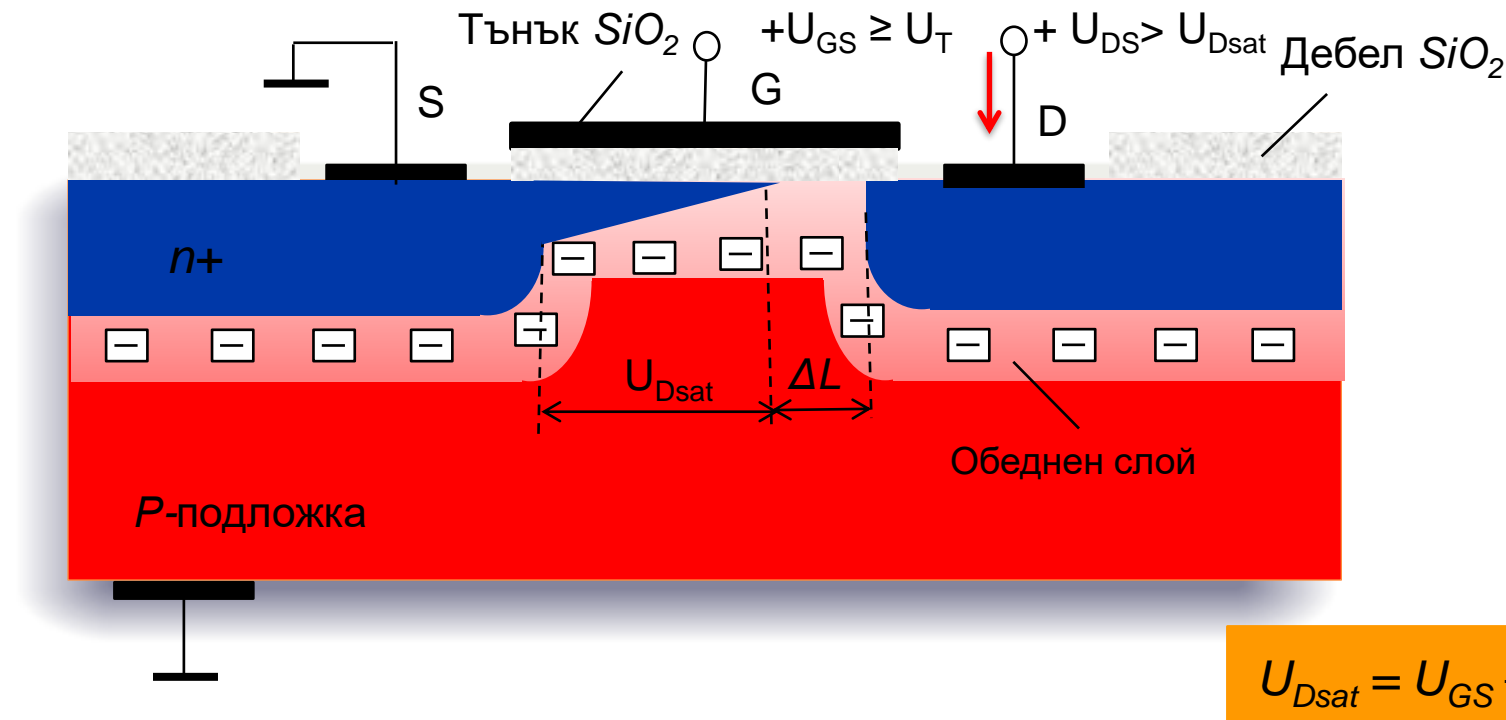
MOSFET – Напрежение на насищане



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).

MOSFET – Режим на насищане



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.

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

Линеен режим $U_{DS} < U_{Dsat}$

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

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

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

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

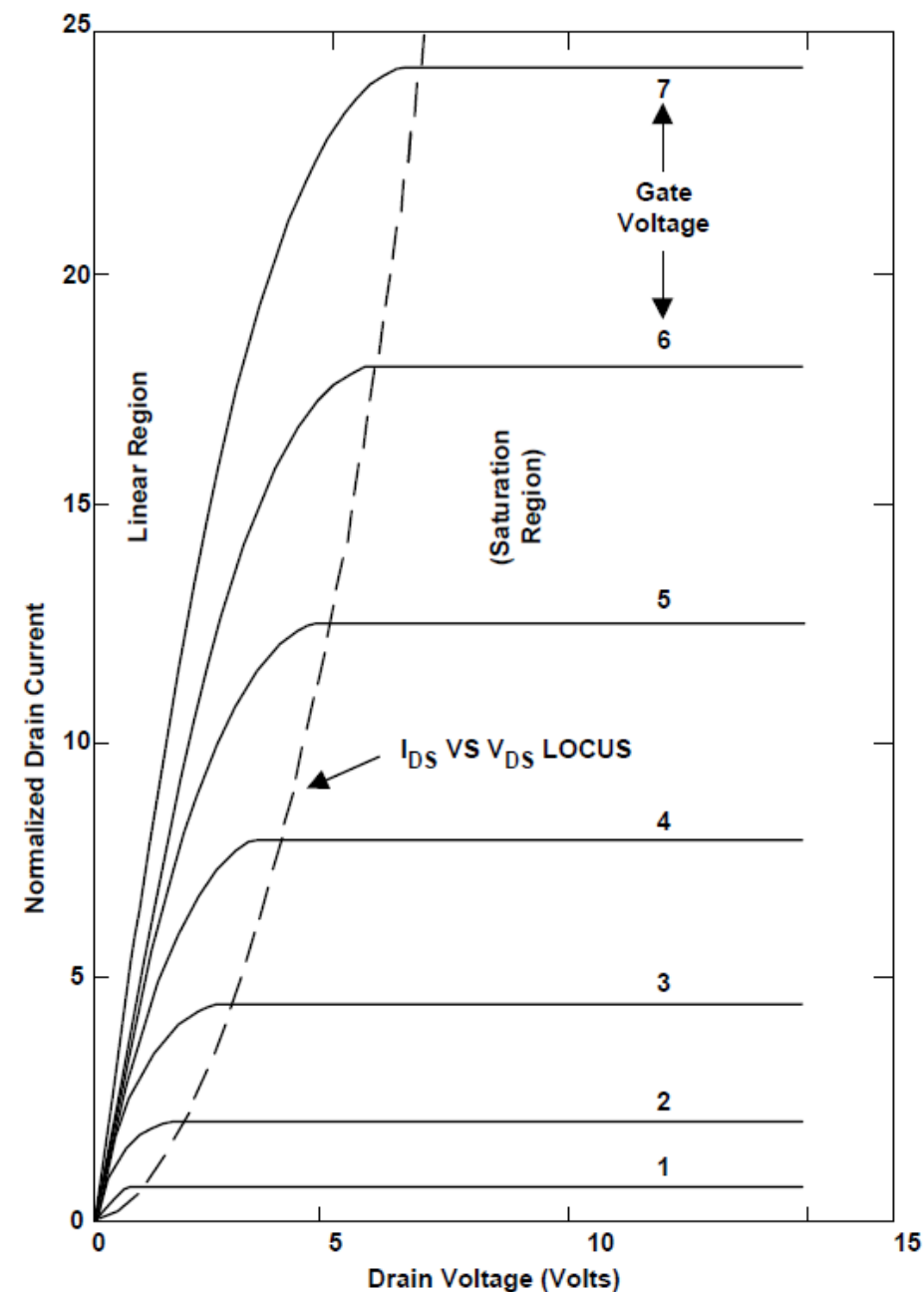
Специфична стръмност

$$C_0 = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{t_{ox}}$$

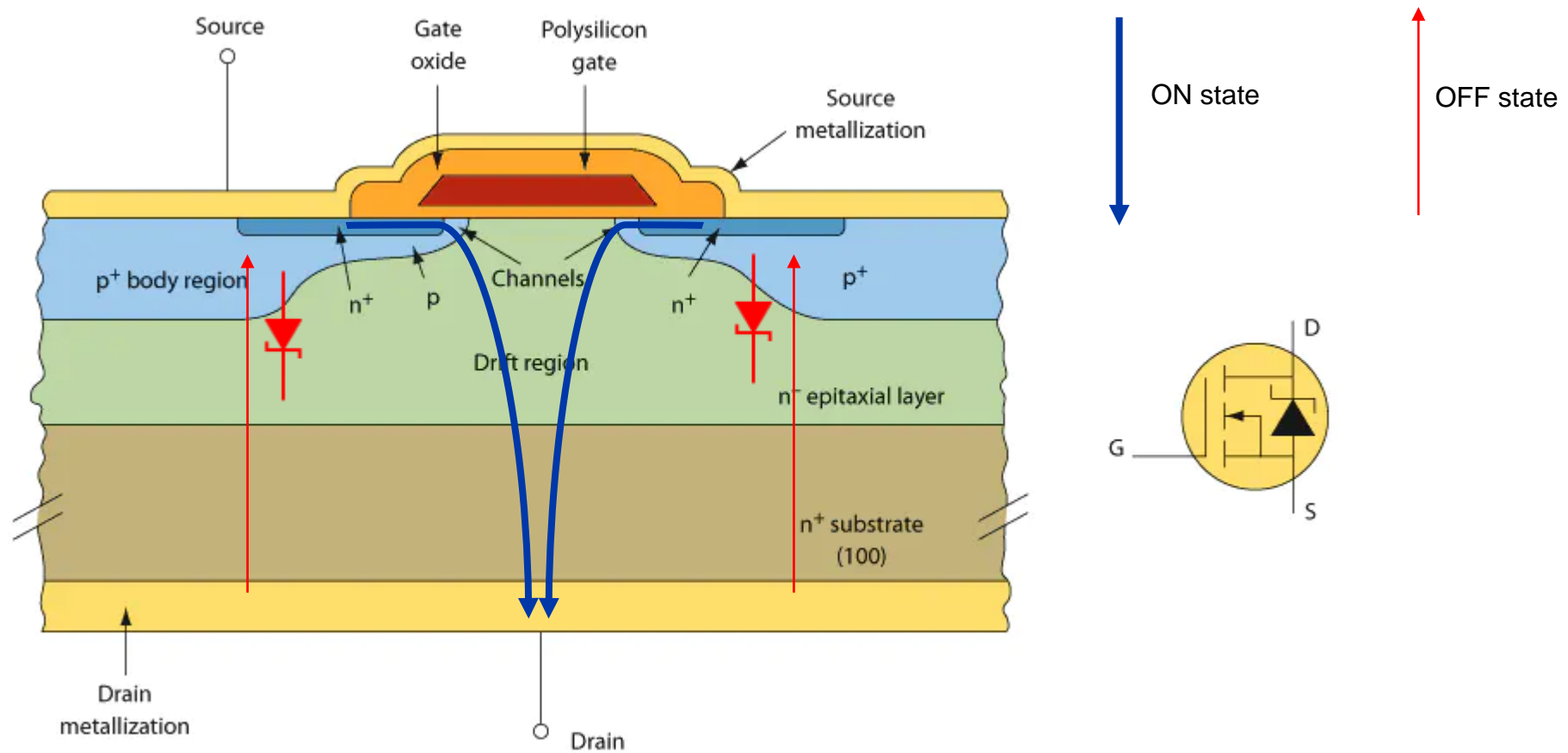
Специфичен капацитет на окиса

$$\mu_{eff}$$

Ефективна подвижност



MOSFET – Avalanche breakdown



The breakdown mechanism itself is not destructive for a PN junction. However, overheating caused by the high breakdown current and voltage damages the PN junction unless sufficient heat sinking is provided.

Определяне на режима на работа на транзистора, I_D и U_{DS}

Алгоритъм за решаване

1. Определя се дали транзисторът е запушен или отпушен

а) Ако $U_{GS} < U_T$, транзисторът е запушен.

$$\text{Тогава } I_D = 0, U_{DS} = E_{DD} - I_D \cdot R_D = E_{DD}$$

б) Ако $U_{GS} \geq U_T$, транзисторът е отпушен. Тогава:

2. Определя се режимът на работа. Изчислява се $U_{Dsat} = U_{GS} - U_T$

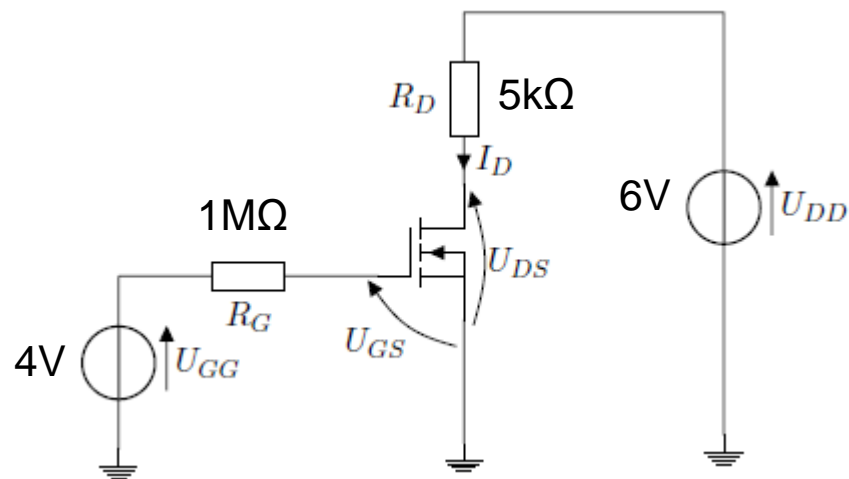
а) Ако $U_{DS} < U_{Dsat}$ транзисторът работи в линеен режим. Тогава:

$$I_D = k[(U_{GS} - U_T)U_{DS} - \frac{1}{2}U_{DS}^2] \quad U_{DS} = E_{DD} - I_D \cdot R_D$$

б) Ако $U_{DS} \geq U_{Dsat}$ транзисторът работи в насищане. Тогава:

$$I_D = \frac{k}{2}(U_{GS} - U_T)^2 \quad U_{DS} = E_{DD} - I_D \cdot R_D$$

Примери за постоянно токов анализ на схеми с MOSFET



Дадено: $k = 0,25 \text{ mA/V}^2$, $U_T = 2\text{V}$

Търси се: $I_D = ?$, $U_{DS} = ?$

Решение

$$U_{GS} = U_{GG} = 4\text{V} \quad U_{GS} > U_T - \text{транзисторът е отпушен}$$

$$U_{Dsat} = U_{GS} - U_T = 4 - 2 = 2\text{V}$$

Приемаме, че транзисторът е в режимът е насищане

$$I_D = \frac{k}{2} (U_{GS} - U_T)^2 = \frac{0,25 \cdot 10^{-3}}{2} (4 - 2)^2 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{A} = 0,5 \text{ mA}$$

Проверка на режима

$$U_{DD} = U_{DS} + I_D \cdot R_D \quad \text{Закон на Кирхофф за изходната верига}$$

$$U_{DS} = U_{DD} - I_D \cdot R_D = 6 - 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^3 = 3,5\text{V}$$

$$U_{DS} > U_{Dsat}$$

Транзисторът наистина работи
в режим на насищане

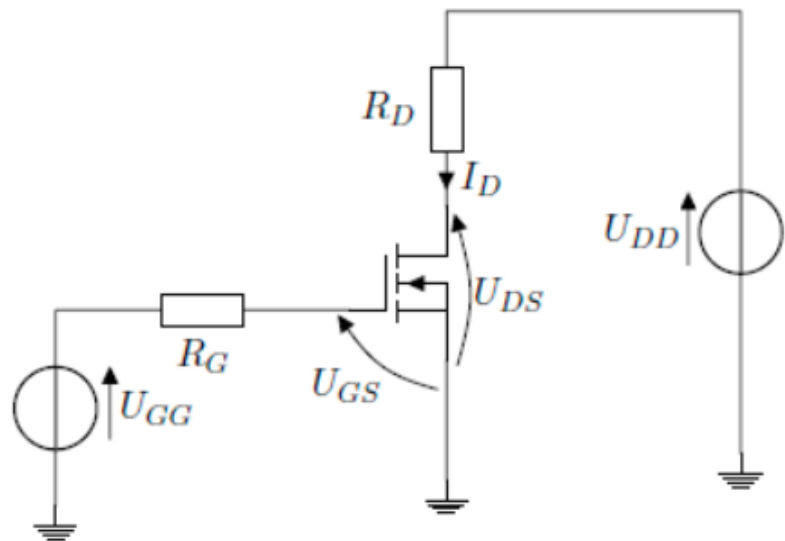
Отговор: $I_D = 0,5\text{mA}$, $U_{DS} = 3,5\text{V}$

Примери за постоянно токов анализ на схеми с MOSFET

Виж MOS DC.pdf

<https://github.com/vpt-tus/ppe/blob/master/MOSFET/MOS%20DC.pdf>

Примери за графично определяне на режима на MOSFET

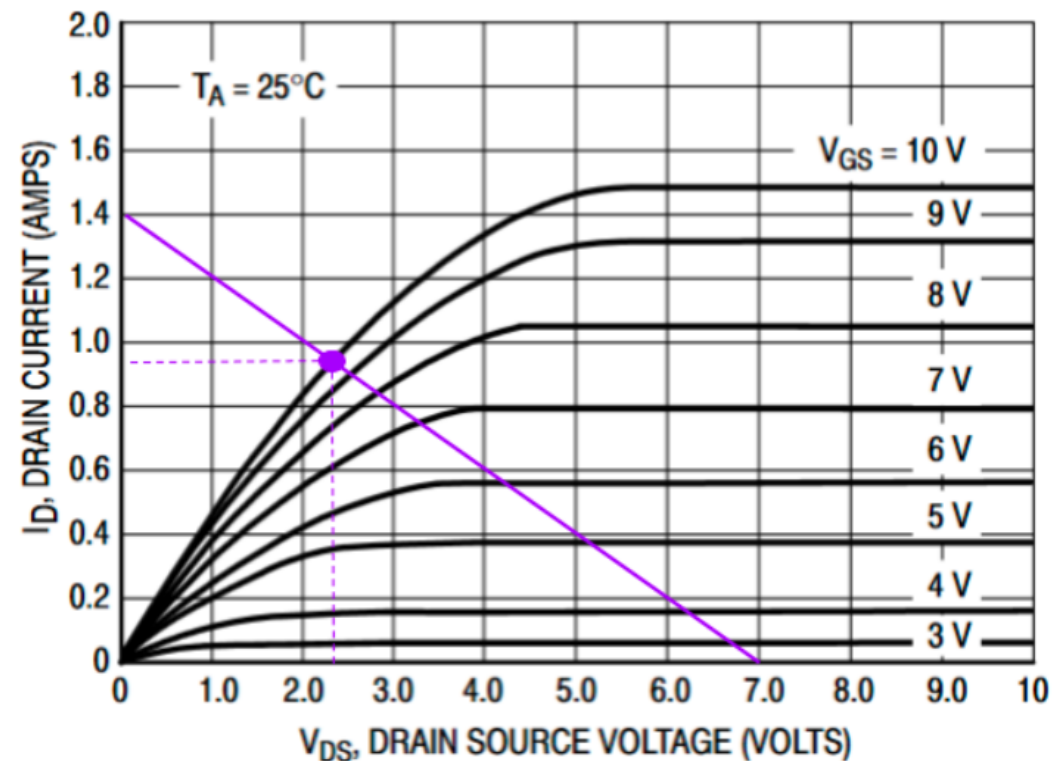


$U_{GG} = 10\text{V}$, $U_{DD} = 7\text{V}$, $R_D = 5\Omega$, $R_G = 1\text{M}\Omega$. $U_T = 2\text{V}$

Търси се: $I_D = ?$, $U_{DS} = ?$, Режим?

