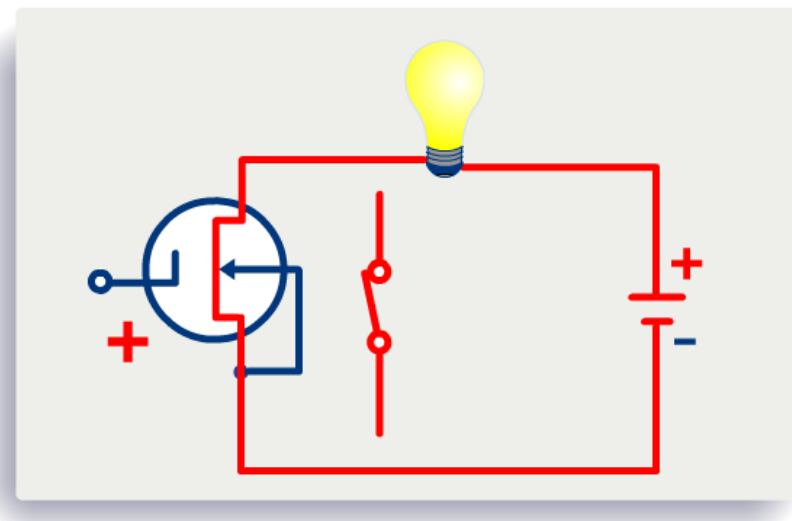
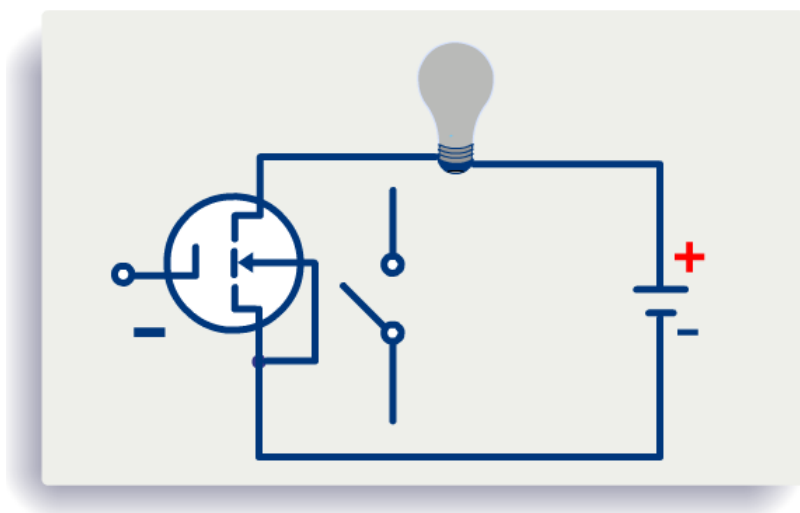




MOS транзистори

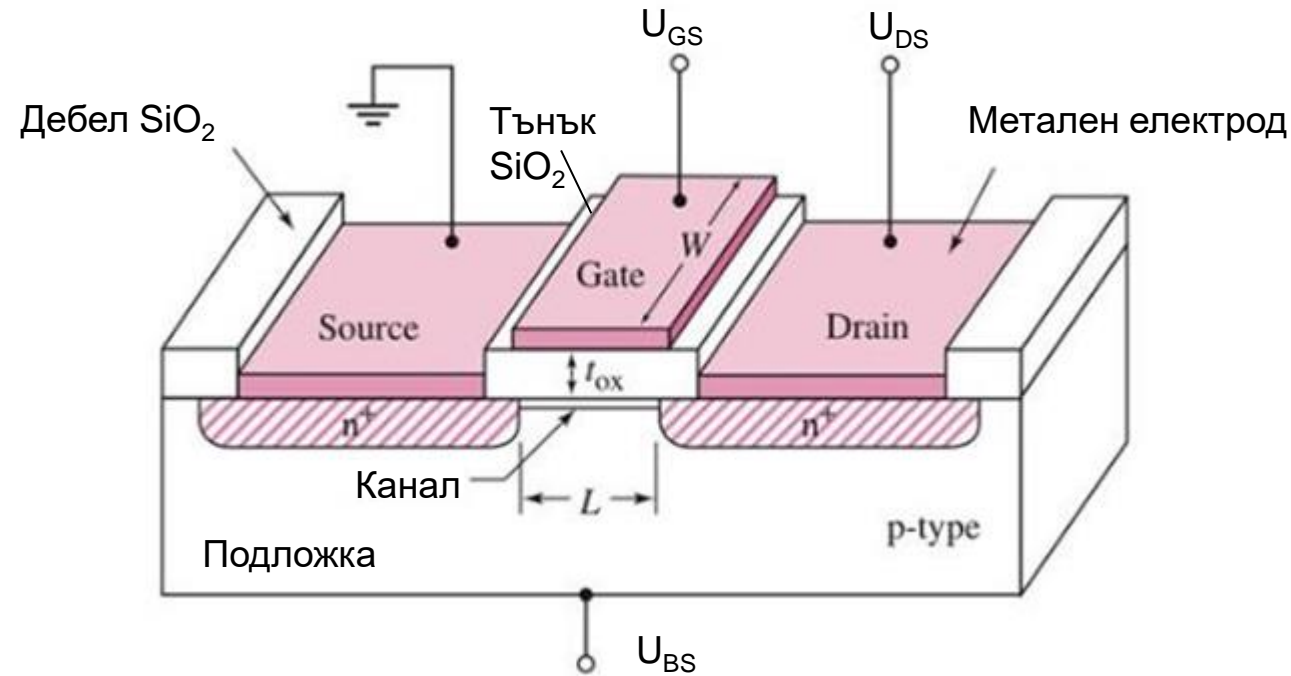
Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor – MOSFET



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.