Построява се товарна права с отрез $U_{DD} = 7\text{V}$ и $U_{DD}/R_D = 7\text{V}/5\Omega = 1.4\text{A}$. Определя се работната точка и от характеристиката се отчитат I_D и U_{DS} за $U_{GS} = 10\text{V}$.

| | |
|-----------------|--------|
| I_D [A] | 0.95 |
| U_{DS} [V] | 2.4 |
| Режим на работа | Линеен |



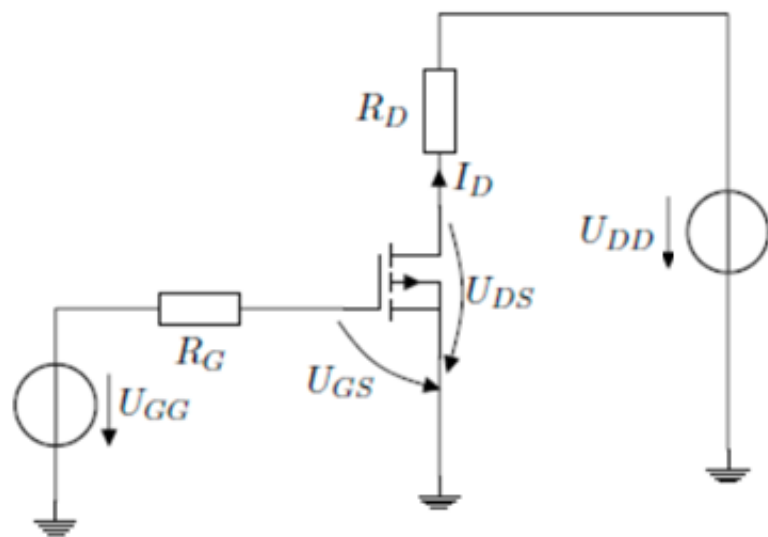
Обосновка за режима:

От характеристиката: $U_{DS} = 2.4\text{V}$

$$U_{Dsat} = U_{GS} - U_T = 10 - 2 = 8\text{V}$$

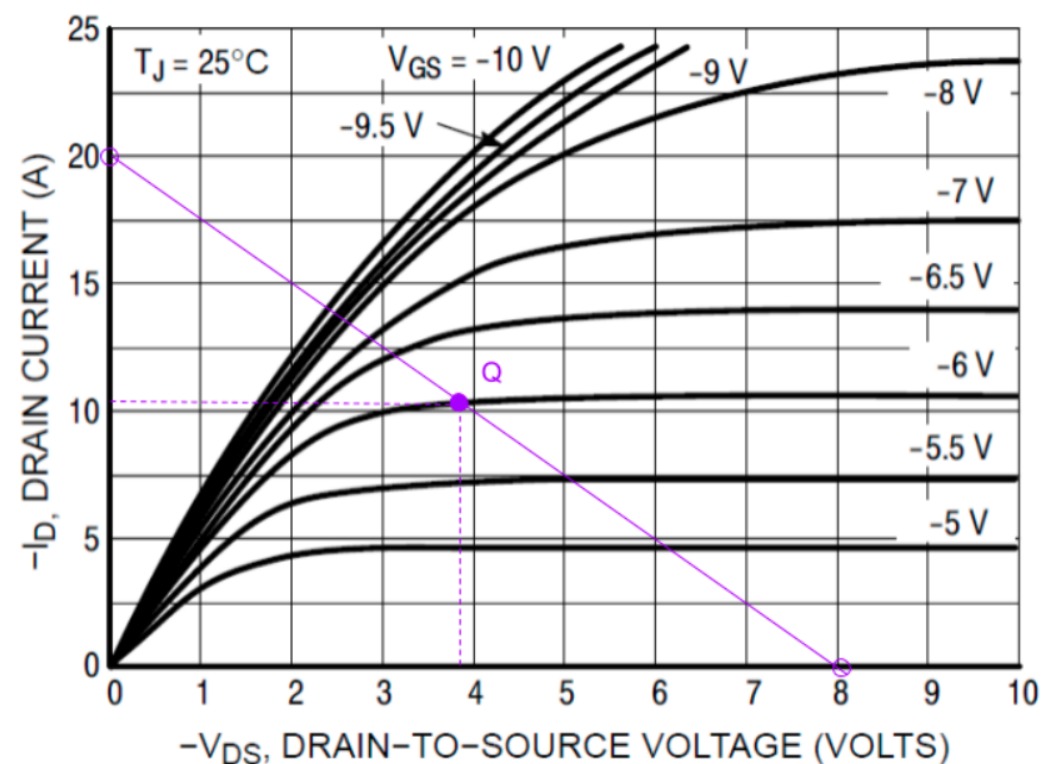
$U_{DS} < U_{Dsat}$ Транзисторът работи в линеен режим

Примери за графично определяне на режима на MOSFET



$U_{GG} = -6V$ $U_{DD} = -8V$, $R_D = 400m\Omega$, $R_G = 1M\Omega$. $U_T = -4V$

Търси се: $I_D = ?$, $U_{DS} = ?$, Режим?



Построява се товарна права с отрез $U_{DD} = -8V$ и $U_{DD}/R_D = -8V/0.400\Omega = -20 A$. Определя се раб. Точка за $U_{GS} = -6V$.

| | |
|-----------------|----------|
| I_D [A] | 10.5 |
| U_{DS} [V] | -3.8 |
| Режим на работа | Насищане |

Обосновка за режима:

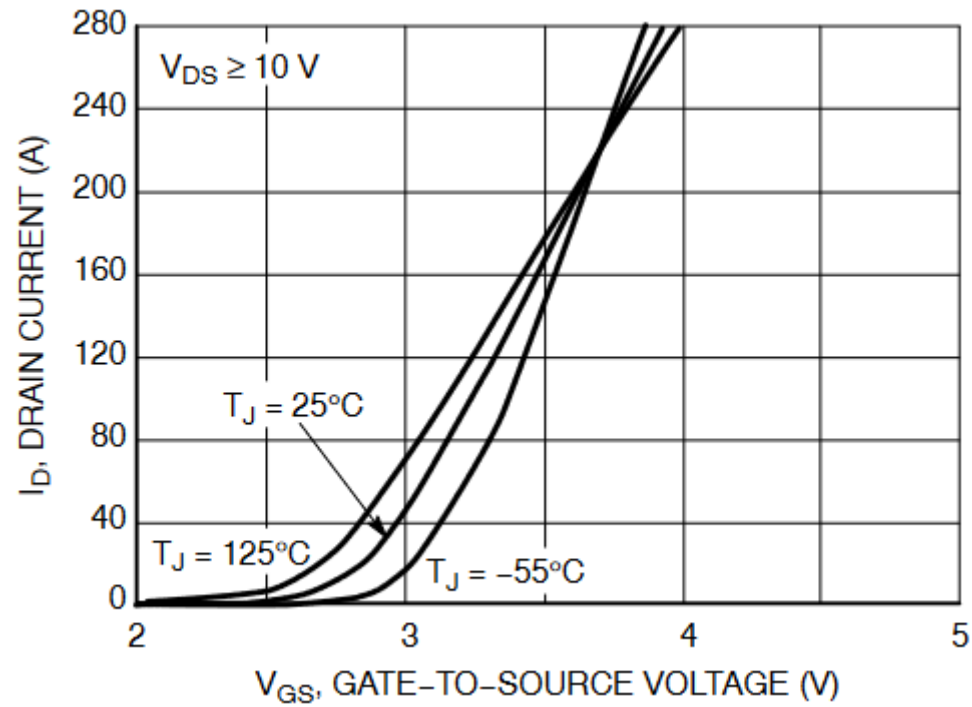
От характеристиката: $U_{DS} = -3.8V$

$$U_{Dsat} = U_{GS} - U_T = -6 - (-4) = -2V$$

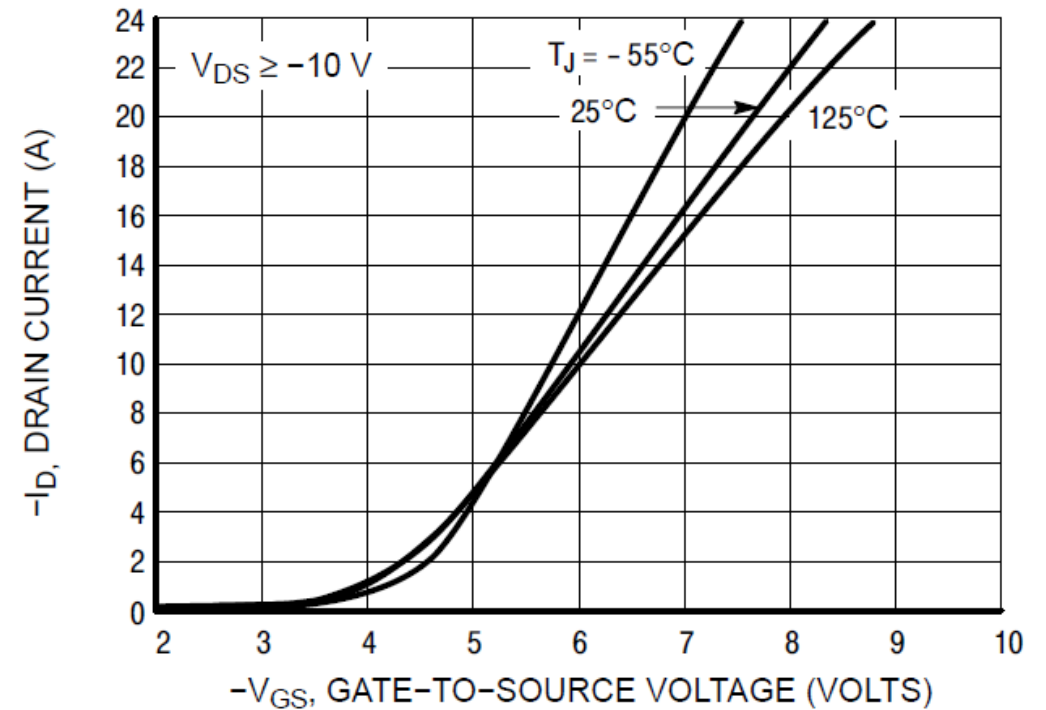
$|U_{DS}| > |U_{Dsat}|$ Транзисторът работи в насищане

Предавателни Характеристики (Transfer Characteristics)

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

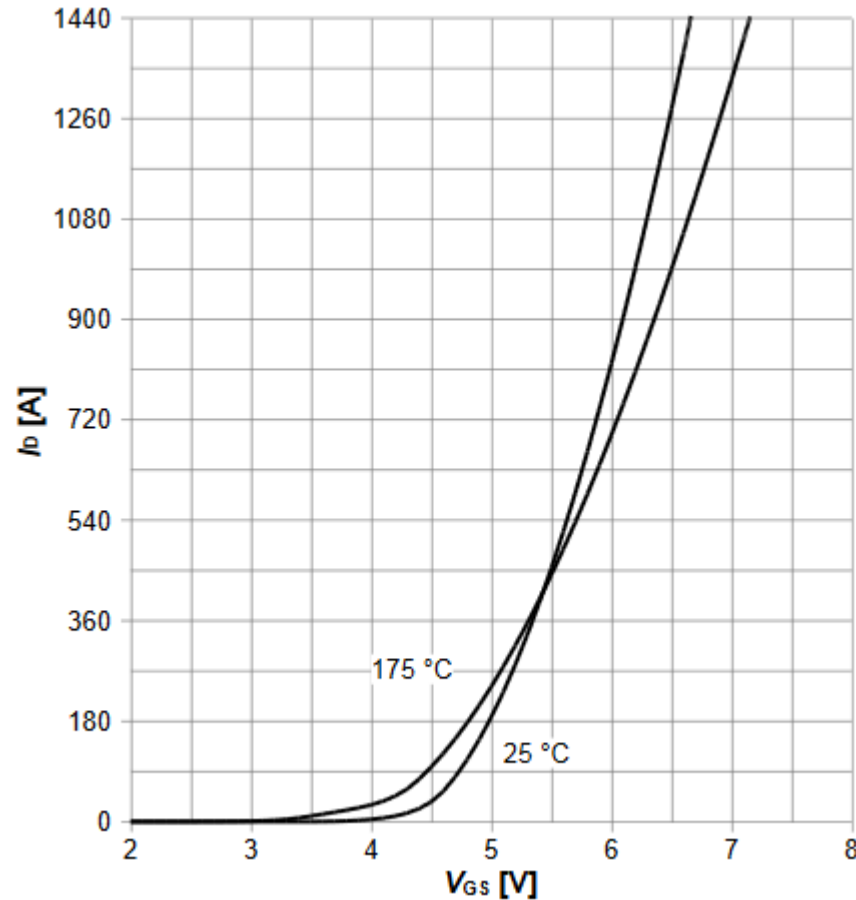


NMOS, индуциран канал



PMOS, индуциран канал

Предавателни Характеристики – Температурна Зависимост



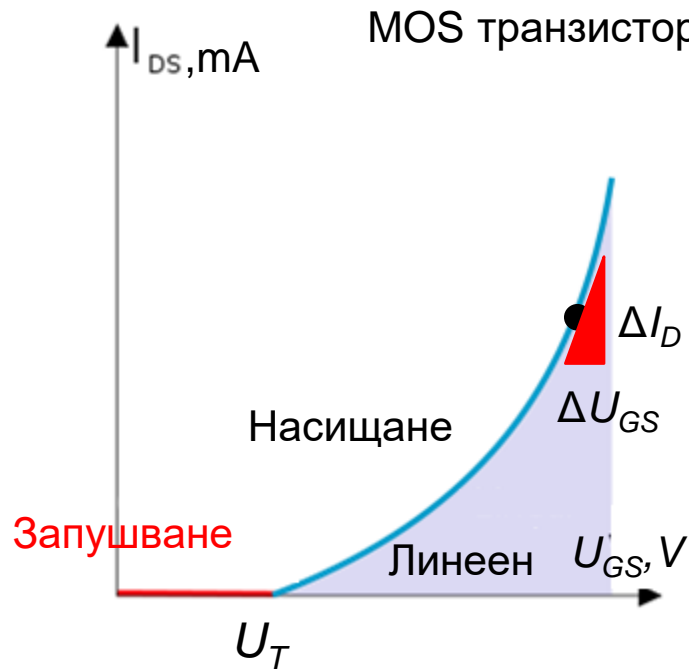
MOS транзистор с N индуциран канал

При повишаване на температурата се:

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

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.

Предавателни Характеристики – Стръмност (transconductance)



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

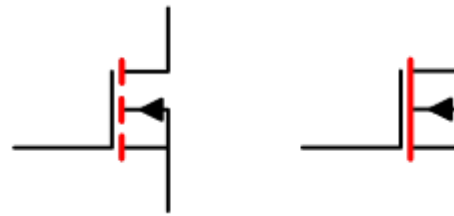
Стръмност на предавателната характеристика g_m , (S)

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

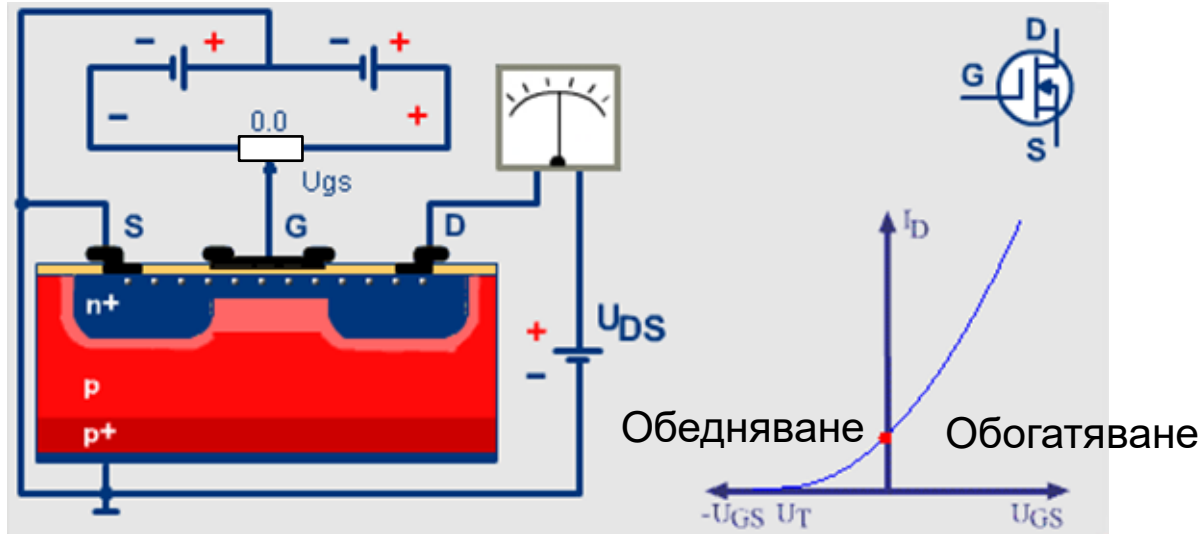
$$g_m = kU_{DS} \quad \text{за линеен режим}$$

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

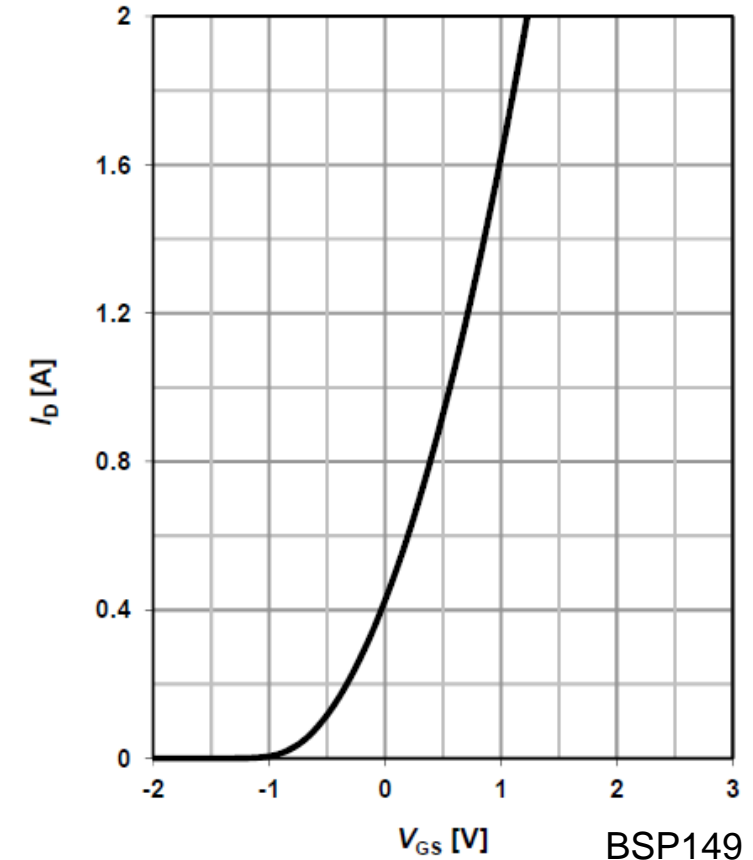
MOSFET с вграден канал Depletion MOSFET



MOSFET с вграден канал (depletion mode)



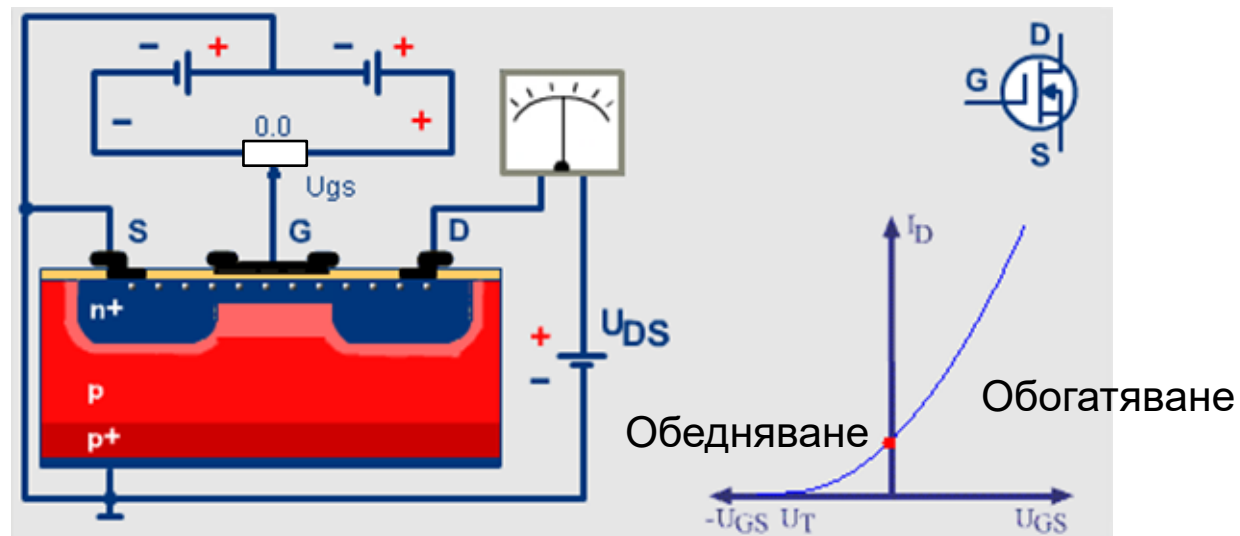
N-канален MOS транзистор с вграден канал
N-channel, depletion mode MOSFET



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

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

MOSFET с вграден канал

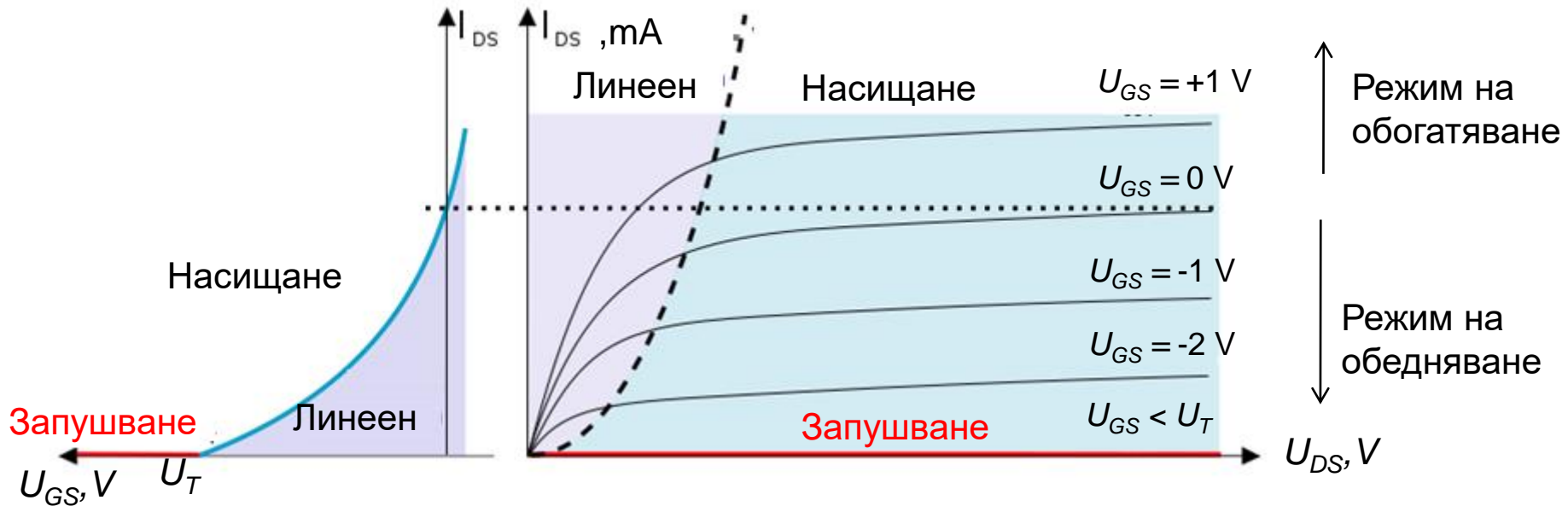


MOS транзистор с N вграден канал

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.

MOSFET с вграден канал - характеристики



NMOS транзистор с вграден канал

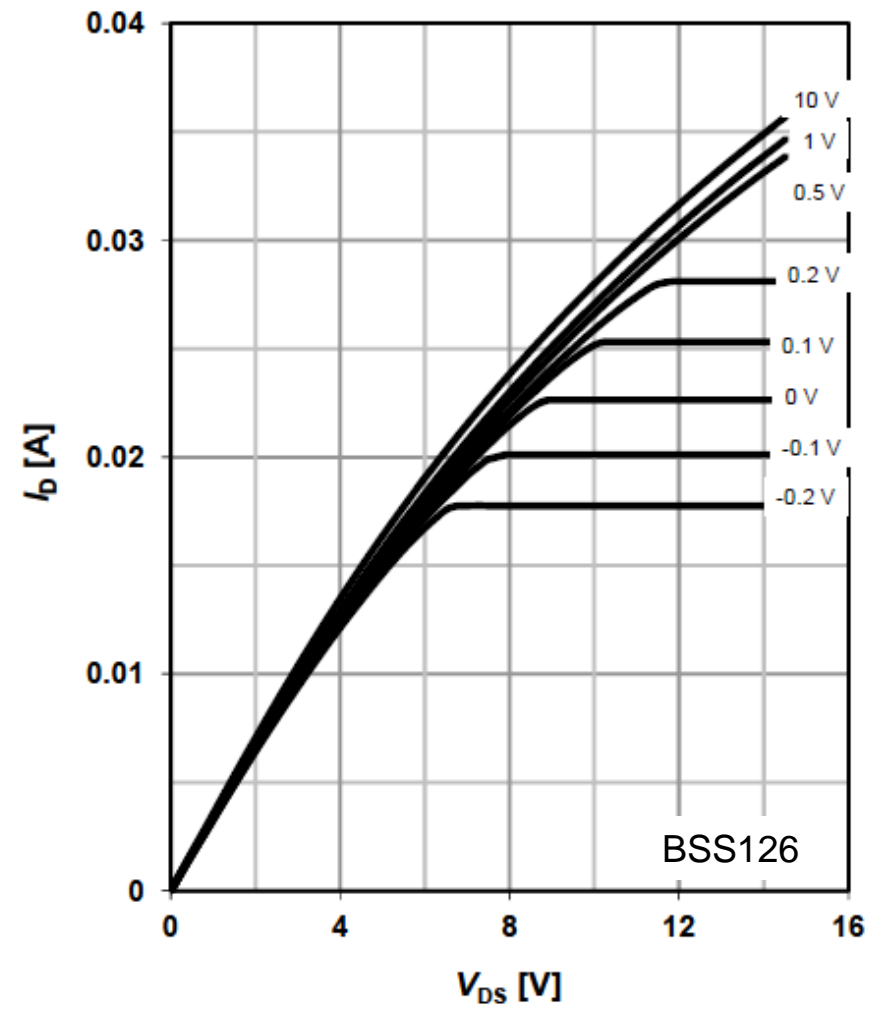
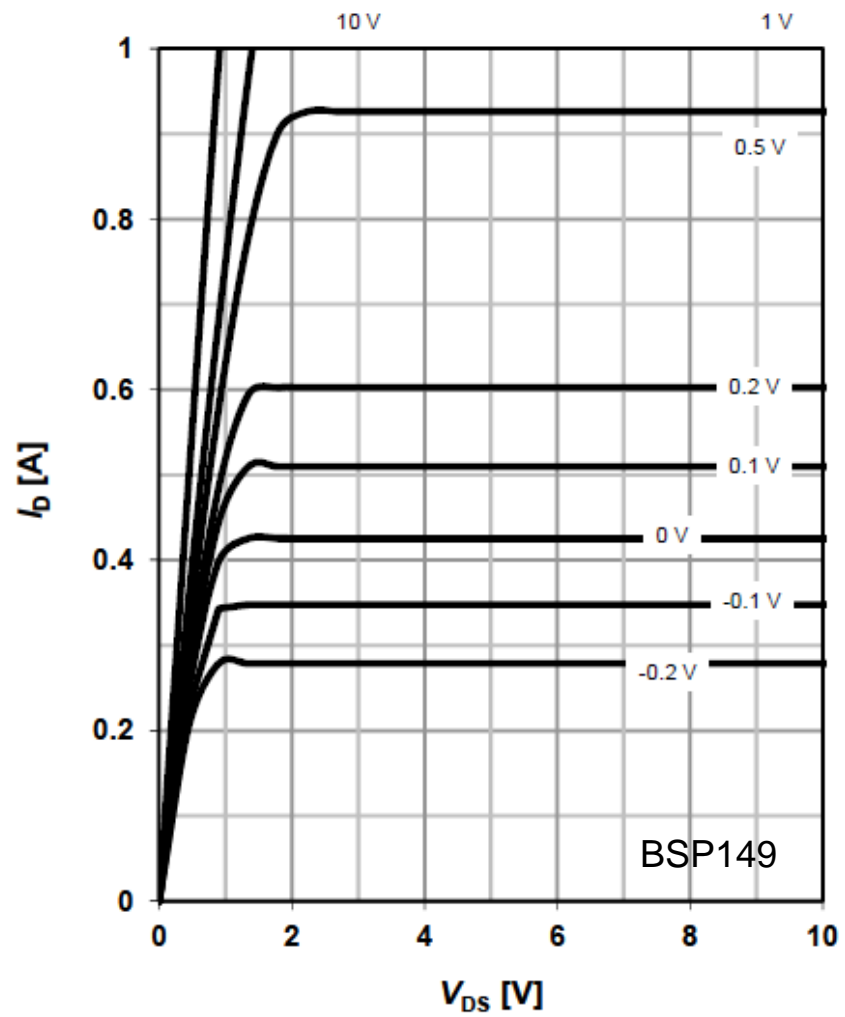
При $U_{GS} = 0\text{ V}$ протича ток.

При $U_{GS} > 0$ токът I_D расте с нарастване на U_{GS} .

При $U_T < U_{GS} < 0$ I_D намалява.

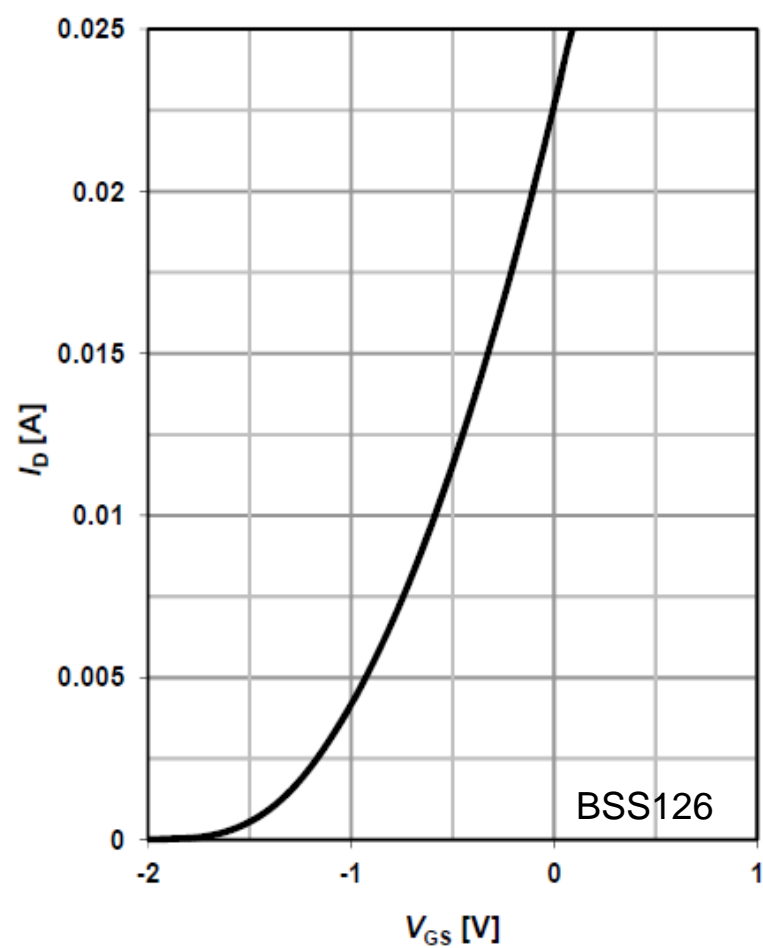
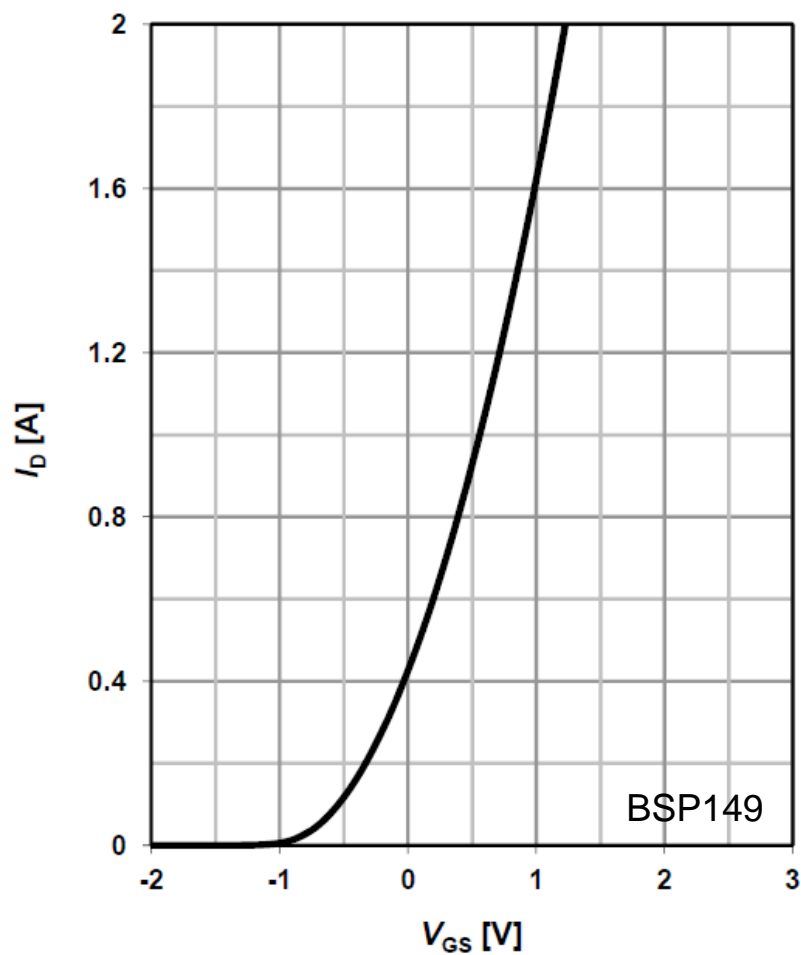
При $U_{GS} < U_T$ каналът не съществува. U_T е праговото напрежение на транзистора.

MOSFET с вграден канал – изходни характеристики



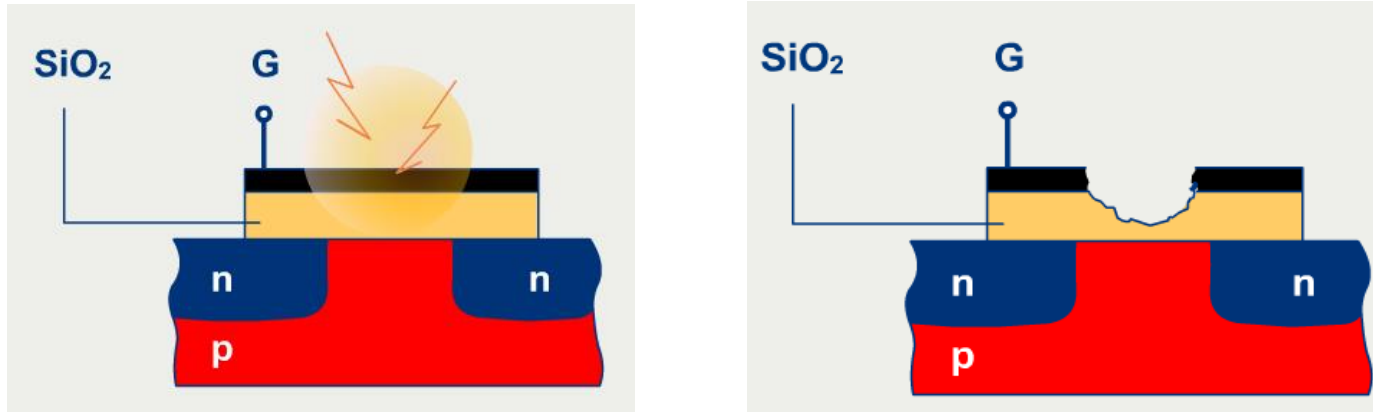
Примери на изходни характеристики на n-канални MOS транзистори с вграден канал

MOSFET с вграден канал – предавателни характеристики



Примери на предавателни (transfer) характеристики на n-канални MOS транзистори с вграден канал

MOSFET – защита от статично електричество



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

Параметри на MOS Транзисторите

Параметри – key performance parameters

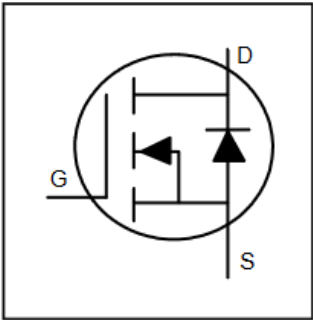
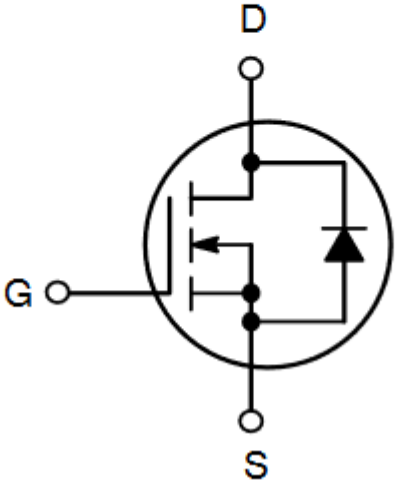
Най-важните параметри според различни производители на MOS транзистори

Table 1 Key Performance Parameters

| Parameter | Value | Unit |
|-------------------------|-------|------------|
| V_{DS} | 40 | V |
| $R_{DS(on),typ}$ | 0.5 | m Ω |
| $R_{DS(on),max}$ | 0.65 | m Ω |
| $I_D(Silicon\ Limited)$ | 564 | A |
| $I_D(Package\ Limited)$ | 360 | A |
| $Q_G(0V..10V)$ | 366 | nC |

| PRODUCT SUMMARY | | |
|---|------------------|-------|
| V_{DS} (V) at T_J max. | 650 | |
| $R_{DS(on)}$ typ. (Ω) at 25 °C | $V_{GS} = 10\ V$ | 0.171 |
| Q_g max. (nC) | 74 | |
| Q_{gs} (nC) | 15 | |
| Q_{gd} (nC) | 15 | |

| V_{DSS} | $R_{DS(on)}\ MAX$ | $I_D\ MAX$ |
|-----------|----------------------|------------|
| 600 V | 99 m Ω @ 10 V | 33 A |



| V_{DSS} | 60V |
|-------------------------|----------------|
| $R_{DS(on)}\ typ.\ max$ | 1.15m Ω |
| | 1.4m Ω |
| I_D (Silicon Limited) | 338A① |
| I_D (Package Limited) | 240A |

Параметри – Absolute maximum ratings / Safe operating area

Table 2 Maximum ratings

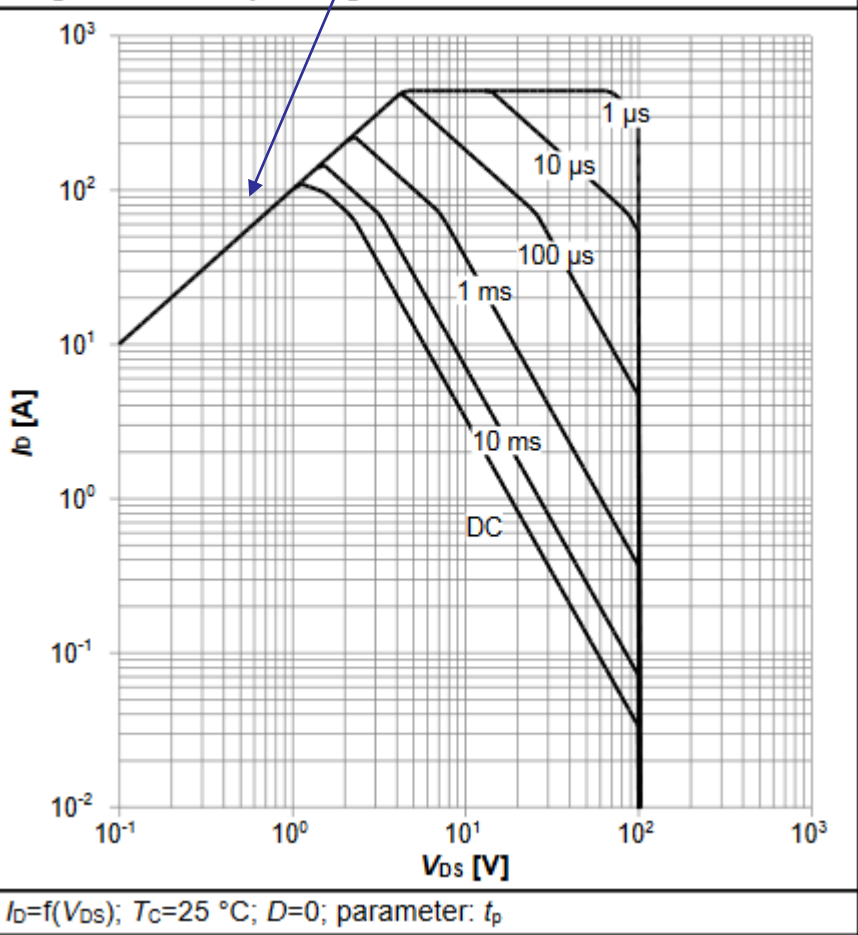
| Parameter | Symbol | Values | | | Unit | Note / Test Condition |
|--|-------------------|--------|------|-------------------------|------|--|
| | | Min. | Typ. | Max. | | |
| Continuous drain current ¹⁾ | I_D | - | - | 110 85 78 19.4 | A | $V_{GS}=10\text{ V}$, $T_C=25\text{ °C}$ $V_{GS}=10\text{ V}$, $T_C=100\text{ °C}$ $V_{GS}=6\text{ V}$, $T_C=100\text{ °C}$ $V_{GS}=10\text{ V}$, $T_A=25\text{ °C}$, $R_{thJA}=40\text{ °C/W}^2)$ |
| Pulsed drain current ³⁾ | $I_{D,pulse}$ | - | - | 440 | A | $T_A=25\text{ °C}$ |
| Avalanche energy, single pulse ⁴⁾ | E_{AS} | - | - | 115 | mJ | $I_D=92\text{ A}$, $R_{GS}=25\text{ }\Omega$ |
| Gate source voltage | V_{GS} | -20 | - | 20 | V | - |
| Power dissipation | P_{tot} | - | - | 150 3.8 | W | $T_C=25\text{ °C}$ $T_A=25\text{ °C}$, $R_{thJA}=40\text{ °C/W}^2)$ |
| Operating and storage temperature | T_J , T_{stg} | -55 | - | 175 | °C | IEC climatic category; DIN I 55/175/56 |

Работа извън тези граници може да доведе до разрушаване на транзистора

Токът е ограничен от $R_{ds(on)}$

IPP050N10NF2S

Diagram 3: Safe operating area



Параметри – Absolute maximum ratings – Мощност и температура

Table 2 Maximum ratings

| Parameter | Symbol | Values | | | Unit | Note / Test Condition |
|--|----------------|--------|------|-------------------------|------|--|
| | | Min. | Typ. | Max. | | |
| Continuous drain current ¹⁾ | I_D | - | - | 110 85 78 19.4 | A | $V_{GS}=10\text{ V}$, $T_C=25\text{ °C}$ $V_{GS}=10\text{ V}$, $T_C=100\text{ °C}$ $V_{GS}=6\text{ V}$, $T_C=100\text{ °C}$ $V_{GS}=10\text{ V}$, $T_A=25\text{ °C}$, $R_{thJA}=40\text{ °C/W}^{2)}$ |
| Pulsed drain current ³⁾ | $I_{D,pulse}$ | - | - | 440 | A | $T_A=25\text{ °C}$ |
| Avalanche energy, single pulse ⁴⁾ | E_{AS} | - | - | 115 | mJ | $I_D=92\text{ A}$, $R_{GS}=25\text{ }\Omega$ |
| Gate source voltage | V_{GS} | -20 | - | 20 | V | - |
| Power dissipation | P_{tot} | - | - | 150 3.8 | W | $T_C=25\text{ °C}$ $T_A=25\text{ °C}$, $R_{thJA}=40\text{ °C/W}^{2)}$ |
| Operating and storage temperature | T_j, T_{stg} | -55 | - | 175 | °C | IEC climatic category; DIN IEC 68-1: 55/175/56 |