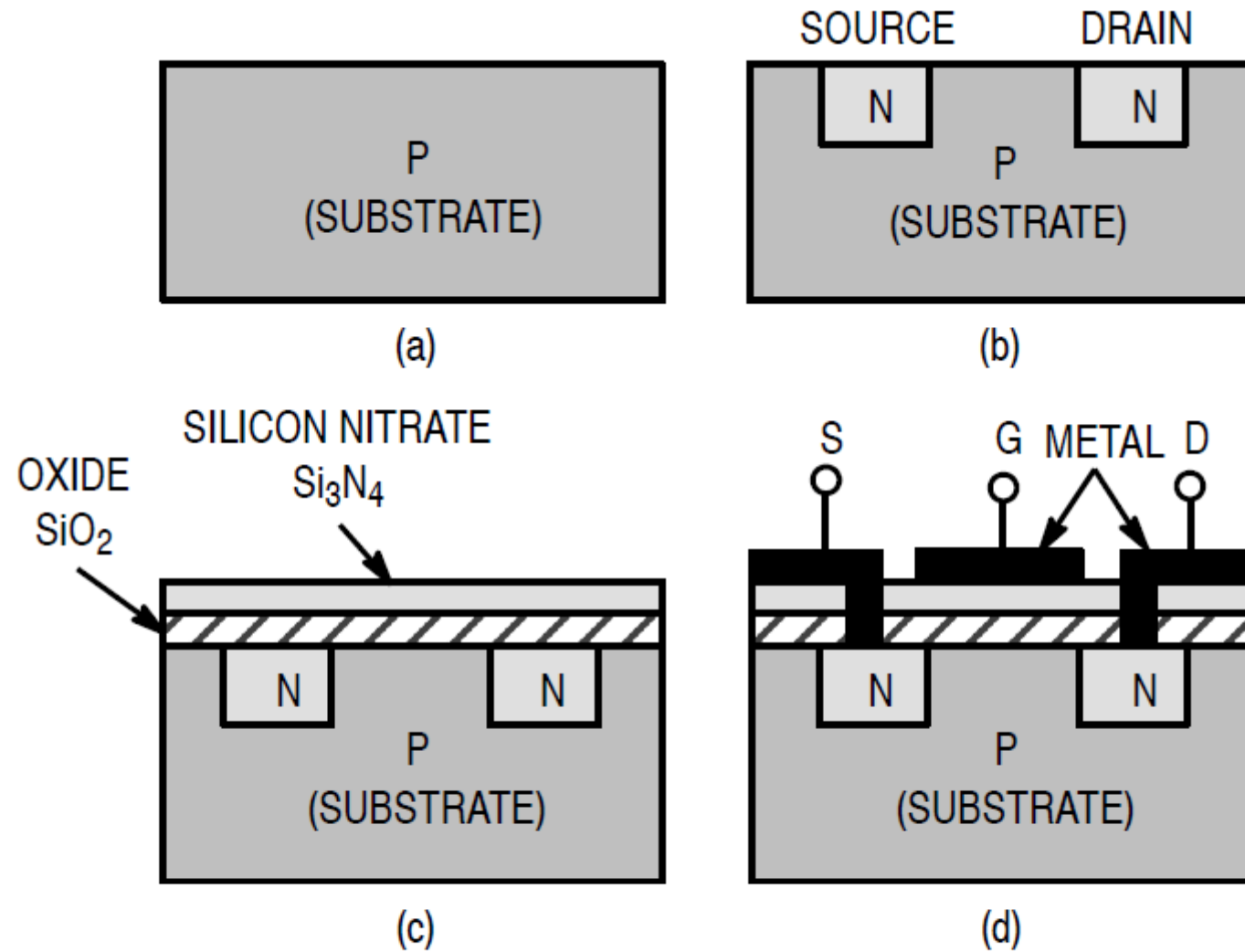
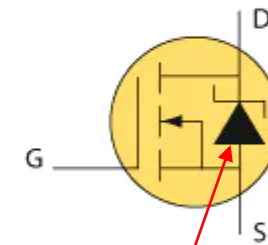
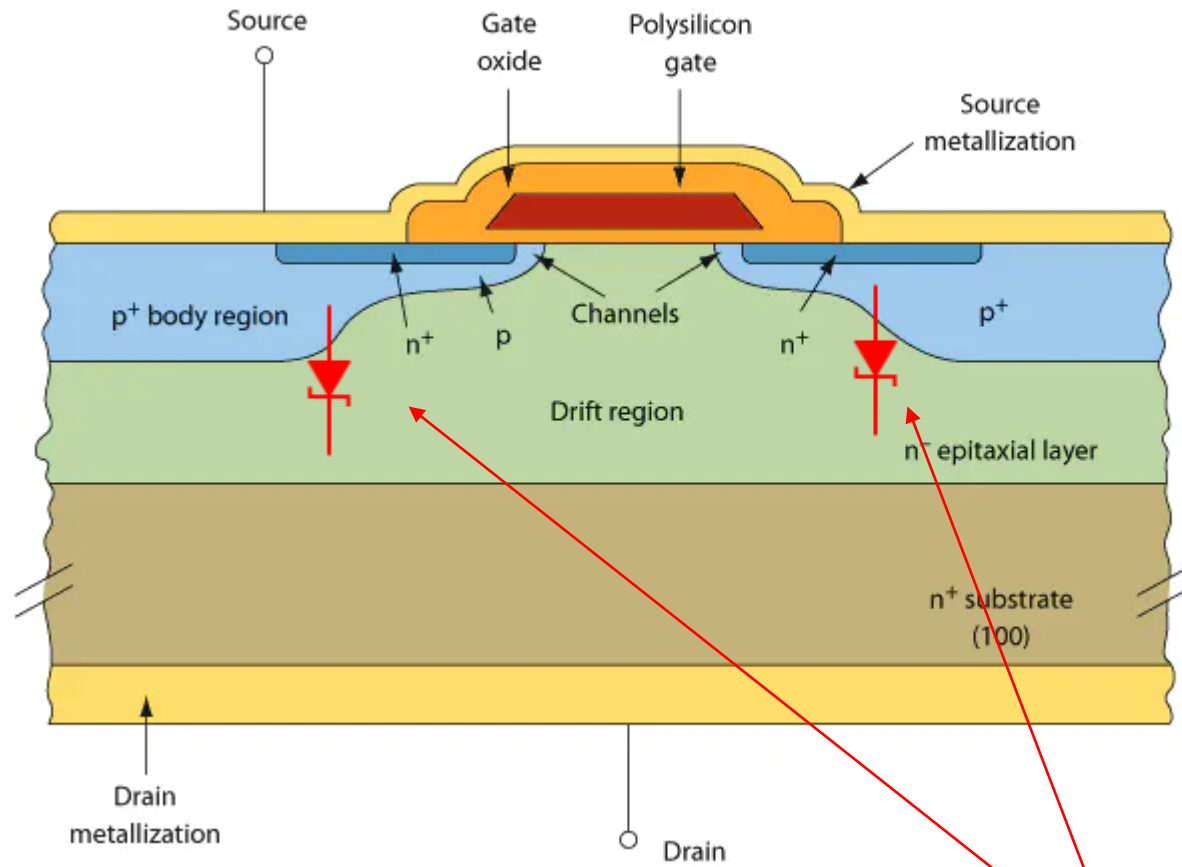


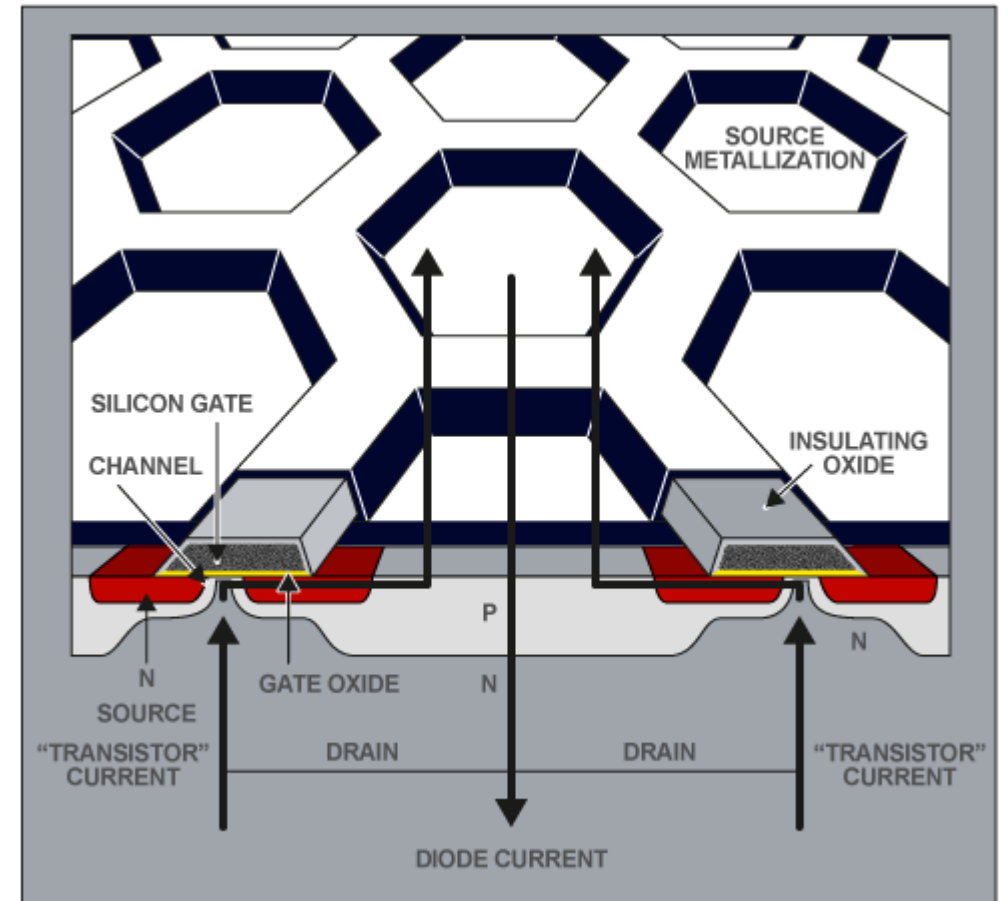
Figure 4. Development of Enhancement-Mode N-Channel MOSFET

MOSFET – Структура на вертикален транзистор

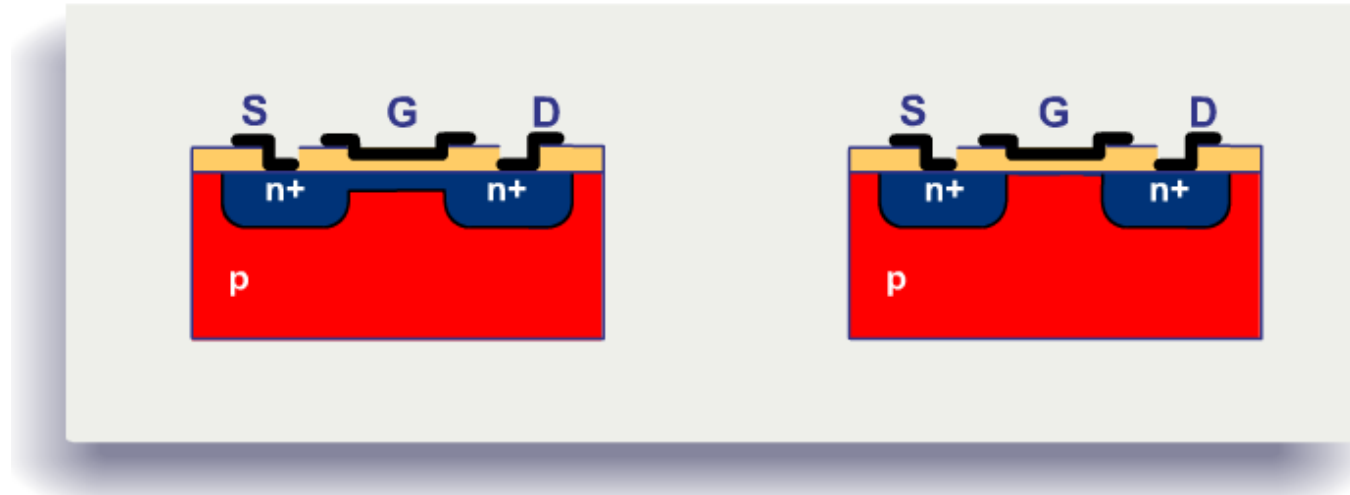


Body Diodes

Cross-section of a typical planar power MOSFET. Transistor current consists of electrons injected into the N-region (majority carriers). Diode current consists of holes injected into the N-region. As such, diode current is a minority carrier current and the holes have to recombine or be swept away before the diode recovers its blocking capability (Figure 9)



MOSFET – Вграден и индуциран канал



MOSFET с вграден канал
Depletion MOSFET

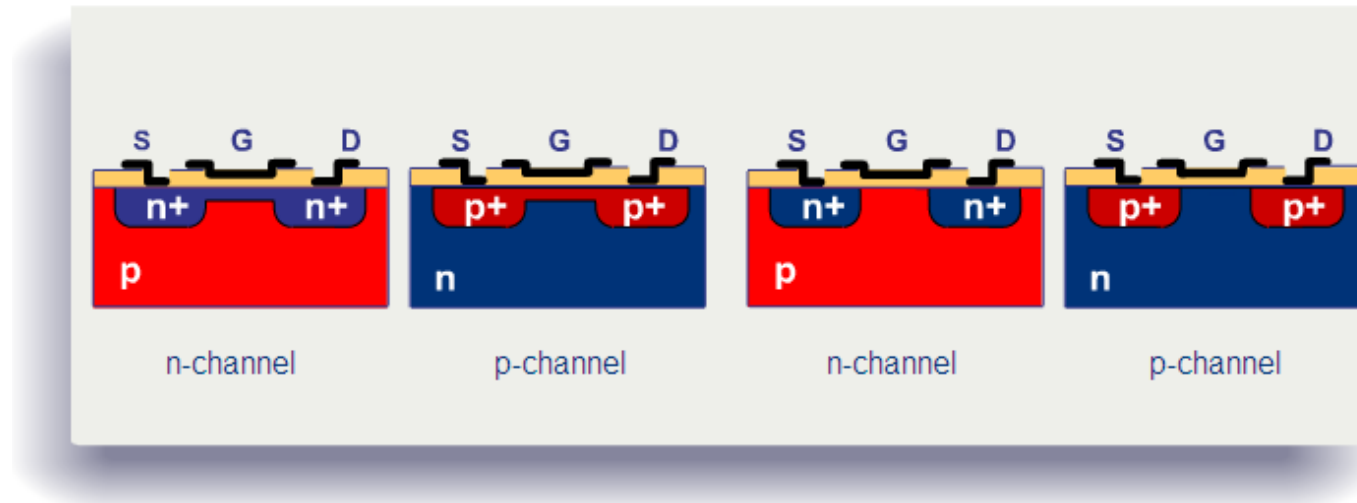
MOSFET с индуциран канал
Enhancement MOSFET