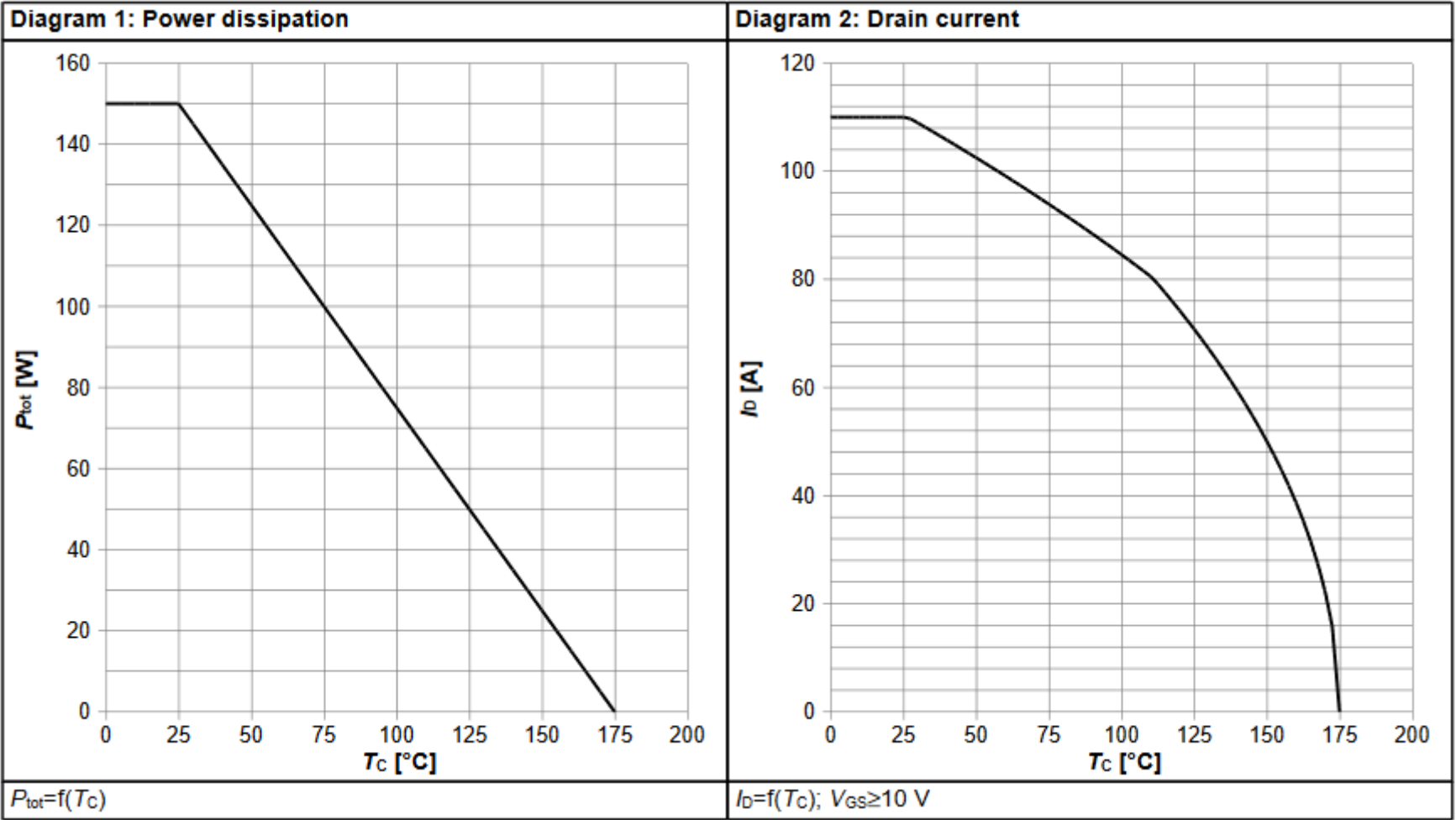
$$P_D = \frac{T_J - T_C}{R_{\theta JC}} \quad P_D = \frac{T_J - T_A}{R_{\theta JA}}$$

T_J = Junction Temperature / температура на кристала
 T_C = Case Temperature / темп. на корпуса
 T_A = Ambient Temperature / околна температура
 $R_{\theta JC}$ = Junction to Case Thermal Resistance
 $R_{\theta JA}$ = Junction to Ambient Thermal Resistance

Table 3 Thermal characteristics

| Parameter | Symbol | Values | | | Unit |
|---|------------|--------|------|------|------|
| | | Min. | Typ. | Max. | |
| Thermal resistance, junction - case | R_{thJC} | - | - | 1 | °C/W |
| Thermal resistance, junction - ambient, 6 cm ² cooling area | R_{thJA} | - | - | 40 | °C/W |
| Thermal resistance, junction - ambient, minimal footprint ²⁾ | R_{thJA} | - | - | 62 | °C/W |

Параметри – Зависимост на Id и P от температура



Параметри – $U_{GS(th)}$

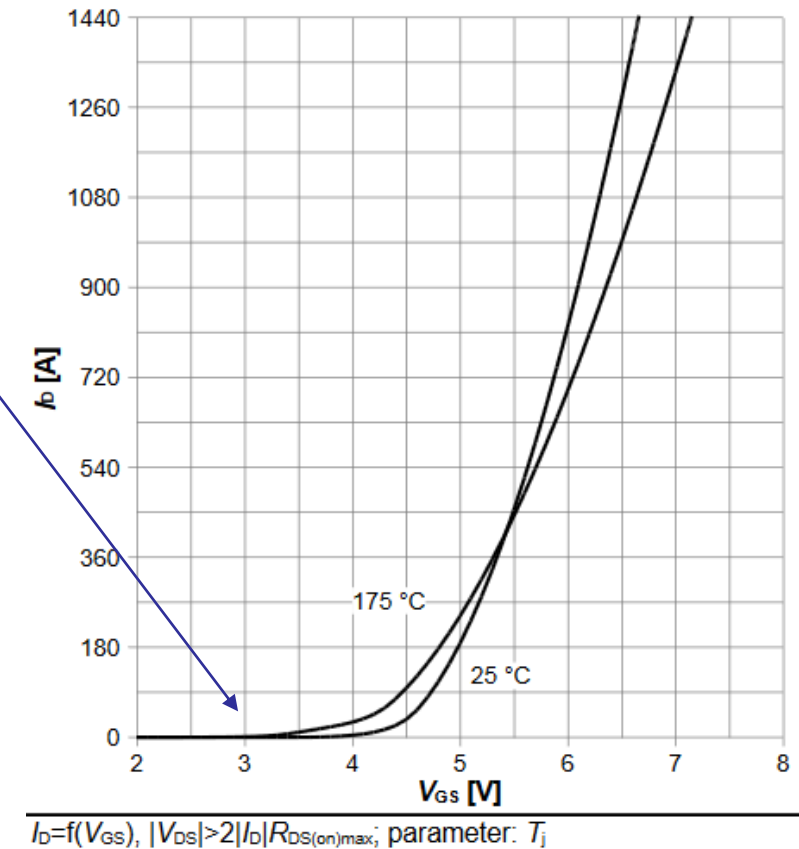
Прагово напрежение (gate threshold voltage) - $U_{GS(th)}$

Table 4 Static characteristics

| Parameter | Symbol | Values | | | Unit | Note / Test Condition |
|---|---------------------|--------|------------|-----------|---------------|---|
| | | Min. | Typ. | Max. | | |
| Drain-source breakdown voltage | $V_{(BR)DSS}$ | 40 | - | - | V | $V_{GS}=0\text{ V}$, $I_D=250\text{ }\mu\text{A}$ |
| Breakdown voltage temperature coefficient | $dV_{(BR)DSS}/dT_j$ | - | 36 | - | mV/°C | $I_D=5\text{ mA}$, referenced to 25 °C |
| Gate threshold voltage | $V_{GS(th)}$ | 2.2 | - | 3.7 | V | $V_{DS}=V_{GS}$, $I_D=250\text{ }\mu\text{A}$ |
| Zero gate voltage drain current | I_{DSS} | - | - | 1 150 | μA | $V_{DS}=40\text{ V}$, $V_{GS}=0\text{ V}$, $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ $V_{DS}=40\text{ V}$, $V_{GS}=0\text{ V}$, $T_j=125\text{ }^\circ\text{C}$ |
| Gate-source leakage current | I_{GSS} | - | - | 100 | nA | $V_{GS}=20\text{ V}$, $V_{DS}=0\text{ V}$ |
| Drain-source on-state resistance | $R_{DS(on)}$ | - | 0.5 0.7 | 0.65 - | m Ω | $V_{GS}=10\text{ V}$, $I_D=100\text{ A}$ $V_{GS}=6\text{ V}$, $I_D=50\text{ A}$ |
| Gate resistance ¹⁾ | R_G | - | 2.2 | - | Ω | - |
| Transconductance | g_{fs} | - | 320 | - | S | $ V_{DS} \geq 2 I_D R_{DS(on)max}$, $I_D=100\text{ A}$ |

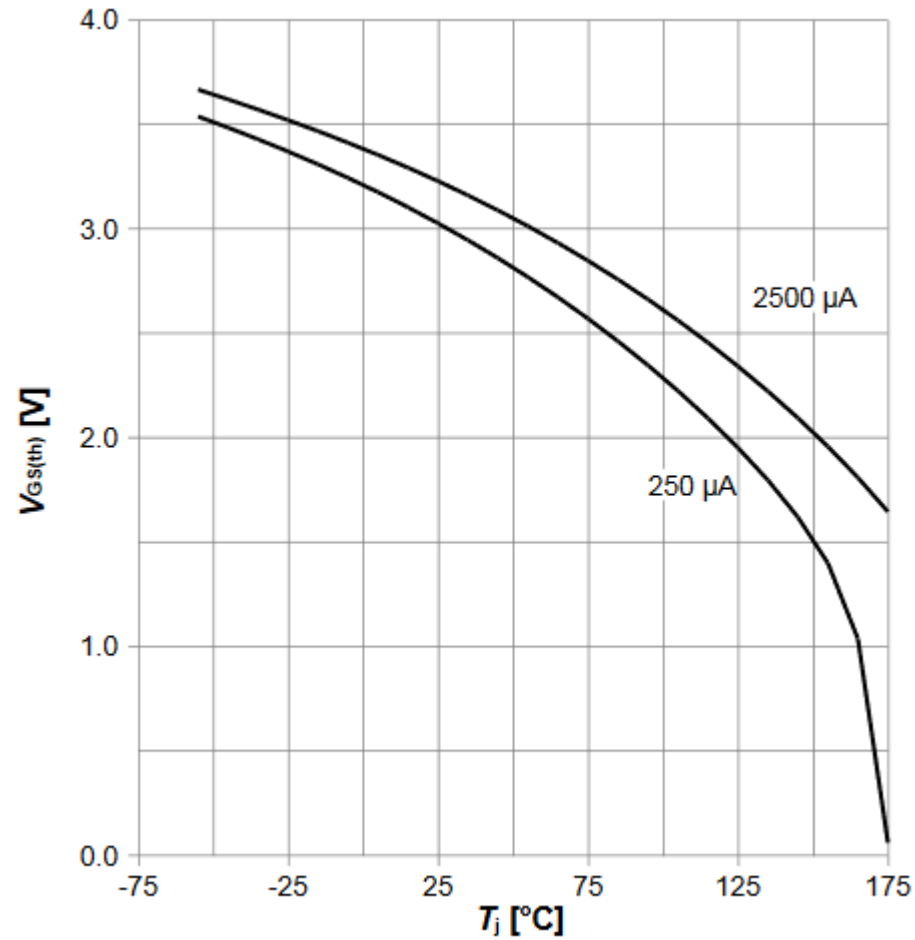
Прагвото напрежение, V_{th} , се дефинира като минималното напрежение на гейта, необходимо за създаване на инверсна област под гейта и образуване на проводящ канал между дрейна и сорса. V_{th} обикновено се измерва при ток на дрейна 250 μA .

V_{th} варира в известни граници за отделните транзистори от даден модел.



Параметри – $U_{GS(TH)}$ – Зависимост от температурата

Прагово напрежение като функция на температурата



V_{th} има отрицателен температурен коефициент, което означава, че когато кристала се нагрява, MOSFET ще се включи при по-ниско напрежение на U_{gs} .

$V_{GS(th)}=f(T_j)$, $V_{GS}=V_{DS}$; parameter: I_D

Параметри – Rds(on)

$R_{DS(on)}$ - (drain-source on-state resistance) – съпротивление между дрейна и сорса, когато транзисторът е „включен“.

Table 4 Static characteristics

| Parameter | Symbol | Values | | | Unit | Note / Test Condition |
|---|---------------------|--------|------------|-----------|---------------|---|
| | | Min. | Typ. | Max. | | |
| Drain-source breakdown voltage | $V_{(BR)DSS}$ | 40 | - | - | V | $V_{GS}=0\text{ V}$, $I_D=250\text{ }\mu\text{A}$ |
| Breakdown voltage temperature coefficient | $dV_{(BR)DSS}/dT_j$ | - | 36 | - | mV/°C | $I_D=5\text{ mA}$, referenced to 25 °C |
| Gate threshold voltage | $V_{GS(th)}$ | 2.2 | - | 3.7 | V | $V_{DS}=V_{GS}$, $I_D=250\text{ }\mu\text{A}$ |
| Zero gate voltage drain current | I_{DSS} | - | - | 1 150 | μA | $V_{DS}=40\text{ V}$, $V_{GS}=0\text{ V}$, $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ $V_{DS}=40\text{ V}$, $V_{GS}=0\text{ V}$, $T_j=125\text{ }^\circ\text{C}$ |
| Gate-source leakage current | I_{GSS} | - | - | 100 | nA | $V_{GS}=20\text{ V}$, $V_{DS}=0\text{ V}$ |
| Drain-source on-state resistance | $R_{DS(on)}$ | - | 0.5 0.7 | 0.65 - | m Ω | $V_{GS}=10\text{ V}$, $I_D=100\text{ A}$ $V_{GS}=6\text{ V}$, $I_D=50\text{ A}$ |
| Gate resistance ¹⁾ | R_G | - | 2.2 | - | Ω | - |
| Transconductance | g_{fs} | - | 320 | - | S | $ V_{DS} \geq 2 I_b R_{DS(on)max}$, $I_D=100\text{ A}$ |

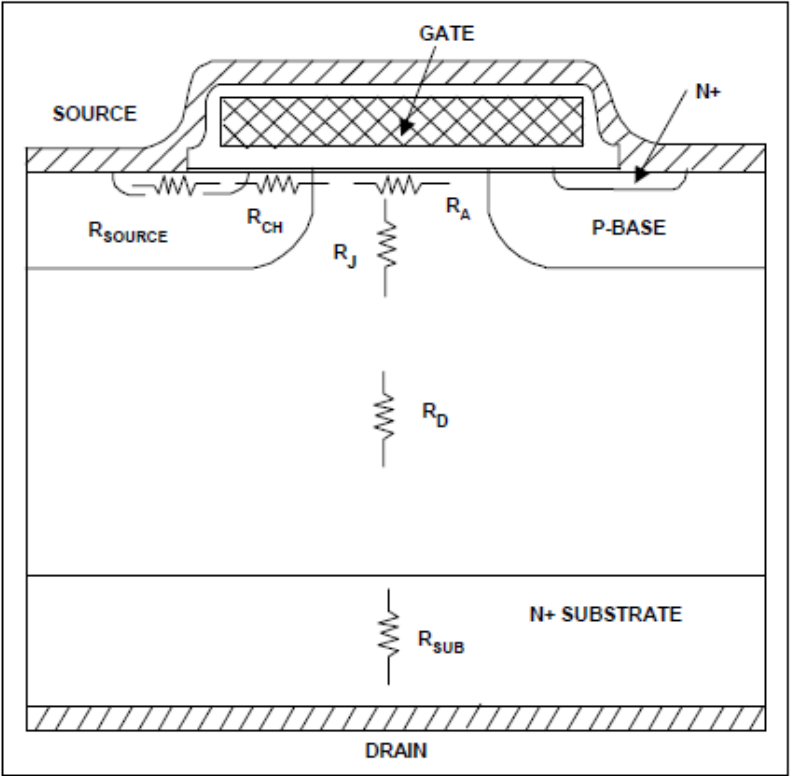
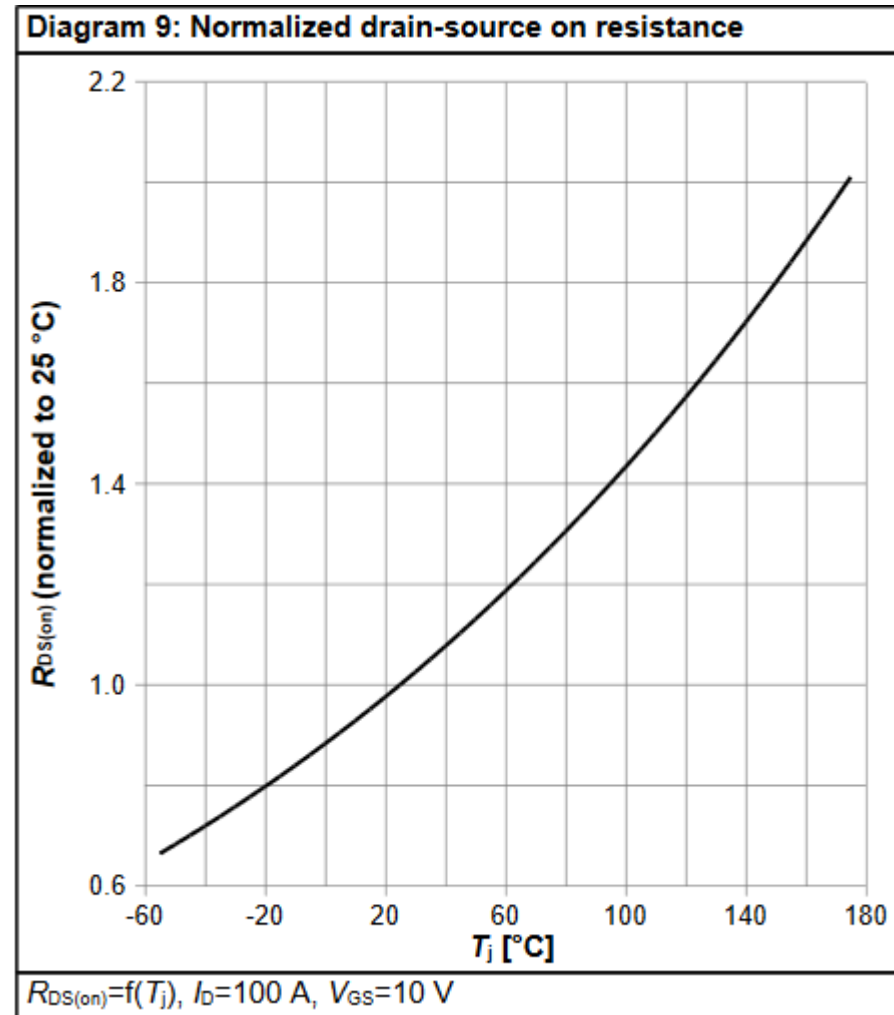


Figure 8. Origin of Internal Resistance in a Power MOSFET.

$R_{DS(on)} = R_{source} + R_{ch} + R_A + R_J + R_D + R_{sub} + R_{wcm}$

Параметри – $R_{ds(on)}$ – Зависимост от температурата



$R_{ds(on)}$ расте при повишаване на температурата, което води до намаляване на I_d и на разсейвана мощност $P = I_d^2 \cdot R_{ds(on)}$

Параметри – $R_{ds(on)}$ – Зависимост от U_{gs} и I_d

Diagram 8: Typ. drain-source on resistance

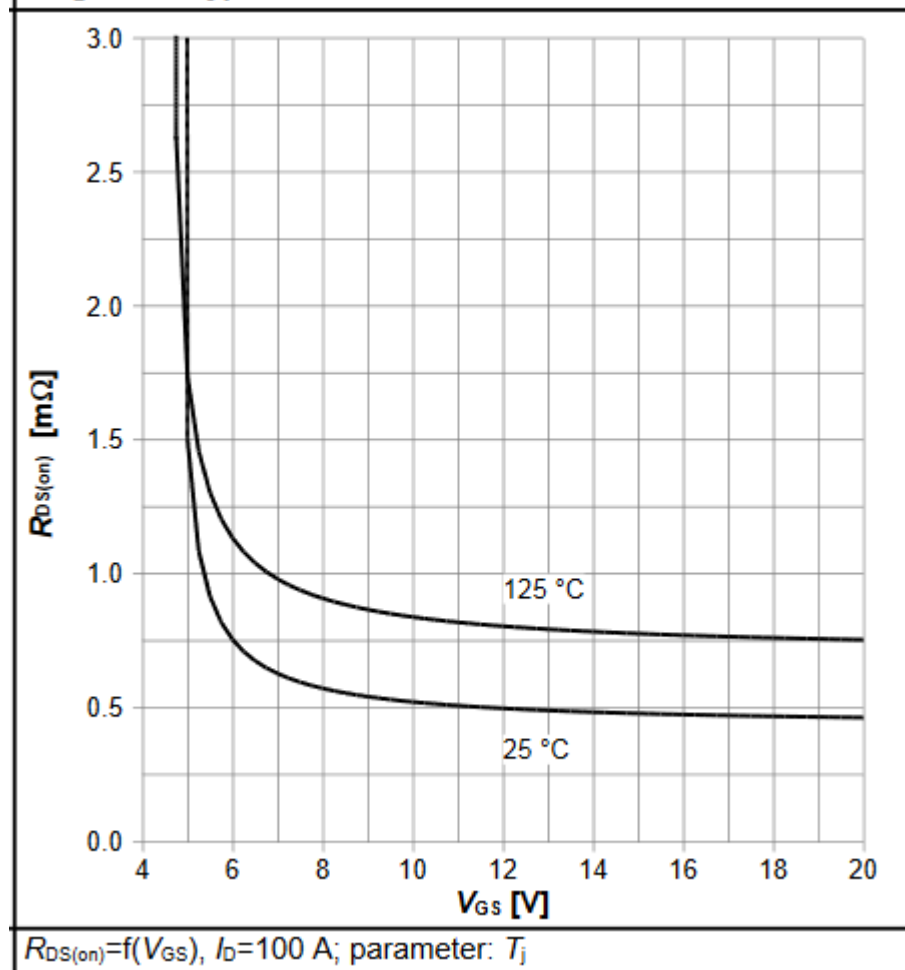
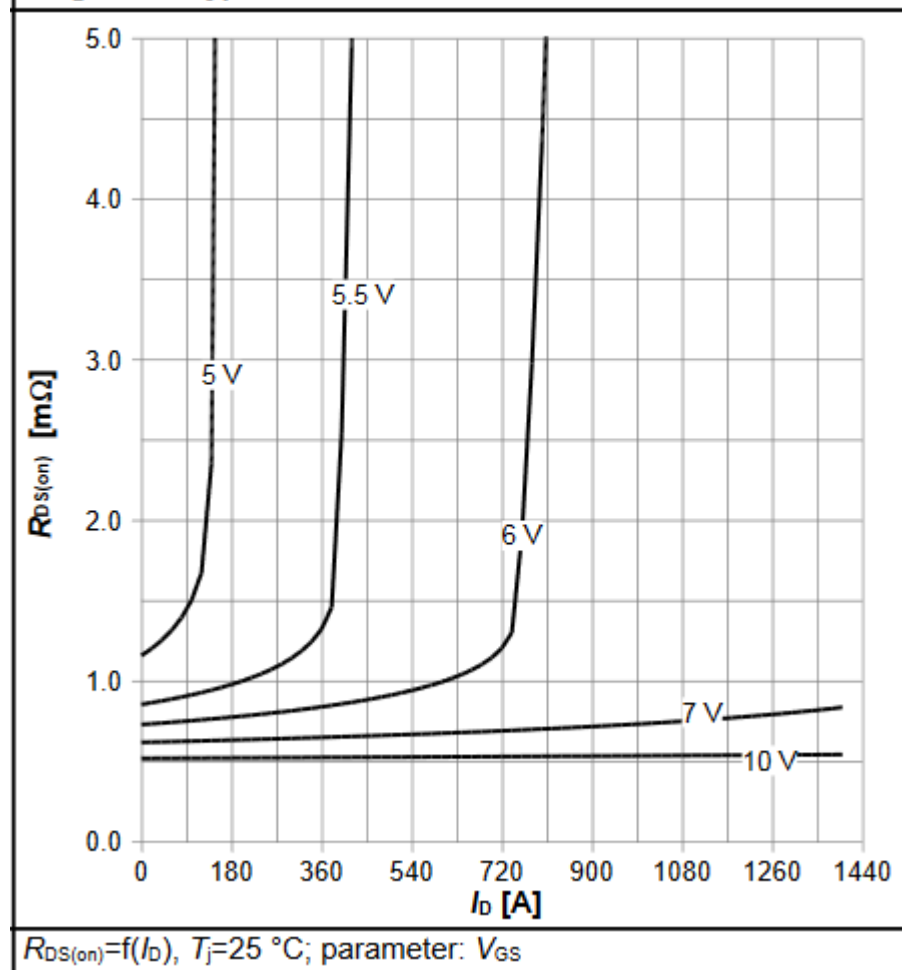