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

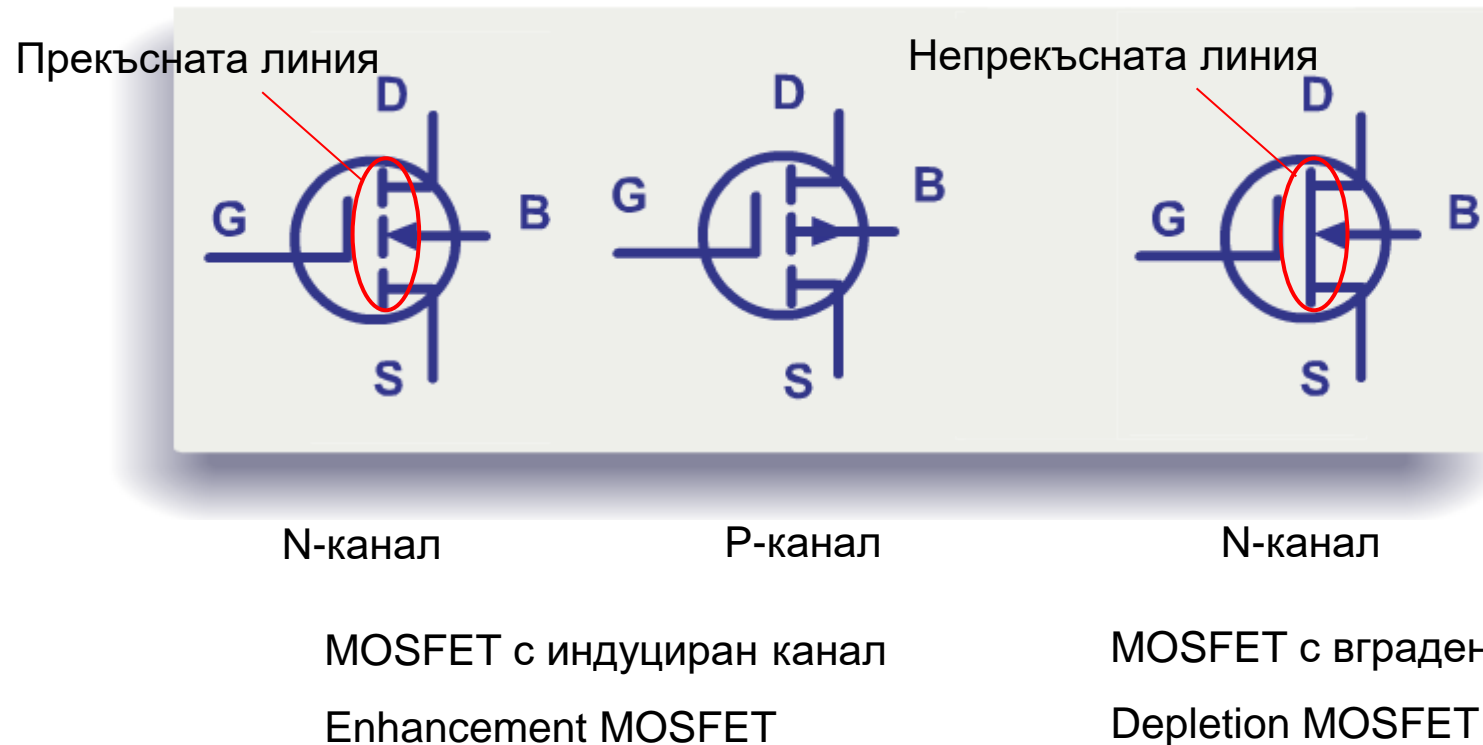
MOSFET с индуциран канал

Enhancement MOSFET

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

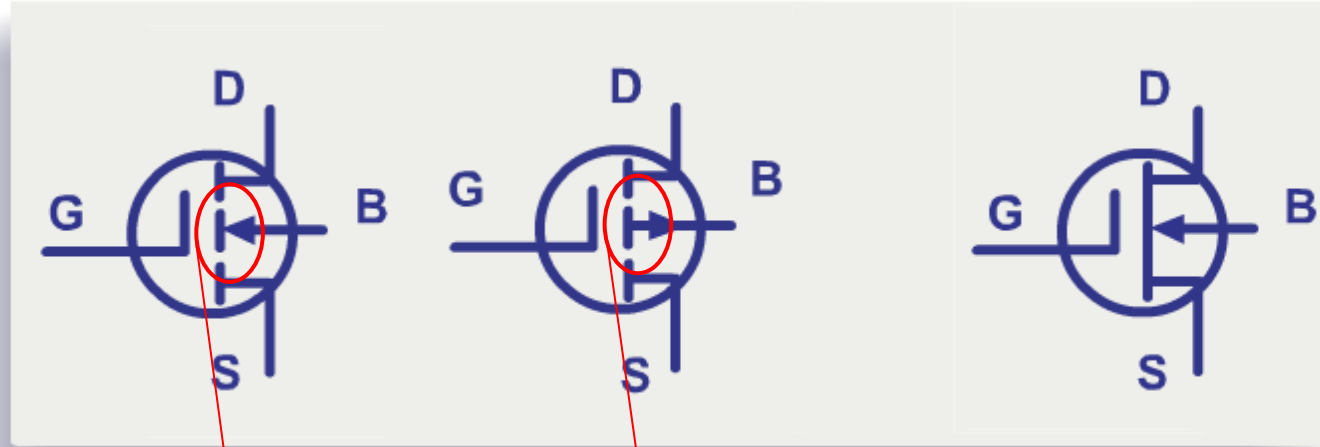
MOS транзисторът е **униполярен** елемент. Действието му се определя **само** от един тип токоносители (**основни**) – електрони или дупки, но никога от двата едновременно.

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

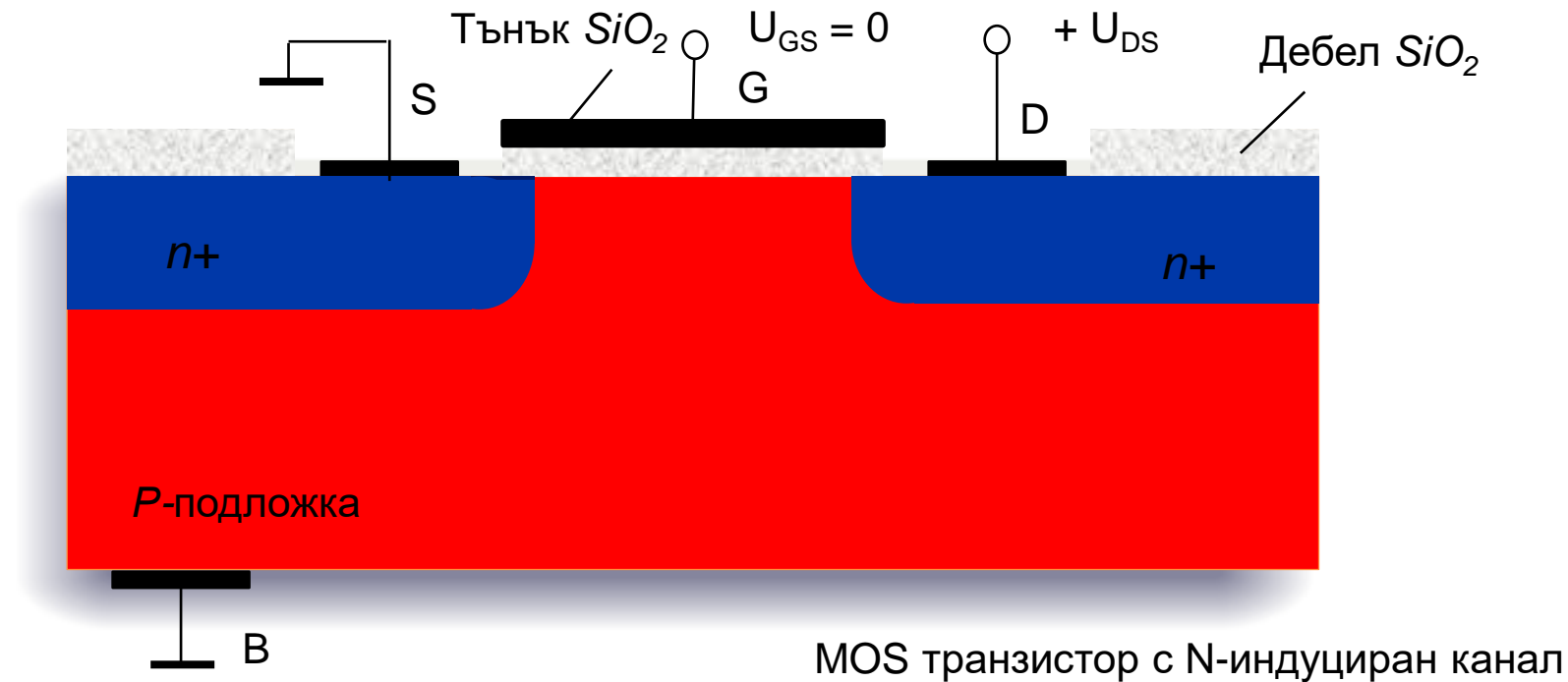


P-канал

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

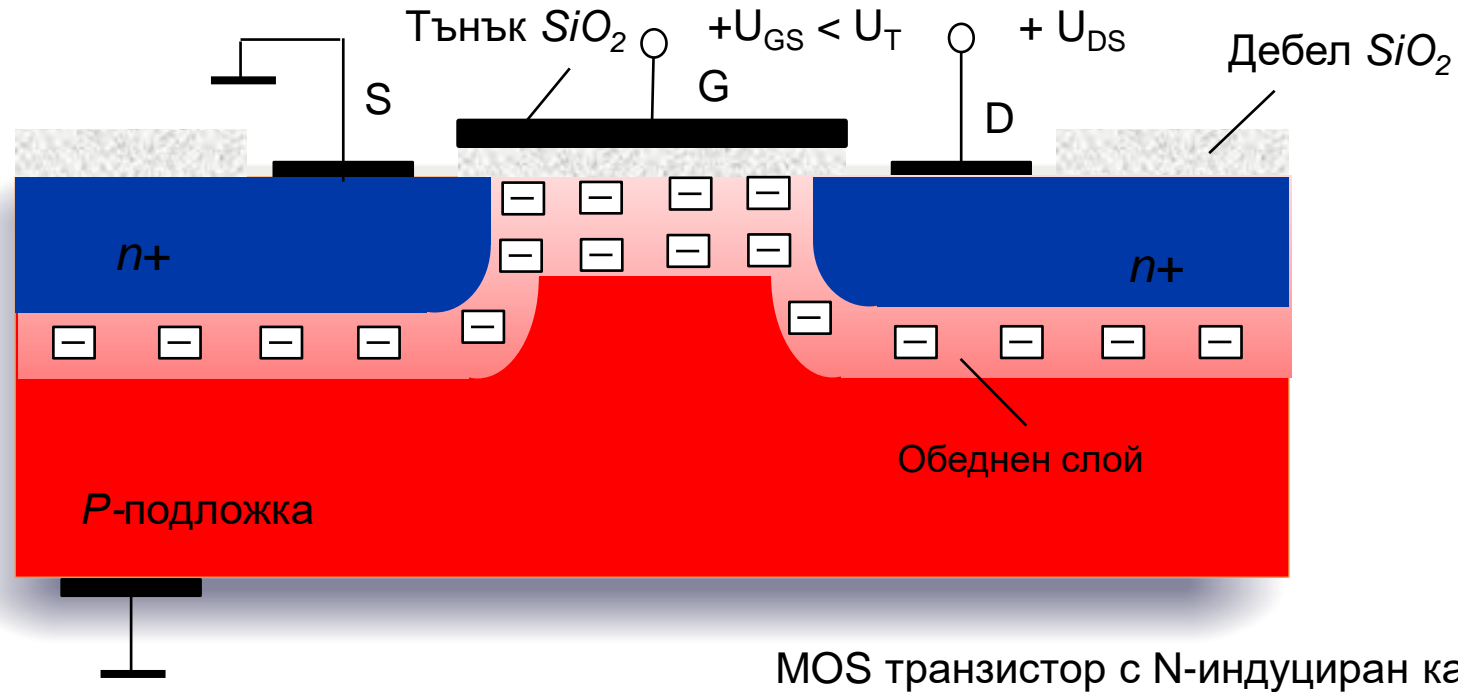


Принипът на действие на MOS транзисторите се основава на **полевия ефект** – възможност за промяна на проводимостта на канала между сорса и дрейна чрез напрежение, приложено между гейт и подложка $U_{GB} = U_{GS}$.

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.

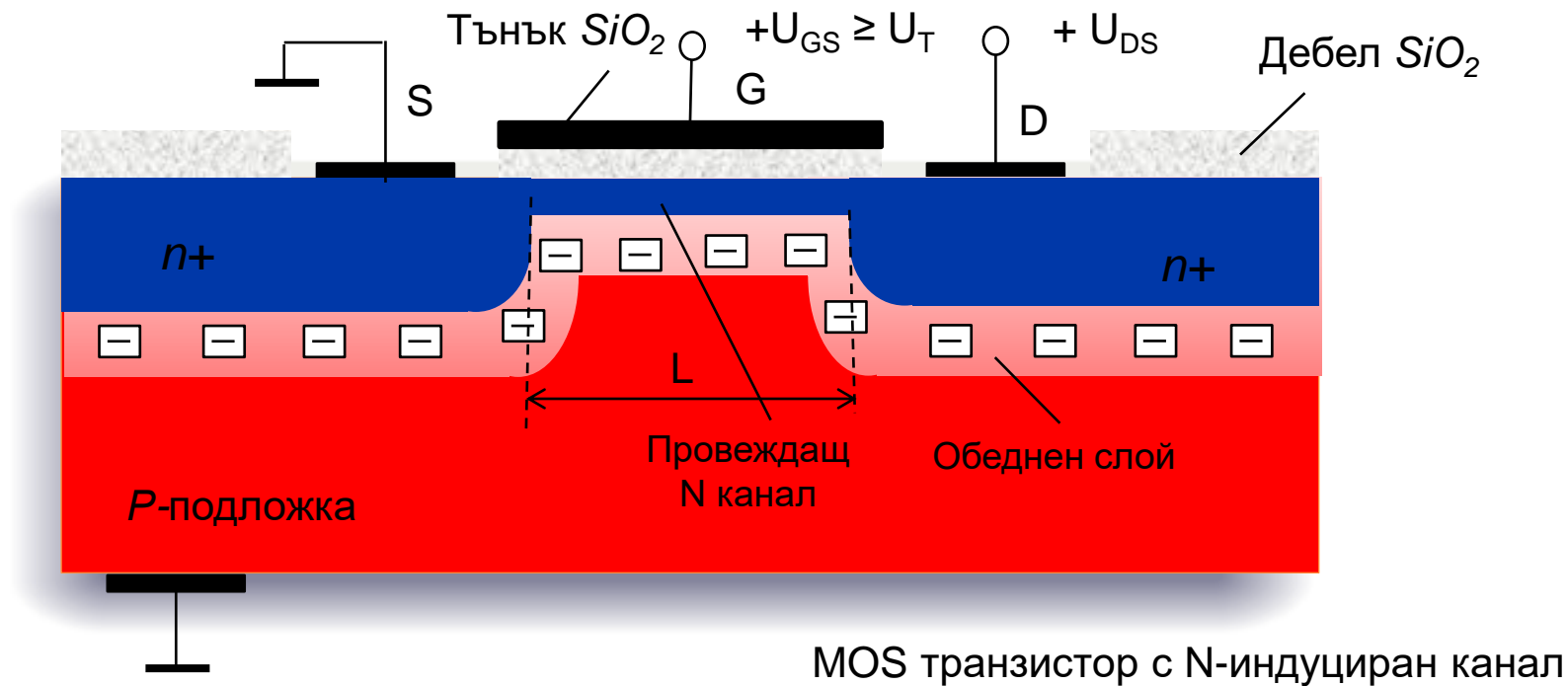
<https://www.youtube.com/watch?v=stM8dgcY1CA>