Diagram 6: Typ. drain-source on resistance

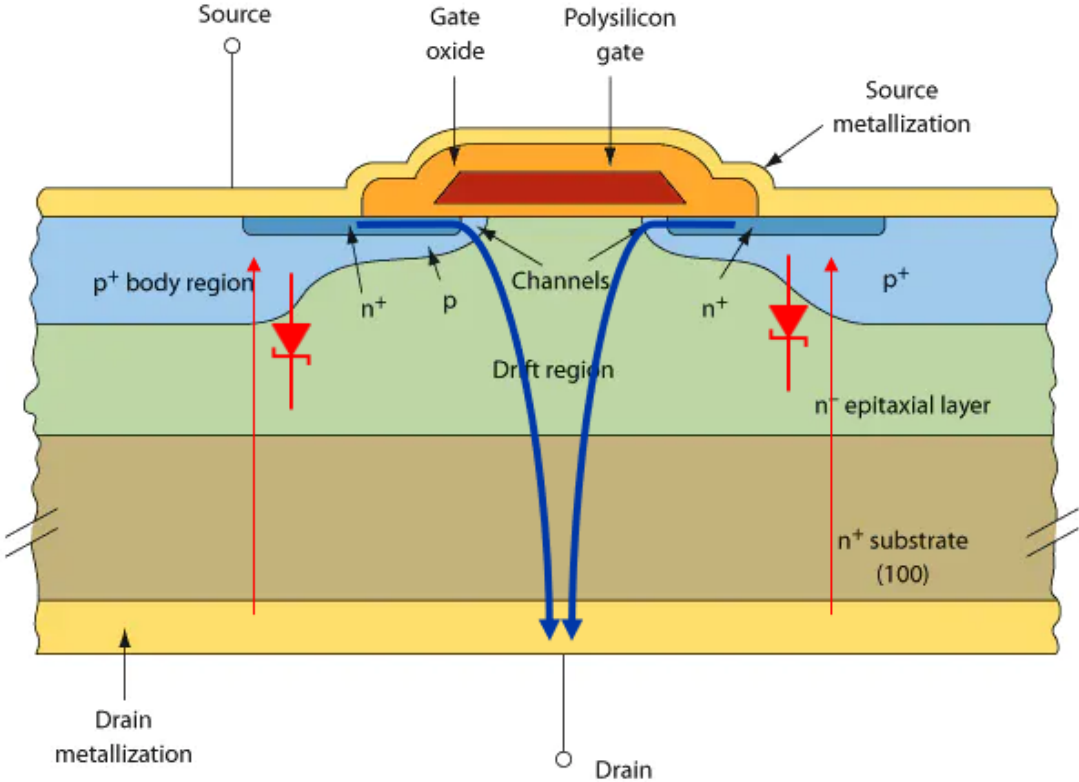


За да може MOSFET да комутира голям ток с минимални загуби, $R_{ds(on)}$ да е малко, т.е. напрежението U_{gs} трябва да е достатъчно високо.

Параметри – Drain-source breakdown voltage $V_{(BR)DSS}$

Table 4 Static characteristics

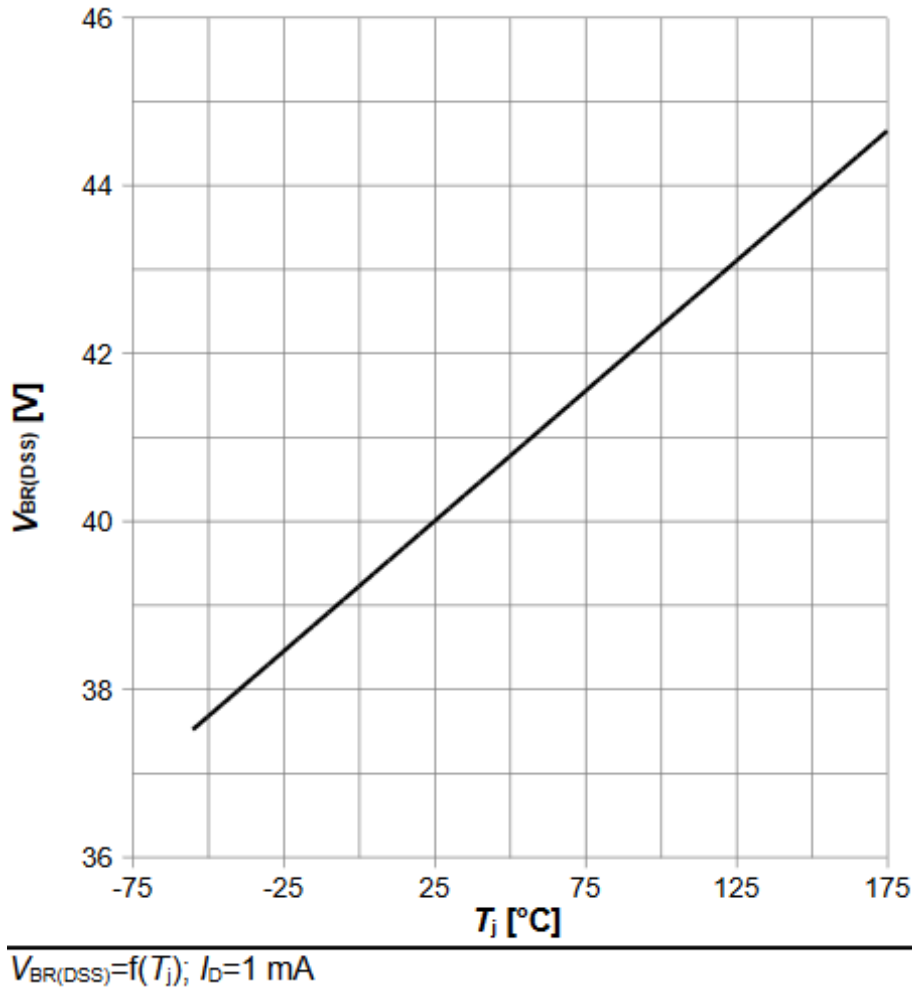
| Parameter | Symbol | Values | | | Unit | Note / Test Condition |
|---|---------------------|--------|------------|-----------|---------------|---|
| | | Min. | Typ. | Max. | | |
| Drain-source breakdown voltage | $V_{(BR)DSS}$ | 40 | - | - | V | $V_{GS}=0\text{ V}$, $I_D=250\text{ }\mu\text{A}$ |
| Breakdown voltage temperature coefficient | $dV_{(BR)DSS}/dT_j$ | - | 36 | - | mV/°C | $I_D=5\text{ mA}$, referenced to 25 °C |
| Gate threshold voltage | $V_{GS(th)}$ | 2.2 | - | 3.7 | V | $V_{DS}=V_{GS}$, $I_D=250\text{ }\mu\text{A}$ |
| Zero gate voltage drain current | I_{DSS} | - | - | 1 150 | μA | $V_{DS}=40\text{ V}$, $V_{GS}=0\text{ V}$, $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ $V_{DS}=40\text{ V}$, $V_{GS}=0\text{ V}$, $T_j=125\text{ }^\circ\text{C}$ |
| Gate-source leakage current | I_{GSS} | - | - | 100 | nA | $V_{GS}=20\text{ V}$, $V_{DS}=0\text{ V}$ |
| Drain-source on-state resistance | $R_{DS(on)}$ | - | 0.5 0.7 | 0.65 - | m Ω | $V_{GS}=10\text{ V}$, $I_D=100\text{ A}$ $V_{GS}=6\text{ V}$, $I_D=50\text{ A}$ |
| Gate resistance ¹⁾ | R_G | - | 2.2 | - | Ω | - |
| Transconductance | g_{fs} | - | 320 | - | S | $ V_{DS} \geq 2 I_D R_{DS(on)max}$, $I_D=100\text{ A}$ |



Параметри – Drain-source breakdown voltage $V_{(BR)DSS}$

Table 4 Static characteristics

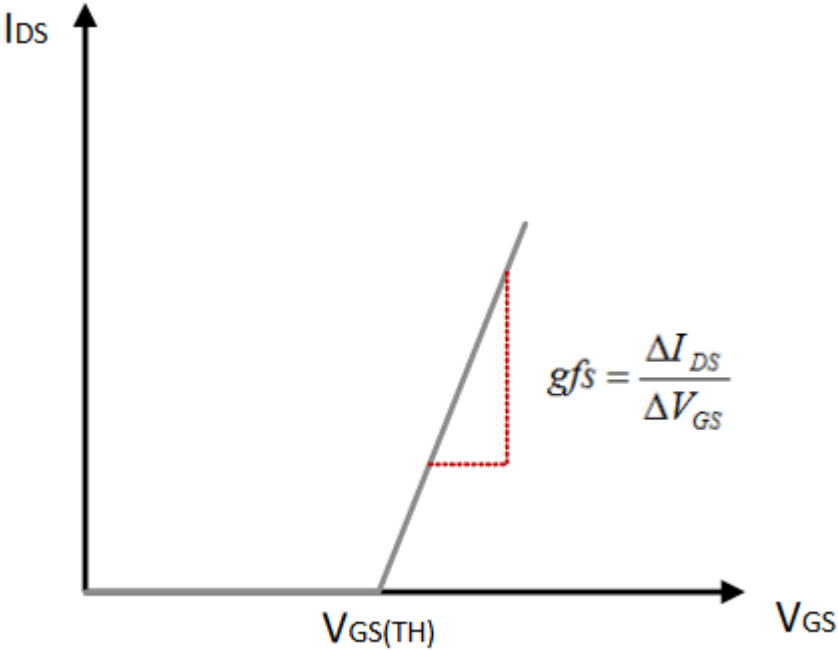
| Parameter | Symbol | Values | | | Unit | Note / Test Condition |
|---|---------------------|--------|------------|-----------|---------------|---|
| | | Min. | Typ. | Max. | | |
| Drain-source breakdown voltage | $V_{(BR)DSS}$ | 40 | - | - | V | $V_{GS}=0\text{ V}$, $I_D=250\text{ }\mu\text{A}$ |
| Breakdown voltage temperature coefficient | $dV_{(BR)DSS}/dT_j$ | - | 36 | - | mV/°C | $I_D=5\text{ mA}$, referenced to 25 °C |
| Gate threshold voltage | $V_{GS(th)}$ | 2.2 | - | 3.7 | V | $V_{DS}=V_{GS}$, $I_D=250\text{ }\mu\text{A}$ |
| Zero gate voltage drain current | I_{DSS} | - | - | 1 150 | μA | $V_{DS}=40\text{ V}$, $V_{GS}=0\text{ V}$, $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ $V_{DS}=40\text{ V}$, $V_{GS}=0\text{ V}$, $T_j=125\text{ }^\circ\text{C}$ |
| Gate-source leakage current | I_{GSS} | - | - | 100 | nA | $V_{GS}=20\text{ V}$, $V_{DS}=0\text{ V}$ |
| Drain-source on-state resistance | $R_{DS(on)}$ | - | 0.5 0.7 | 0.65 - | m Ω | $V_{GS}=10\text{ V}$, $I_D=100\text{ A}$ $V_{GS}=6\text{ V}$, $I_D=50\text{ A}$ |
| Gate resistance ¹⁾ | R_G | - | 2.2 | - | Ω | - |
| Transconductance | g_{fs} | - | 320 | - | S | $ V_{DS} \geq 2 I_D R_{DS(on)max}$, $I_D=100\text{ A}$ |



Параметри – Transconductance / стръмност на предавателната характеристика

Table 4 Static characteristics

| Parameter | Symbol | Values | | | Unit | Note / Test Condition |
|---|---------------------|--------|------------|-----------|---------------|---|
| | | Min. | Typ. | Max. | | |
| Drain-source breakdown voltage | $V_{(BR)DSS}$ | 40 | - | - | V | $V_{GS}=0\text{ V}$, $I_D=250\text{ }\mu\text{A}$ |
| Breakdown voltage temperature coefficient | $dV_{(BR)DSS}/dT_j$ | - | 36 | - | mV/°C | $I_D=5\text{ mA}$, referenced to 25 °C |
| Gate threshold voltage | $V_{GS(th)}$ | 2.2 | - | 3.7 | V | $V_{DS}=V_{GS}$, $I_D=250\text{ }\mu\text{A}$ |
| Zero gate voltage drain current | I_{DSS} | - | - | 1 150 | μA | $V_{DS}=40\text{ V}$, $V_{GS}=0\text{ V}$, $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ $V_{DS}=40\text{ V}$, $V_{GS}=0\text{ V}$, $T_j=125\text{ }^\circ\text{C}$ |
| Gate-source leakage current | I_{GSS} | - | - | 100 | nA | $V_{GS}=20\text{ V}$, $V_{DS}=0\text{ V}$ |
| Drain-source on-state resistance | $R_{DS(on)}$ | - | 0.5 0.7 | 0.65 - | m Ω | $V_{GS}=10\text{ V}$, $I_D=100\text{ A}$ $V_{GS}=6\text{ V}$, $I_D=50\text{ A}$ |
| Gate resistance ¹⁾ | R_G | - | 2.2 | - | Ω | - |
| Transconductance | g_{fs} | - | 320 | - | S | $ V_{DS} \geq 2 I_D R_{DS(on)max}$, $I_D=100\text{ A}$ |



Отразява чувствителността на дрейновият ток към промените на напрежението гейт-сорс.

Параметри – Dynamic characteristics

Table 5 Dynamic characteristics

| Parameter | Symbol | Values | | | Unit | Note / Test Condition |
|--|--------------|--------|-------|------|------|--|
| | | Min. | Typ. | Max. | | |
| Input capacitance ¹⁾ | C_{iss} | - | 18000 | - | pF | $V_{GS}=0\text{ V}, V_{DS}=20\text{ V}, f=1\text{ MHz}$ |
| Output capacitance ¹⁾ | C_{oss} | - | 2900 | - | pF | $V_{GS}=0\text{ V}, V_{DS}=20\text{ V}, f=1\text{ MHz}$ |
| Reverse transfer capacitance ¹⁾ | C_{rss} | - | 2000 | - | pF | $V_{GS}=0\text{ V}, V_{DS}=20\text{ V}, f=1\text{ MHz}$ |
| Turn-on delay time | $t_{d(on)}$ | - | 23 | - | ns | $V_{DD}=20\text{ V}, V_{GS}=10\text{ V}, I_D=30\text{ A}, R_{G,ext}=2.7\ \Omega$ |
| Rise time | t_r | - | 75 | - | ns | $V_{DD}=20\text{ V}, V_{GS}=10\text{ V}, I_D=30\text{ A}, R_{G,ext}=2.7\ \Omega$ |
| Turn-off delay time | $t_{d(off)}$ | - | | | | |
| Fall time | t_f | - | | | | |

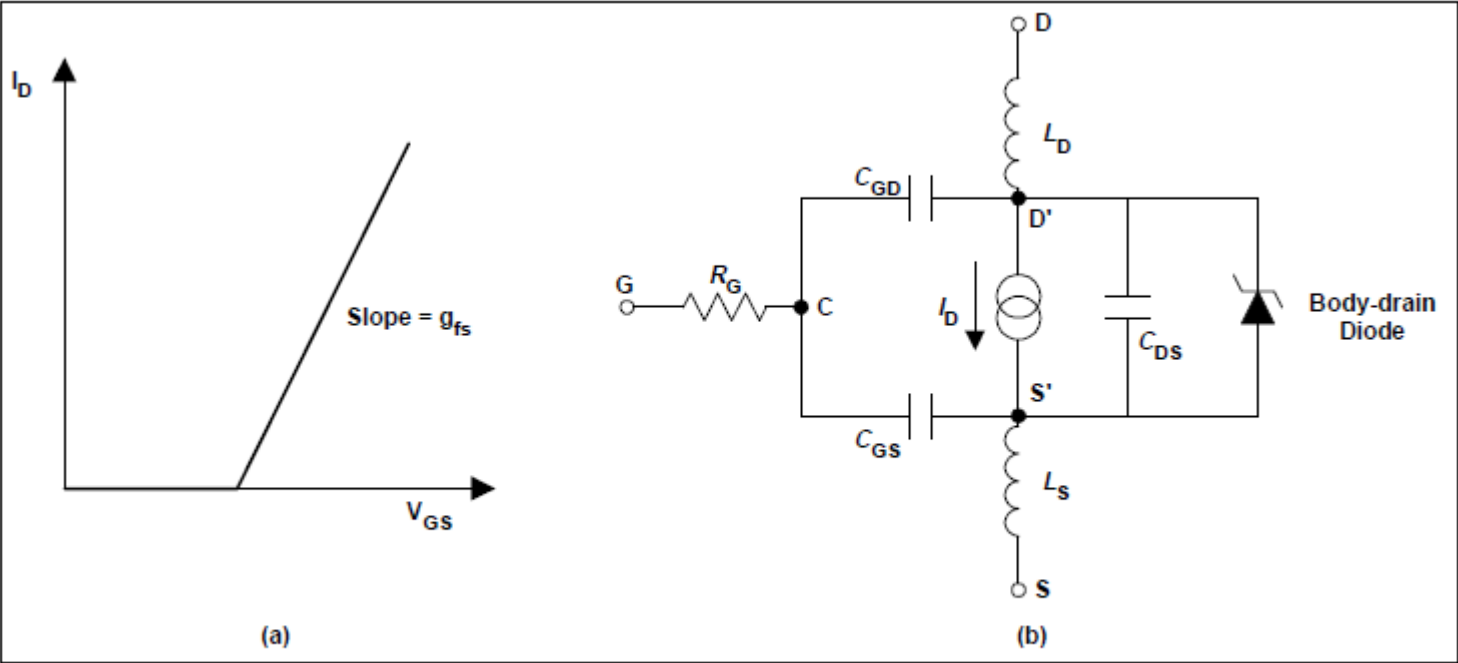


Figure 11. Power MOSFET (a) Transfer characteristics, (b) Equivalent Circuit Showing Components That Have Greatest Effect on Switching