MOSFET – принцип на действие – обеднен слой



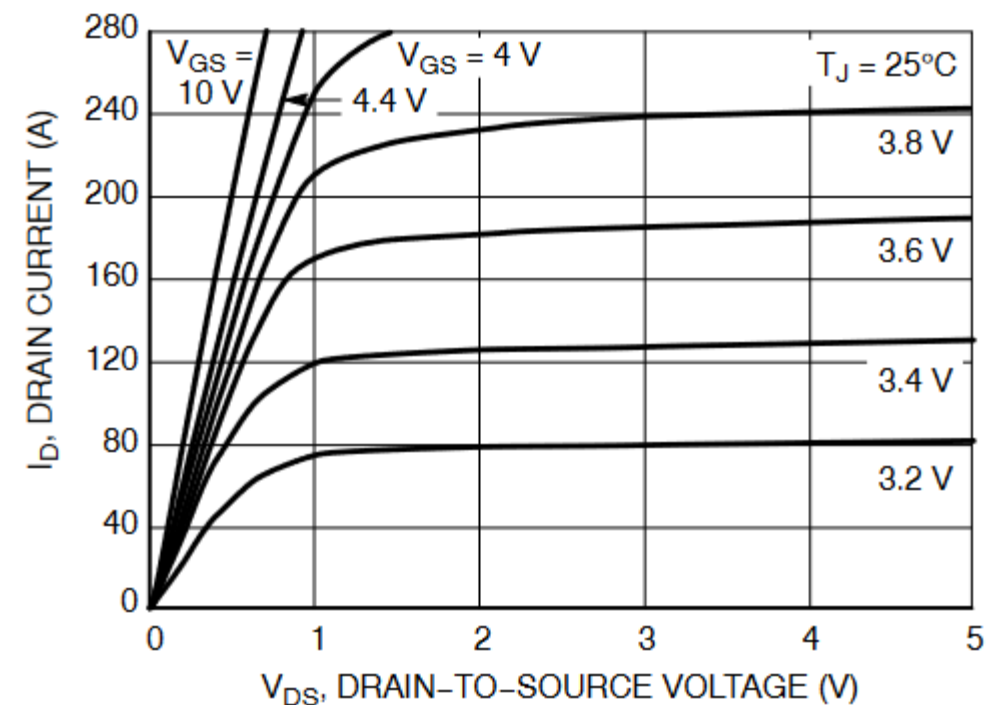
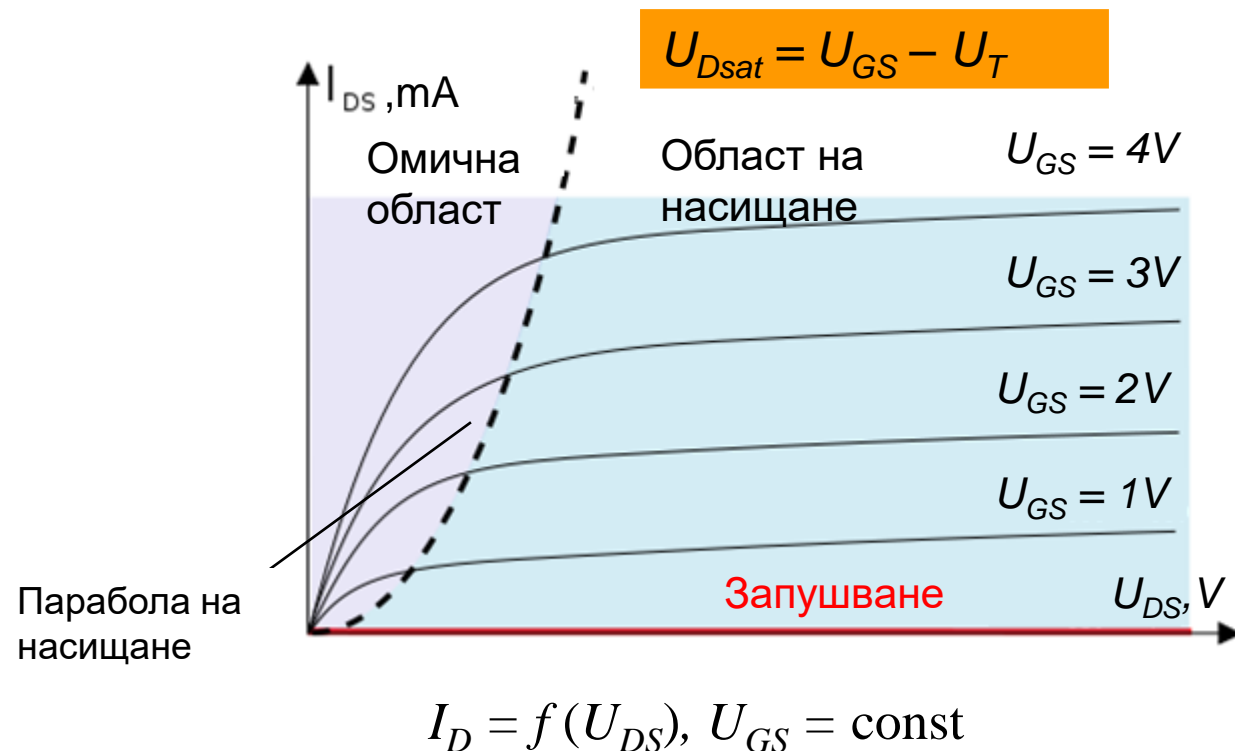
При подаване на положително напрежение на гейта ($U_{GS} > 0$) дупките от подложката се отблъскват във вътрешността ѝ. На повърхността се образува **обеднен слой**, който съдържа предимно некомпенсираните заряди на отрицателните акцепторни йони. Ток не тече.

MOSFET – принцип на действие – прагово напрежение



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

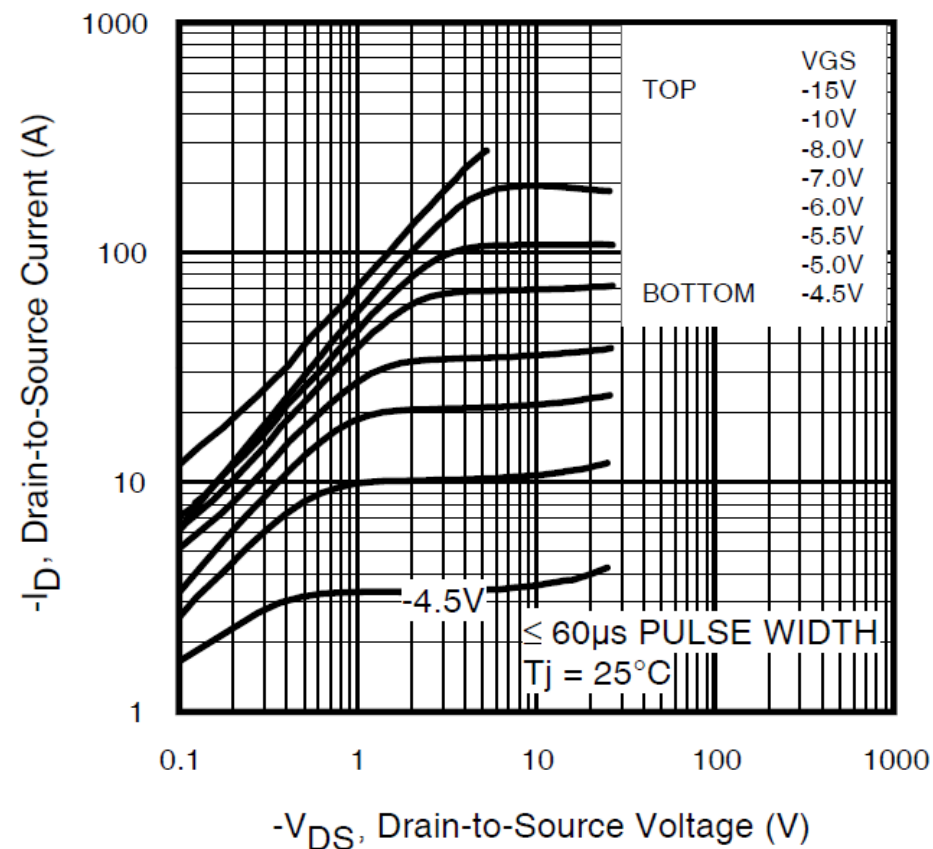
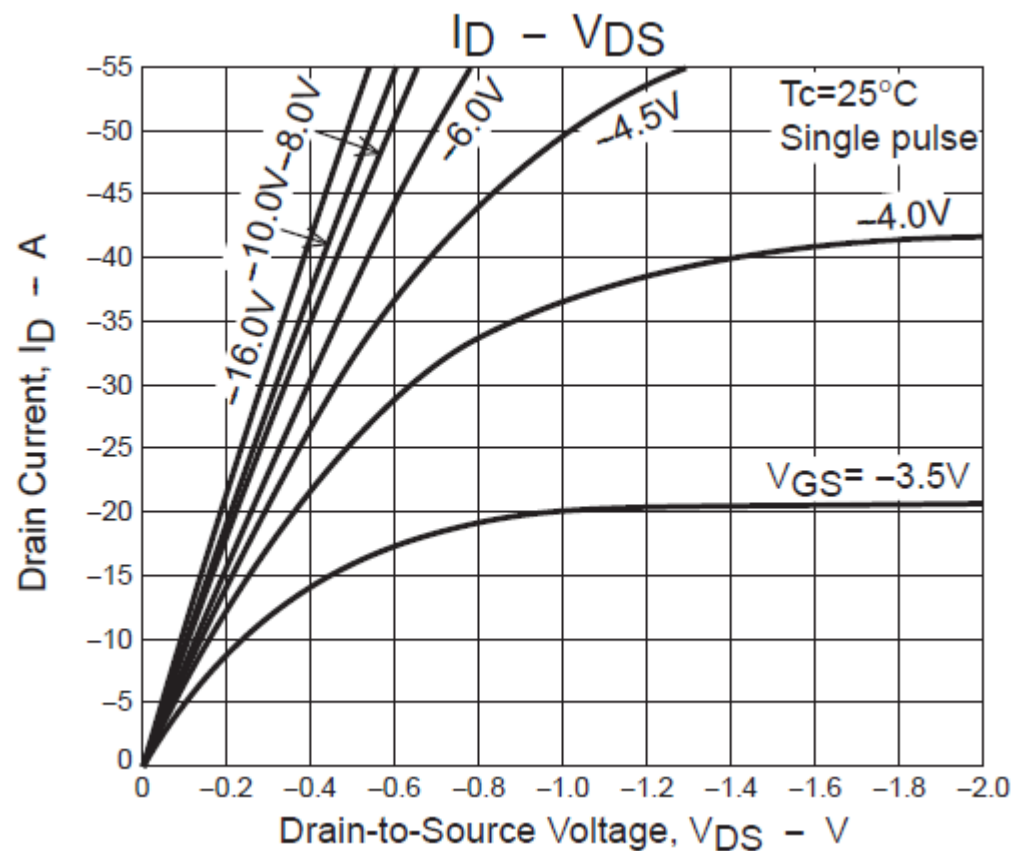
Напрежението U_{GS} , при което се създава инверсен слой в подложката и протича минимален дрейнов ток се нарича **прагово напрежение** U_T . Ако $U_{GS} > U_T$ каналът **се обогатява** с токоносители и токът I_D нараства.



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.

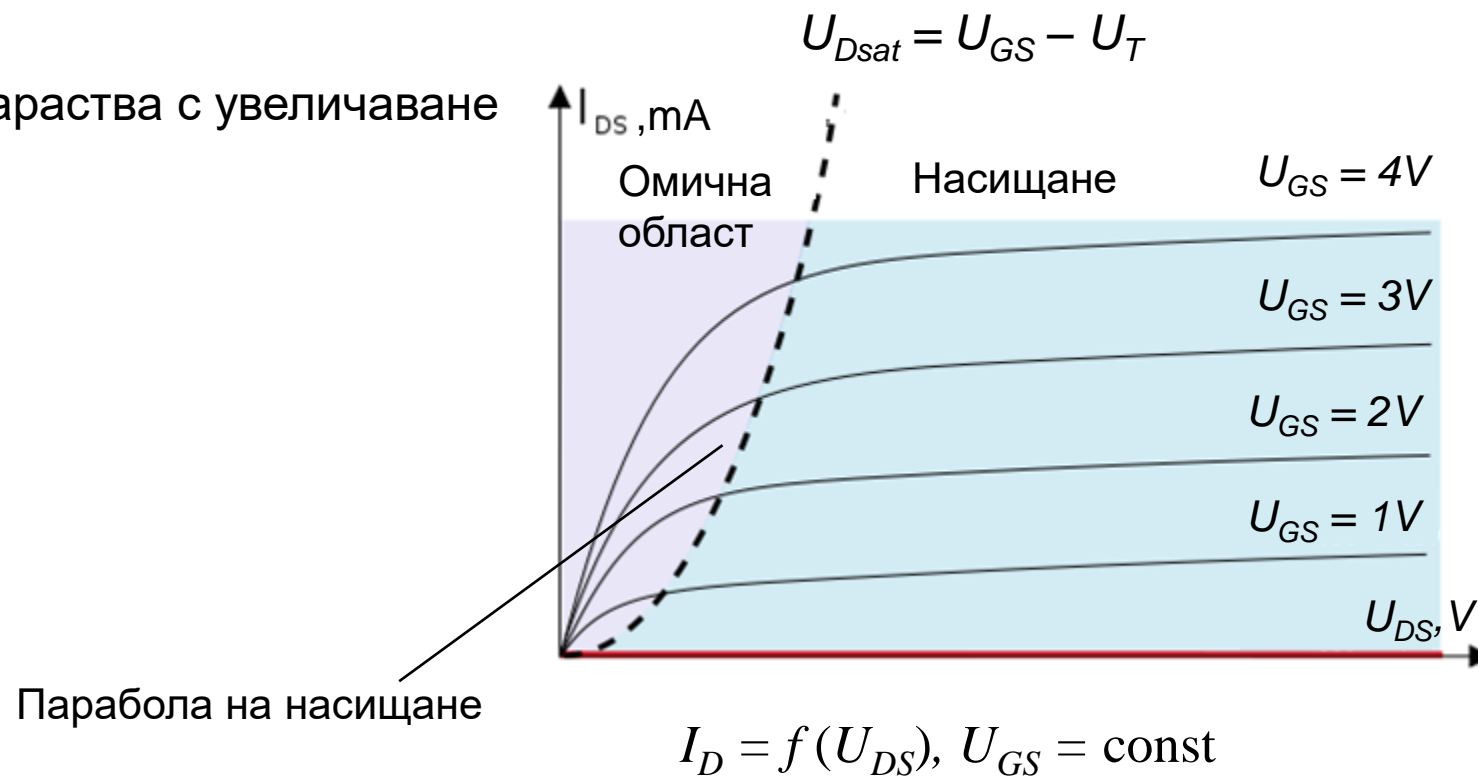
В тях се различават две области – омична и област на насищане.



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.