Параметри – Dynamic characteristics – капацитети

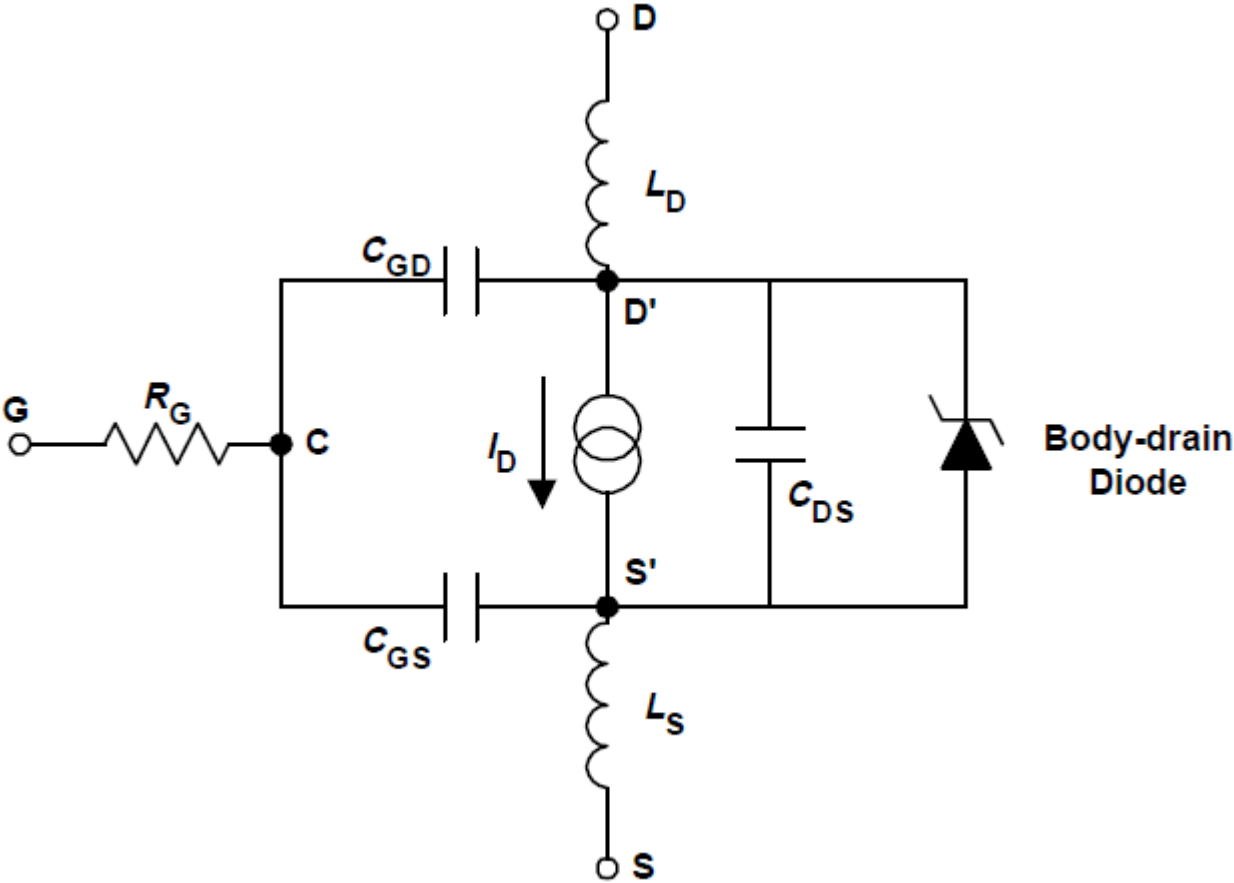
Table 5 Dynamic characteristics

| Parameter | Symbol | Values | | | Unit | Note / Test Condition |
|--|--------------|--------|-------|------|------|---|
| | | Min. | Typ. | Max. | | |
| Input capacitance ¹⁾ | C_{iss} | - | 18000 | - | pF | $V_{GS}=0\text{ V}, V_{DS}=20\text{ V}, f=1\text{ MHz}$ |
| Output capacitance ¹⁾ | C_{oss} | - | 2900 | - | pF | $V_{GS}=0\text{ V}, V_{DS}=20\text{ V}, f=1\text{ MHz}$ |
| Reverse transfer capacitance ¹⁾ | C_{rss} | - | 2000 | - | pF | $V_{GS}=0\text{ V}, V_{DS}=20\text{ V}, f=1\text{ MHz}$ |
| Turn-on delay time | $t_{d(on)}$ | - | 23 | - | | |
| Rise time | t_r | - | 75 | - | | |
| Turn-off delay time | $t_{d(off)}$ | - | 197 | - | | |
| Fall time | t_f | - | 114 | - | | |

$C_{iss} = C_{GS} + C_{GD}, C_{DS} \text{ shorted}$

$C_{rss} = C_{GD}$

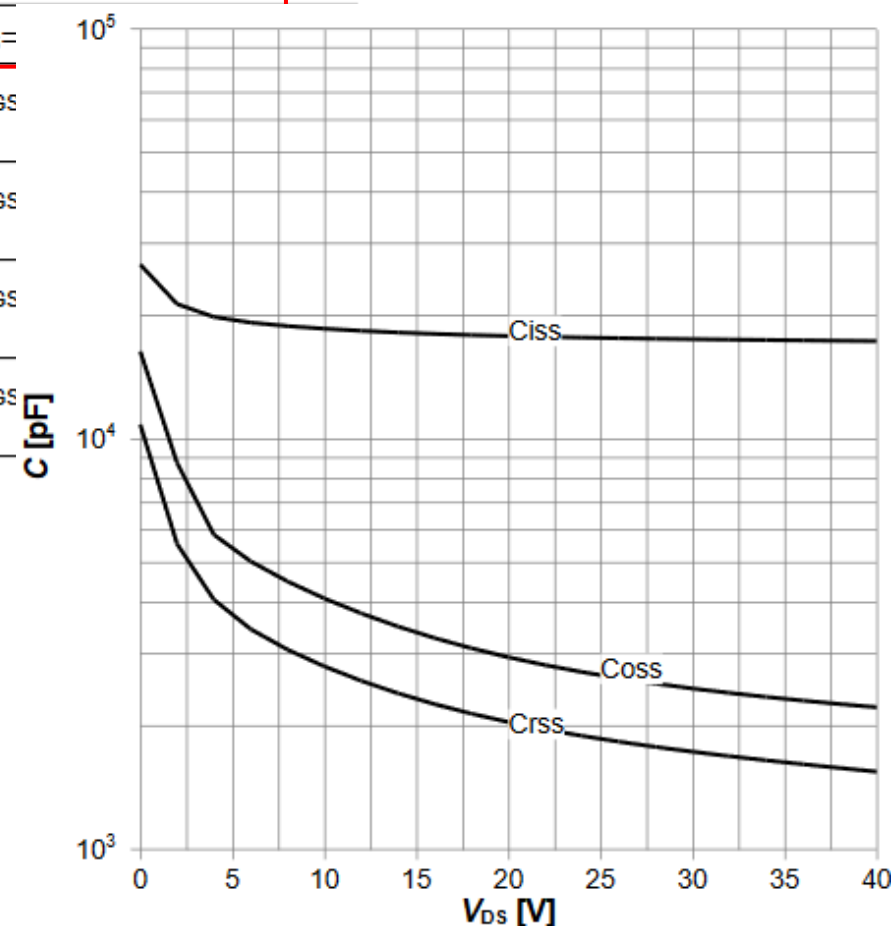
$C_{oss} = C_{DS} + C_{GD}$



Параметри – Dynamic characteristics – капацитети

Table 5 Dynamic characteristics

| Parameter | Symbol | Values | | | Unit | Note / Test Condition |
|--|--------------|--------|-------|------|------|---|
| | | Min. | Typ. | Max. | | |
| Input capacitance ¹⁾ | C_{iss} | - | 18000 | - | pF | $V_{GS}=0\text{ V}$, $V_{DS}=20\text{ V}$, $f=1\text{ MHz}$ |
| Output capacitance ¹⁾ | C_{oss} | - | 2900 | - | pF | $V_{GS}=0\text{ V}$, $V_{DS}=20\text{ V}$, $f=1\text{ MHz}$ |
| Reverse transfer capacitance ¹⁾ | C_{rss} | - | 2000 | - | pF | $V_{GS}=0\text{ V}$, $V_{DS}=$ |
| Turn-on delay time | $t_{d(on)}$ | - | 23 | - | ns | $V_{DD}=20\text{ V}$, V_{GS} $R_{G,ext}=2.7\ \Omega$ |
| Rise time | t_r | - | 75 | - | ns | $V_{DD}=20\text{ V}$, V_{GS} $R_{G,ext}=2.7\ \Omega$ |
| Turn-off delay time | $t_{d(off)}$ | - | 197 | - | ns | $V_{DD}=20\text{ V}$, V_{GS} $R_{G,ext}=2.7\ \Omega$ |
| Fall time | t_f | - | 114 | - | ns | $V_{DD}=20\text{ V}$, V_{GS} $R_{G,ext}=2.7\ \Omega$ |



$$C=f(V_{DS}); V_{GS}=0\text{ V}; f=1\text{ MHz}$$

Параметри – Dynamic characteristics – закъснения

Закъснението при включване, $t_{d(on)}$, е времето, необходимо за зареждане на входния капацитет на MOSFET, преди да започне протичане на дрейнов ток.

$t_{d(off)}$ е времето, необходимо за разреждане на капацитета, преди транзистора започне да се „запушва“.

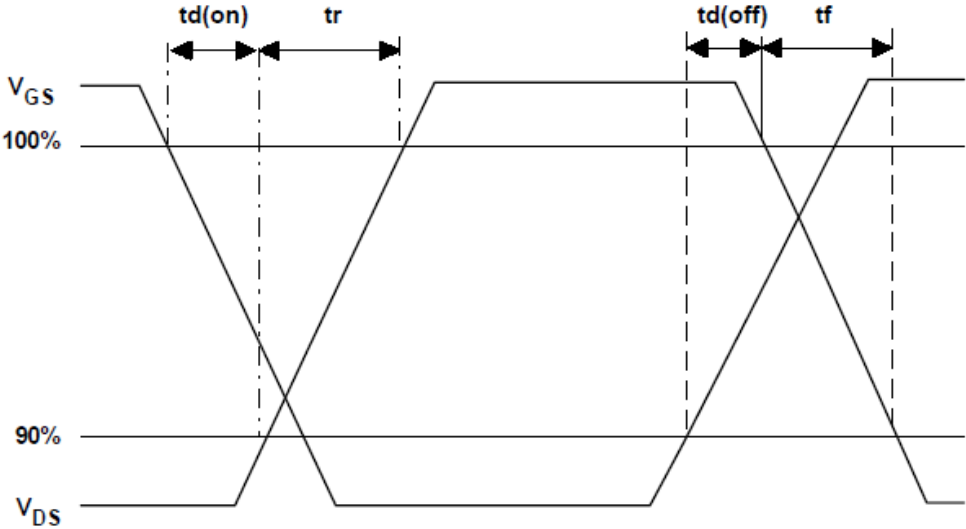


Table 5 Dynamic characteristics

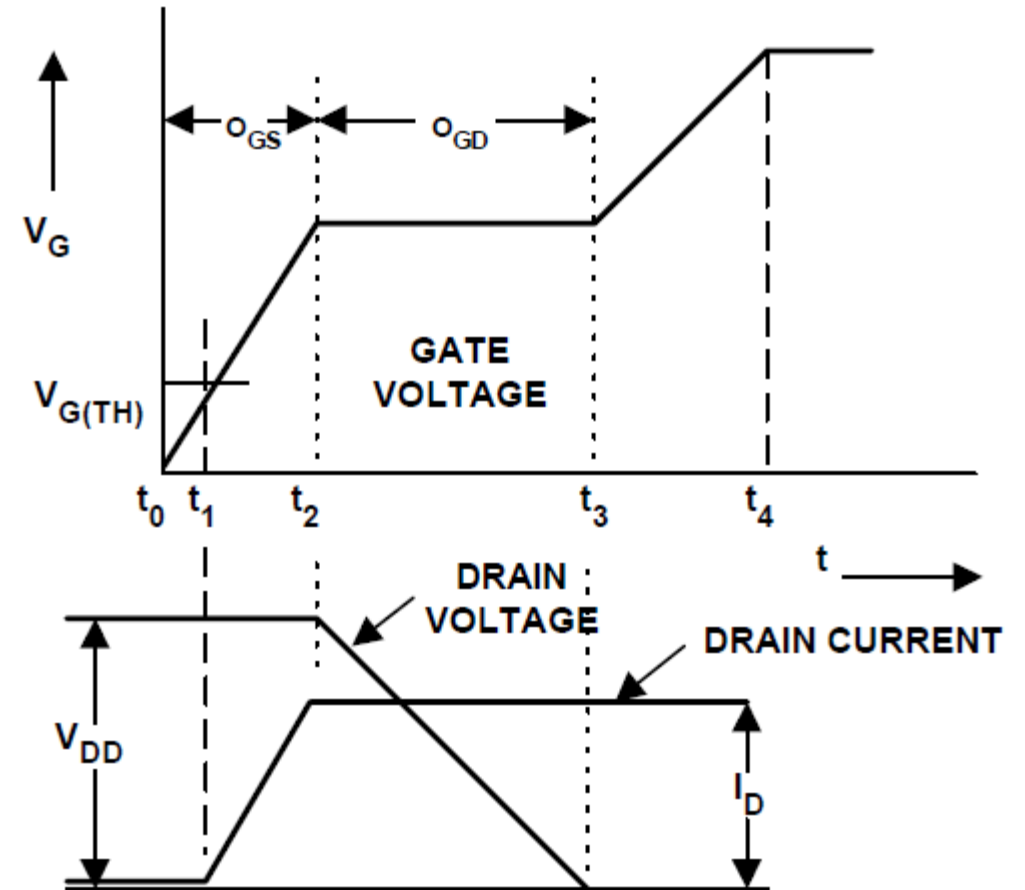
| Parameter | Symbol | Values | | | Unit | Note / Test Condition |
|--|--------------|--------|-------|------|------|---|
| | | Min. | Typ. | Max. | | |
| Input capacitance ¹⁾ | C_{iss} | - | 18000 | - | pF | $V_{GS}=0\text{ V}$, $V_{DS}=20\text{ V}$, $f=1\text{ MHz}$ |
| Output capacitance ¹⁾ | C_{oss} | - | 2900 | - | pF | $V_{GS}=0\text{ V}$, $V_{DS}=20\text{ V}$, $f=1\text{ MHz}$ |
| Reverse transfer capacitance ¹⁾ | C_{rss} | - | 2000 | - | pF | $V_{GS}=0\text{ V}$, $V_{DS}=20\text{ V}$, $f=1\text{ MHz}$ |
| Turn-on delay time | $t_{d(on)}$ | - | 23 | - | ns | $V_{DD}=20\text{ V}$, $V_{GS}=10\text{ V}$, $I_D=30\text{ A}$, $R_{G,ext}=2.7\text{ }\Omega$ |
| Rise time | t_r | - | 75 | - | ns | $V_{DD}=20\text{ V}$, $V_{GS}=10\text{ V}$, $I_D=30\text{ A}$, $R_{G,ext}=2.7\text{ }\Omega$ |
| Turn-off delay time | $t_{d(off)}$ | - | 197 | - | ns | $V_{DD}=20\text{ V}$, $V_{GS}=10\text{ V}$, $I_D=30\text{ A}$, $R_{G,ext}=2.7\text{ }\Omega$ |
| Fall time | t_f | - | 114 | - | ns | $V_{DD}=20\text{ V}$, $V_{GS}=10\text{ V}$, $I_D=30\text{ A}$, $R_{G,ext}=2.7\text{ }\Omega$ |

Параметри – Gate charge characteristics

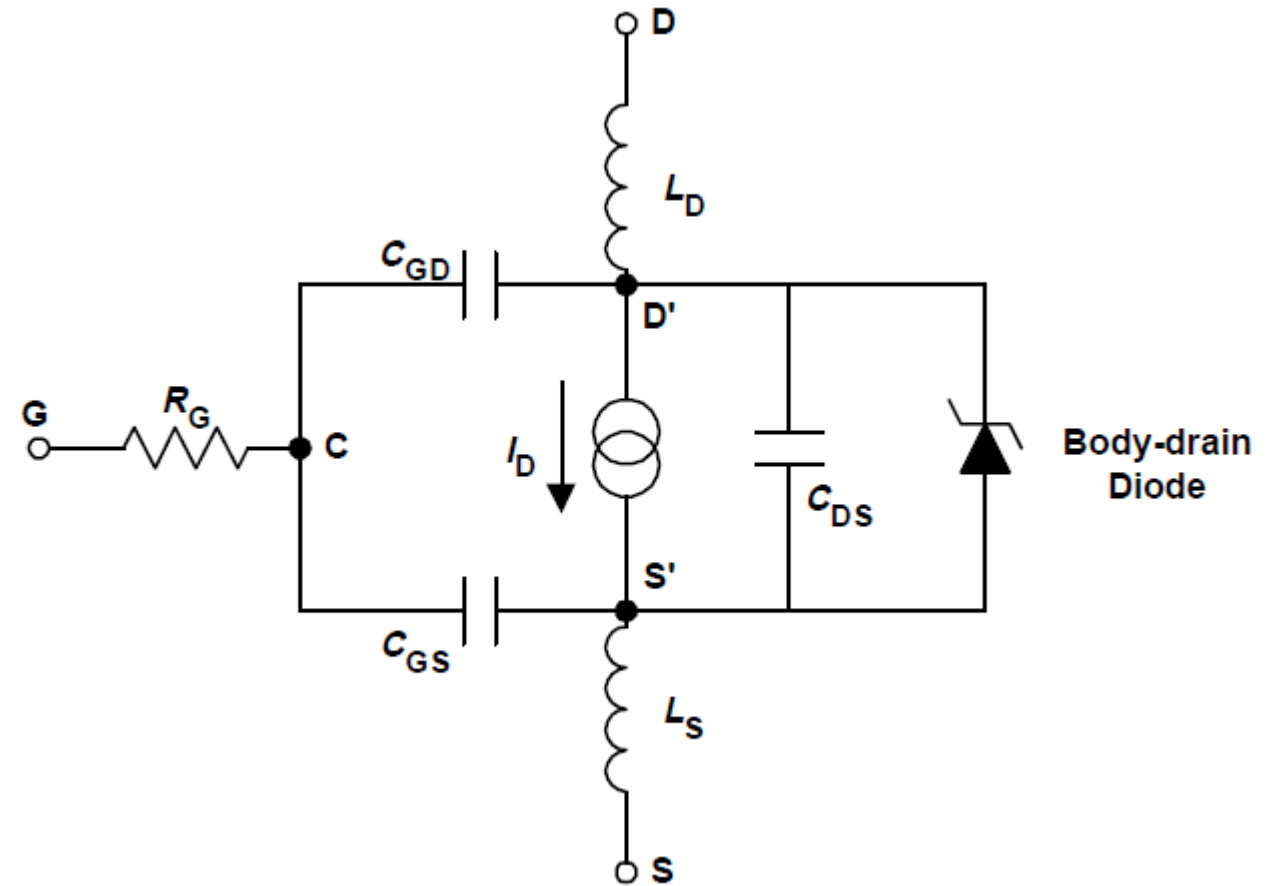
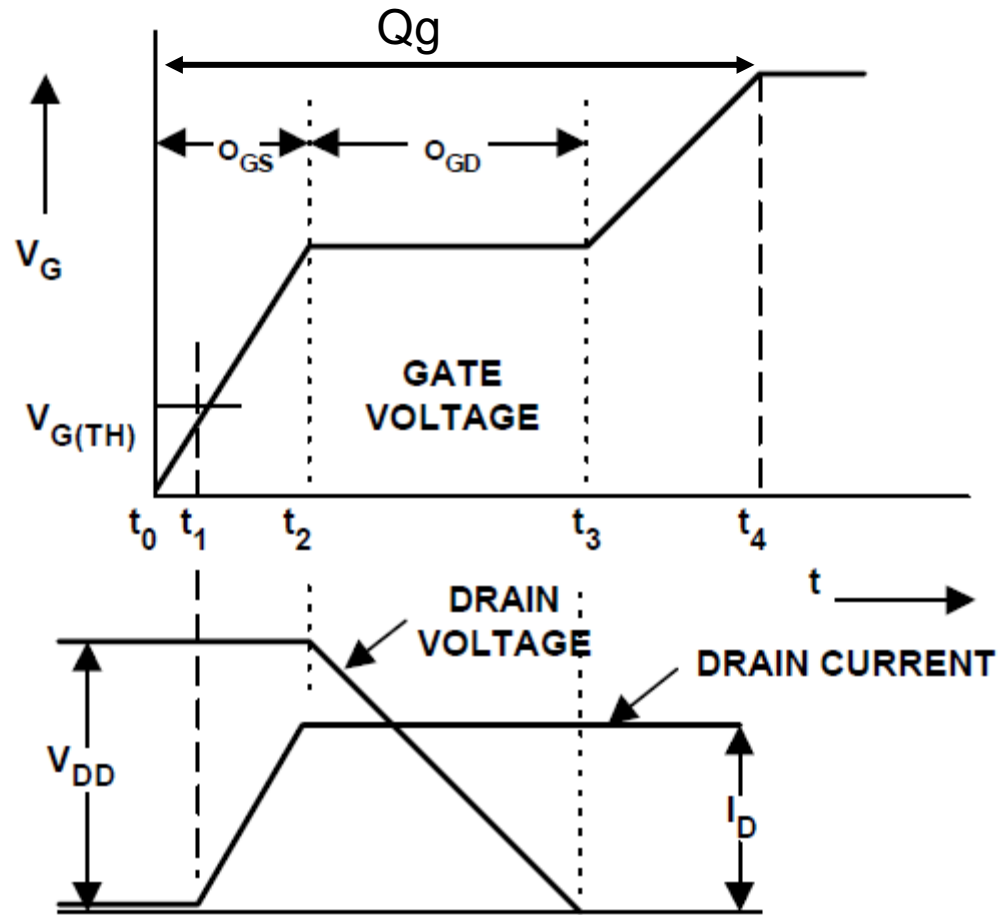
Table 6 Gate charge characteristics¹⁾

| Parameter | Symbol | Values | | | Unit |
|------------------------------------|---------------|--------|------|------|------|
| | | Min. | Typ. | Max. | |
| Gate to source charge | Q_{gs} | - | 85 | - | nC |
| Gate charge at threshold | $Q_{g(th)}$ | - | 54 | - | nC |
| Gate to drain charge ²⁾ | Q_{gd} | - | 121 | - | nC |
| Switching charge | Q_{sw} | - | 152 | - | nC |
| Gate charge total ²⁾ | Q_g | - | 366 | 458 | nC |
| Gate plateau voltage | $V_{plateau}$ | - | 4.8 | - | V |
| Gate charge total, sync. FET | $Q_{g(sync)}$ | - | 245 | - | nC |
| Output charge ¹⁾ | Q_{oss} | - | 101 | - | nC |

Total Gate Charge (Q_g) – количеството заряд, което трябва да се инжектира в гейта, за да се включи MOSFET.



Параметри – Gate charge characteristics

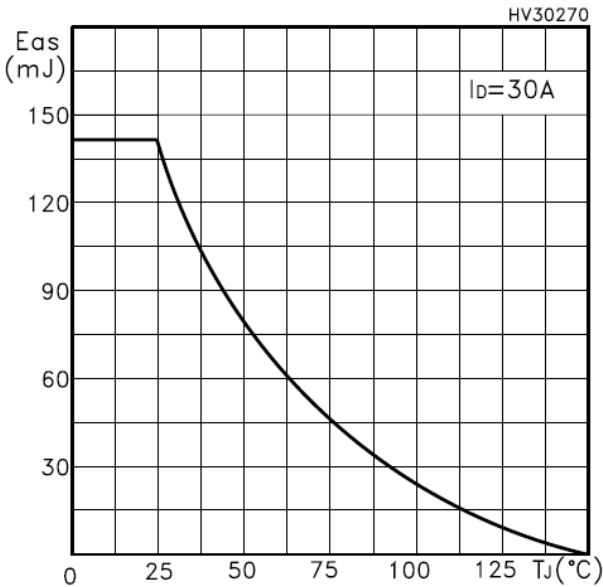


Параметри – Avalanche data

Table 4. Avalanche data

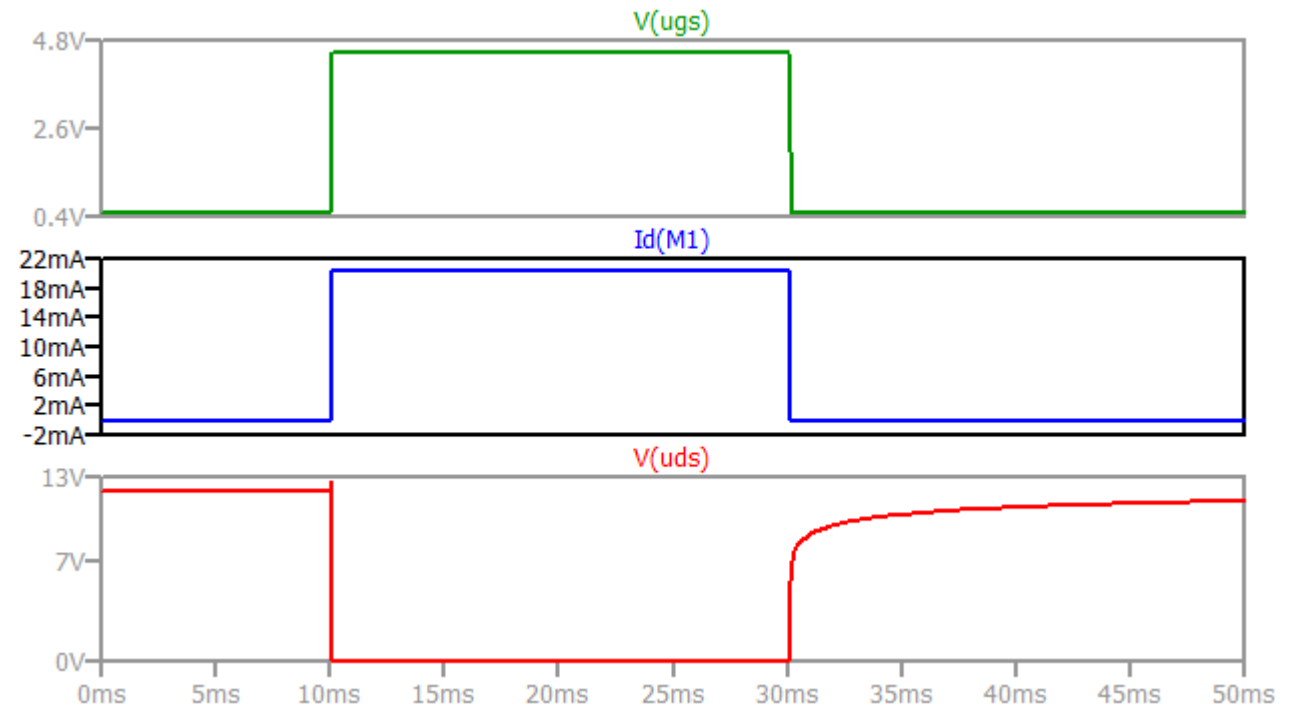
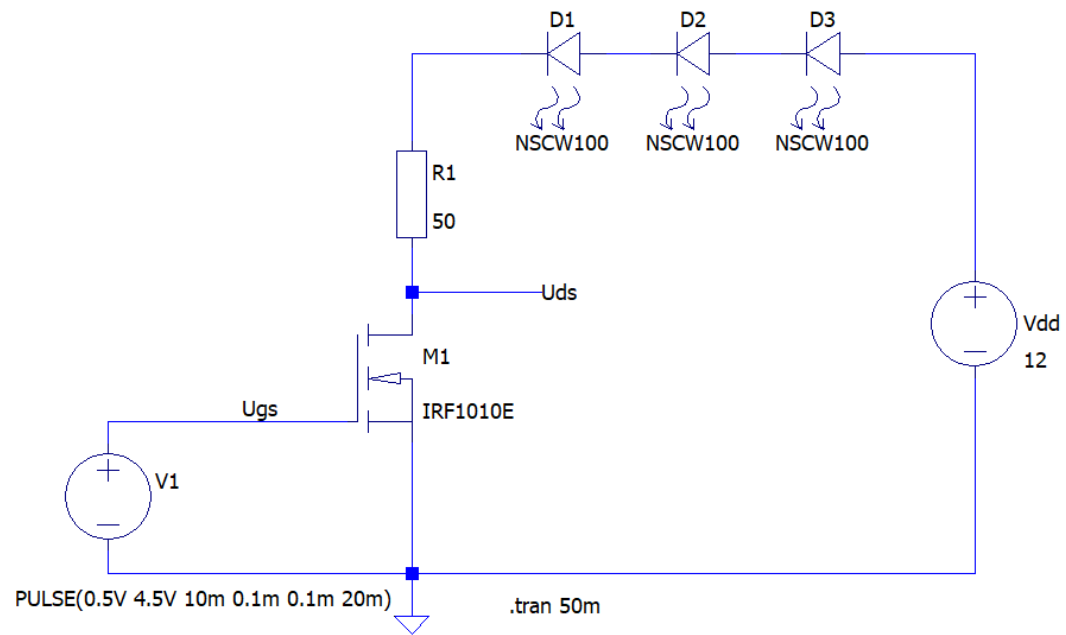
| Symbol | Parameter | Value | Unit |
|----------|---|-------|------|
| I_{AR} | Avalanche current, repetitive or not repetitive (pulse width limited by T_{jmax}) | 30 | A |
| E_{AS} | Single pulse avalanche energy (starting $T_j=25^{\circ}C$, $I_D=I_{AR}$, $V_{DD}=50V$) | 140 | mJ |

Figure 15. Maximum avalanche energy vs temperature



Схеми – MOSFET ключ

Управление на светодиоди (резистивен товар)



OFF

ON

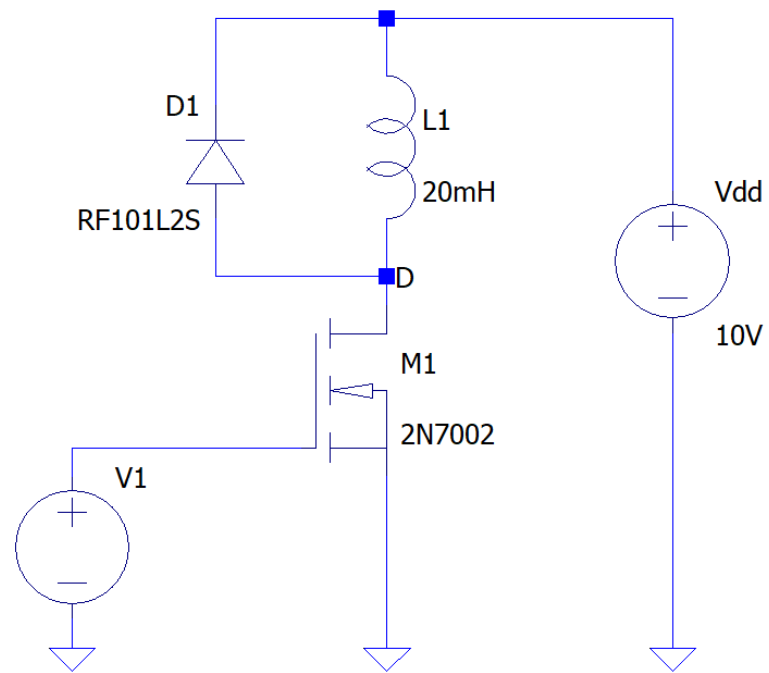
OFF

LED-DRV.asc

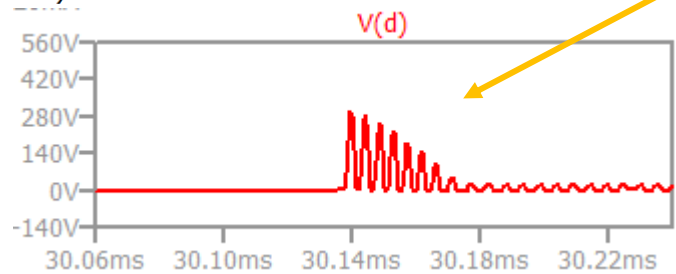
<https://github.com/vpt-tus/ppe>

Схеми – MOSFET ключ

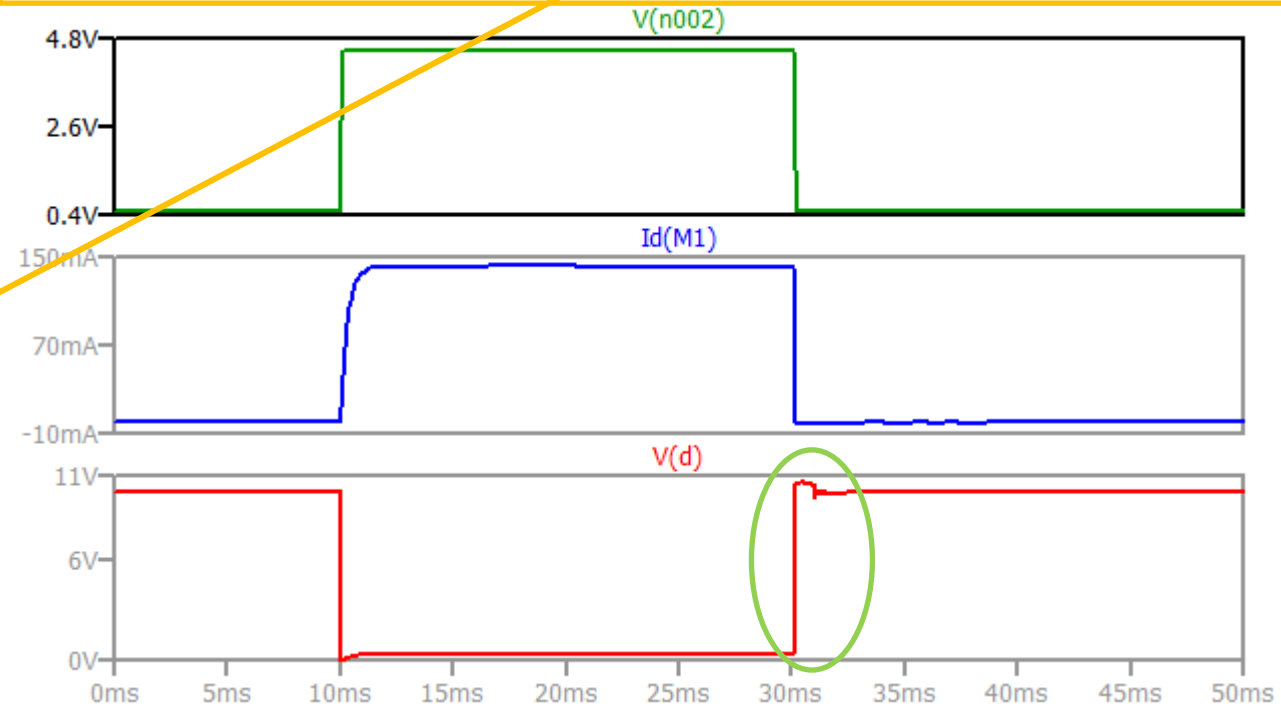
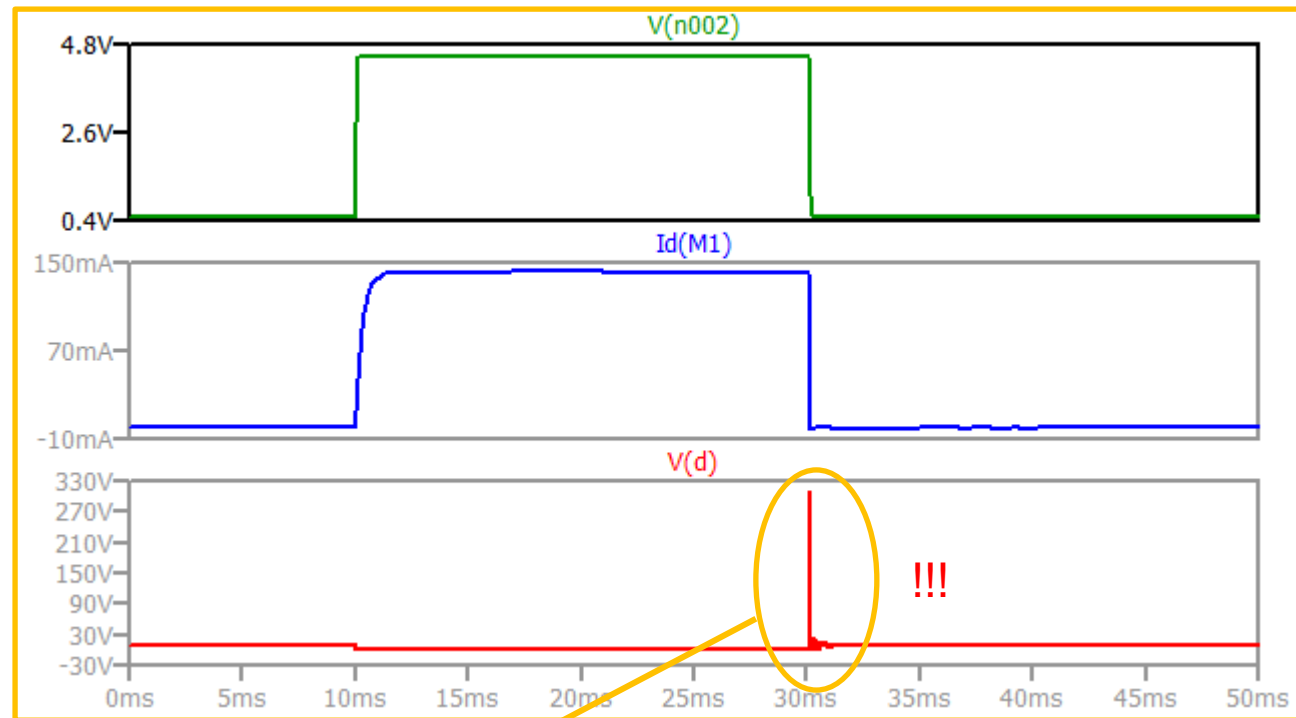
Управление на индуктивен товар



PULSE(0.5V 4.5V 10m 0.1m 0.1m 20m)
.tran 50m



Без D1

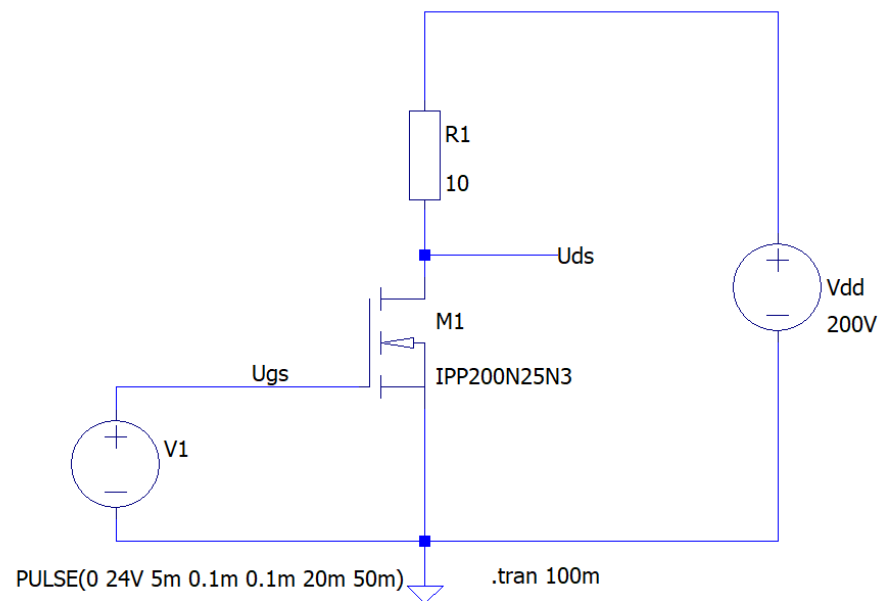


FET-switch-ind-2.asc

<https://github.com/vpt-tus/ppe>

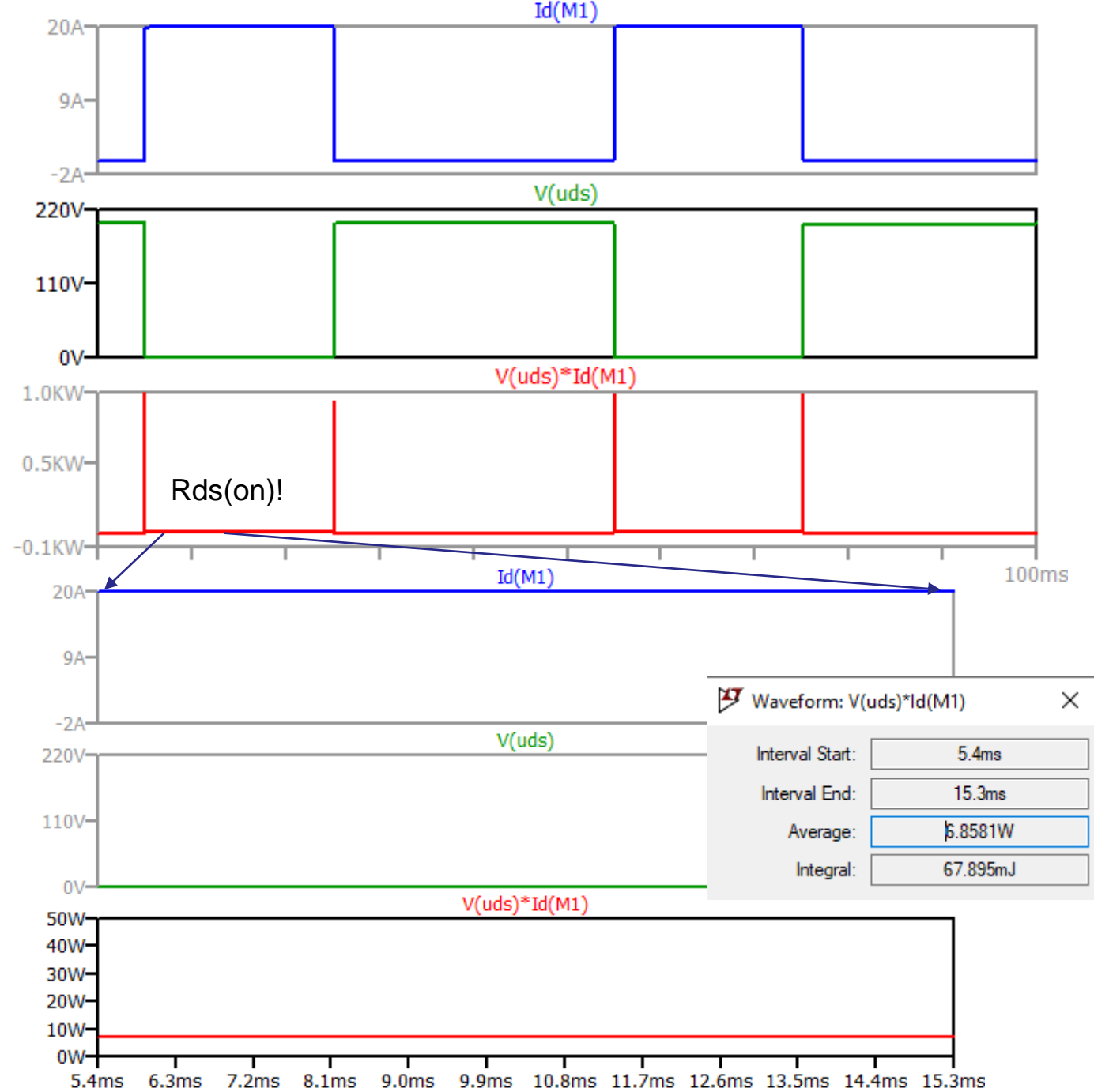
Схеми – MOSFET ключ

Разсейвана мощност



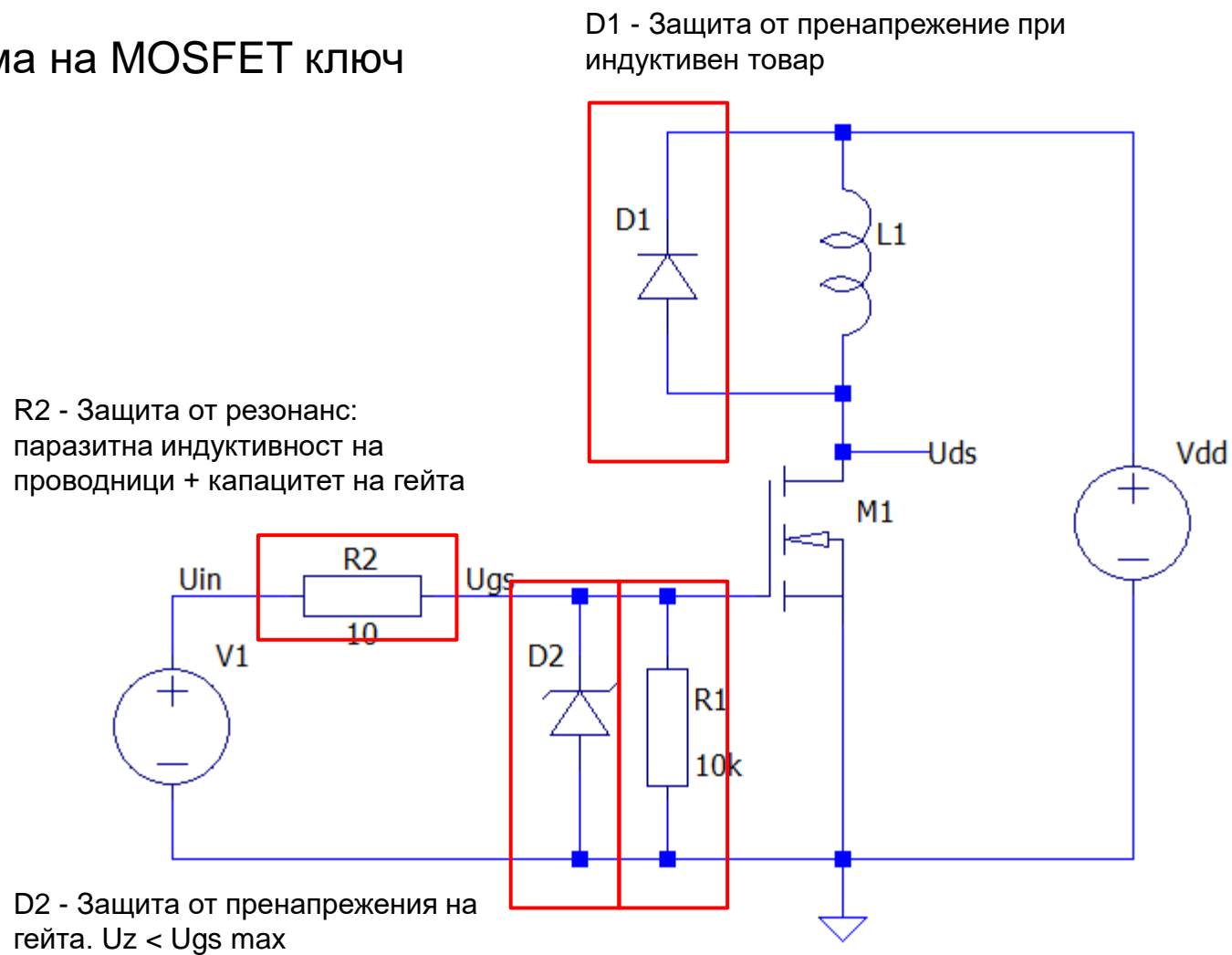
FET-switch-power.asc

<https://github.com/vpt-tus/ppe>



Схеми – MOSFET ключ

Практическа схема на MOSFET ключ

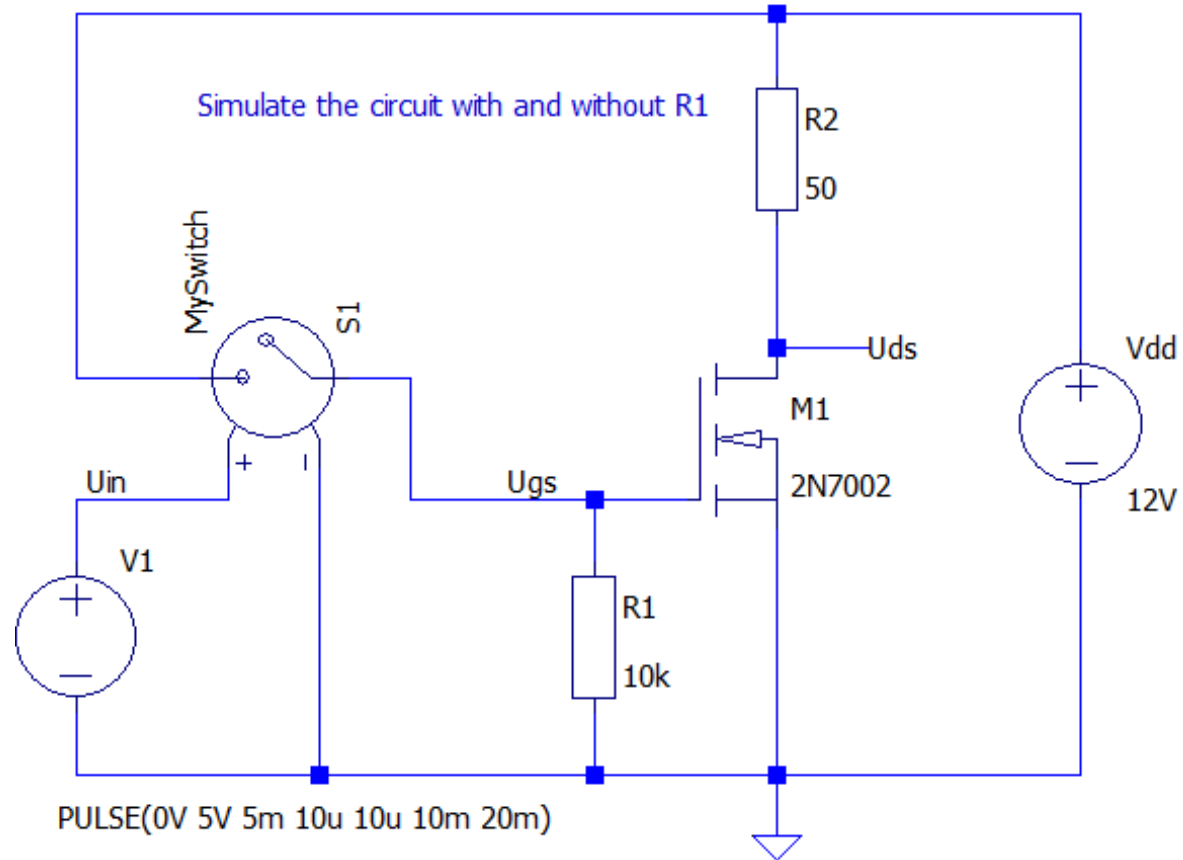


Защо е необходим резистора между гейта и сорса?

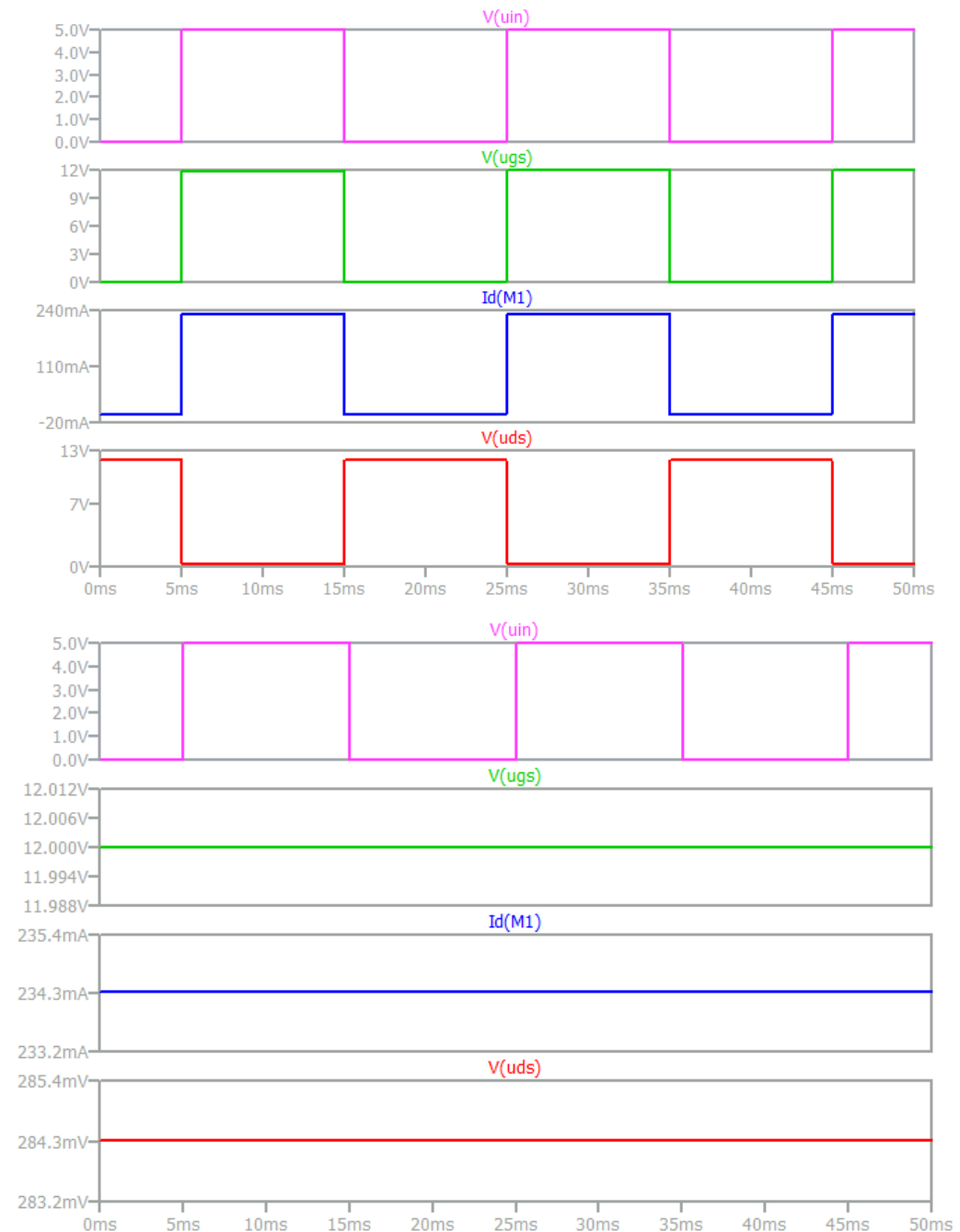
Схеми – MOSFET ключ

Защо е необходим резистора между гейта и сорса?

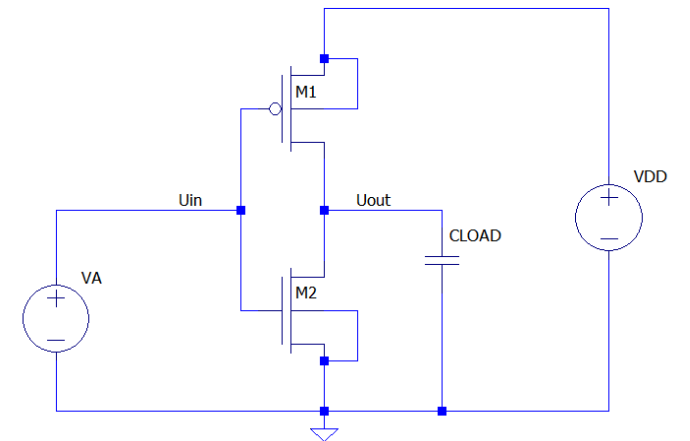
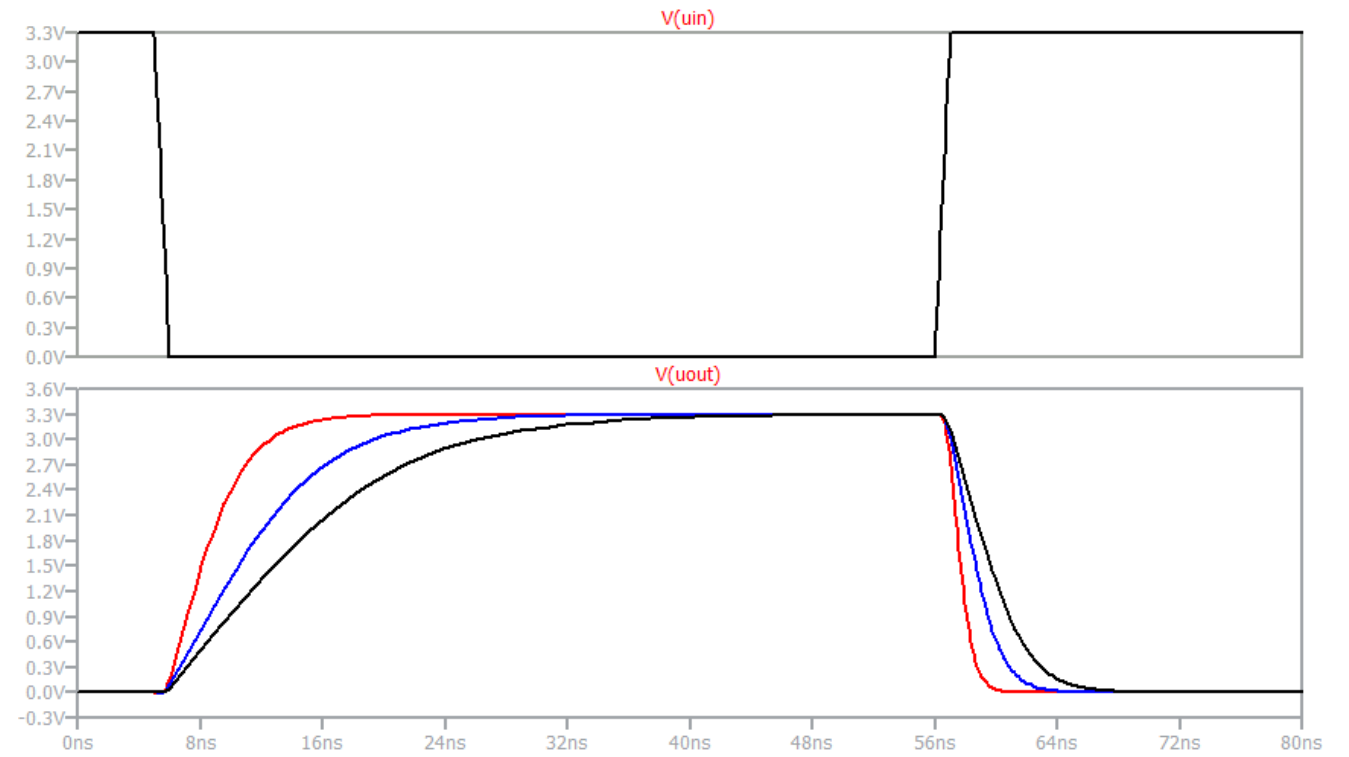
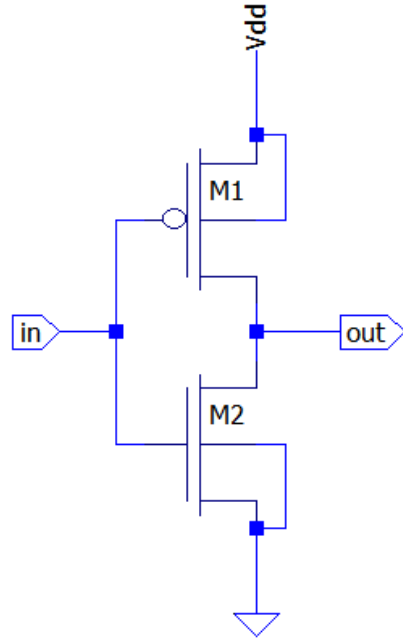
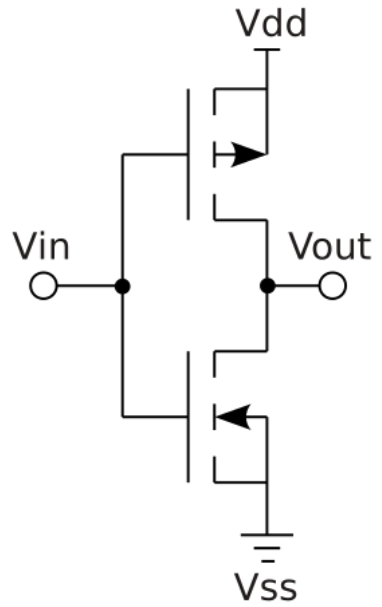
```
.model myswitch sw(Ron=1 Roff=10Meg Vt=0.5V Vh=-0.4V)
```



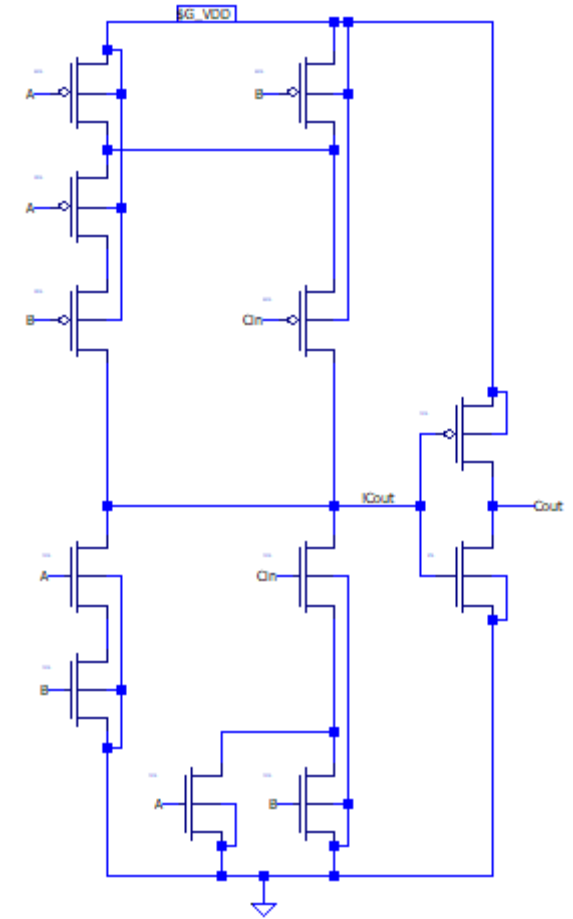
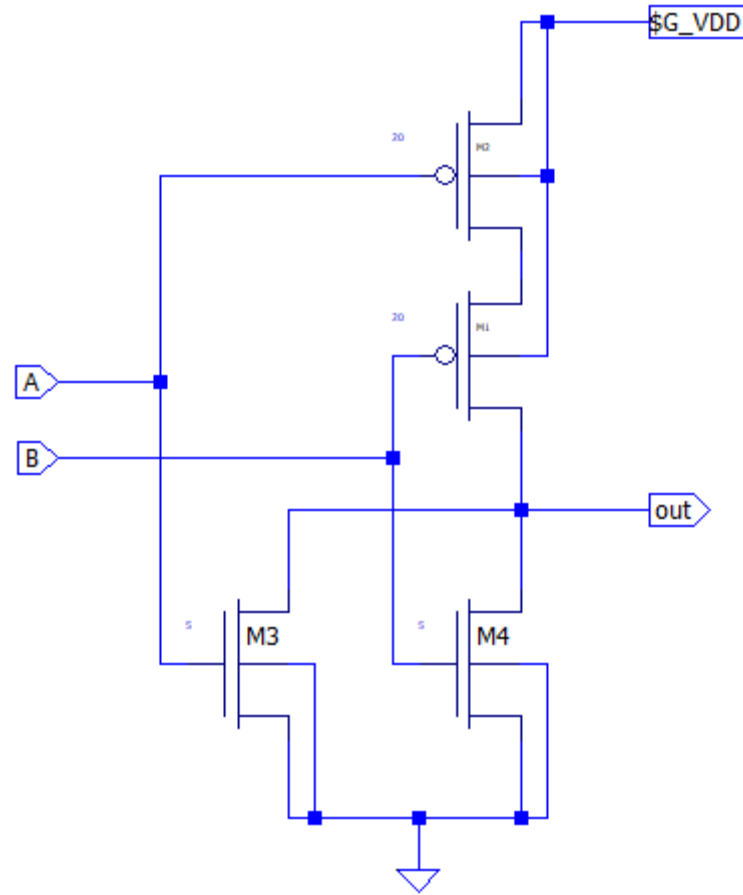
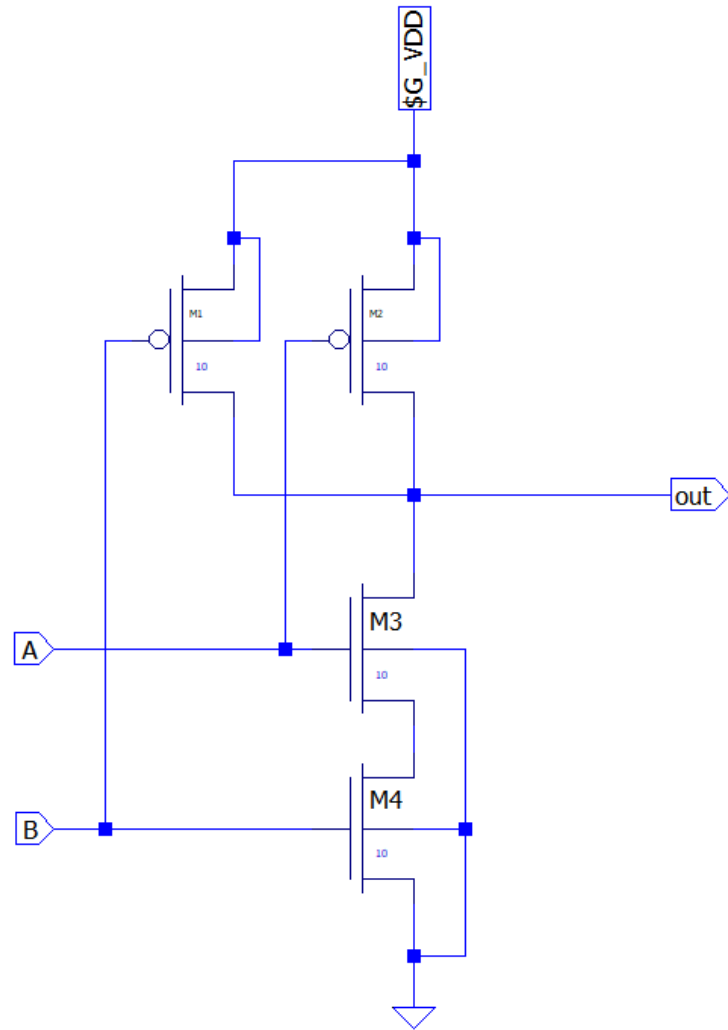
```
.tran 50m
```



Схеми – CMOS



Схеми – CMOS



Схеми – OpAmp