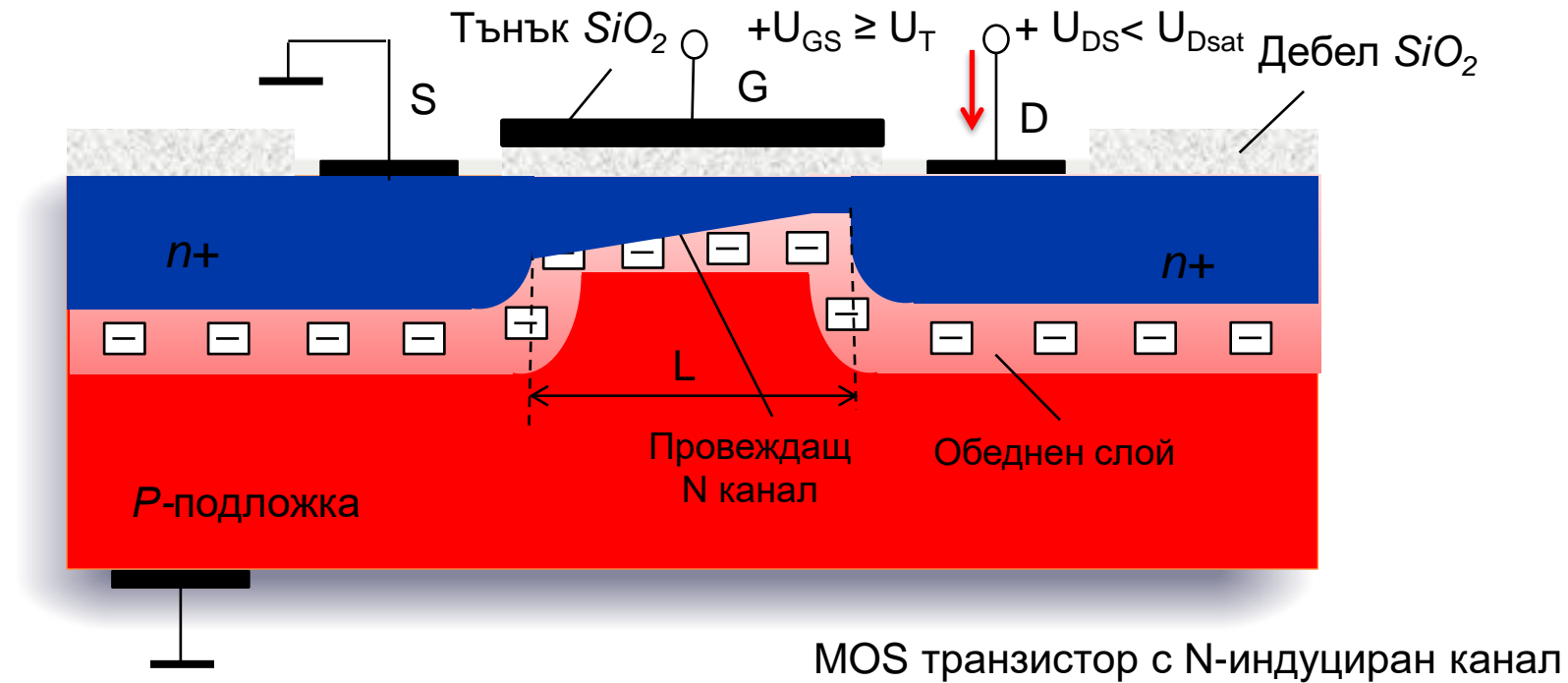
NMOS – Изходна характеристика – омична област

В омичната област, токът нараства с увеличаване напрежението дрейн - сорс



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.

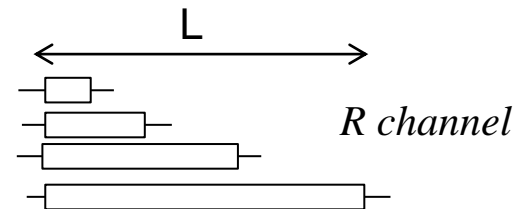
MOSFET – Пад на напрежение в канала



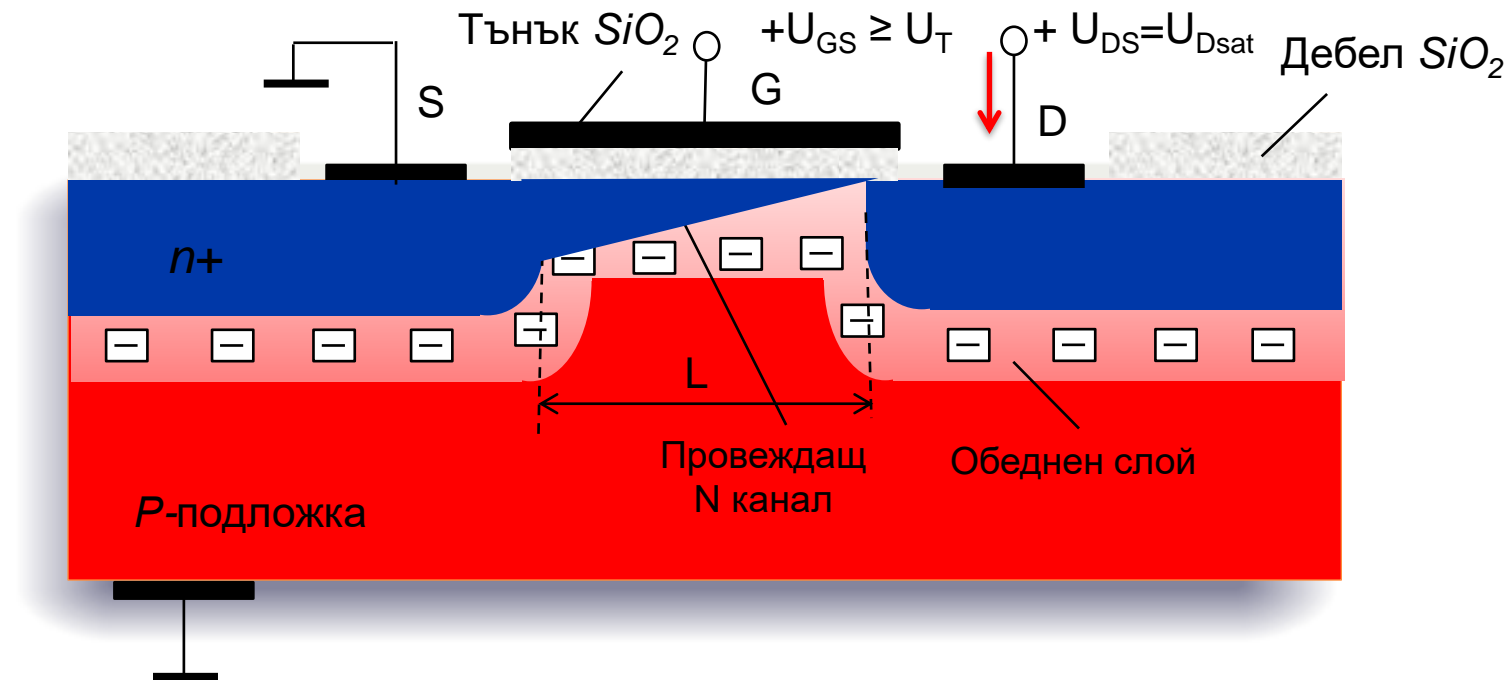
Омичното съпротивление на канала нараства с увеличаване на дължината на канала от S към D, като нараства и падът върху него.

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

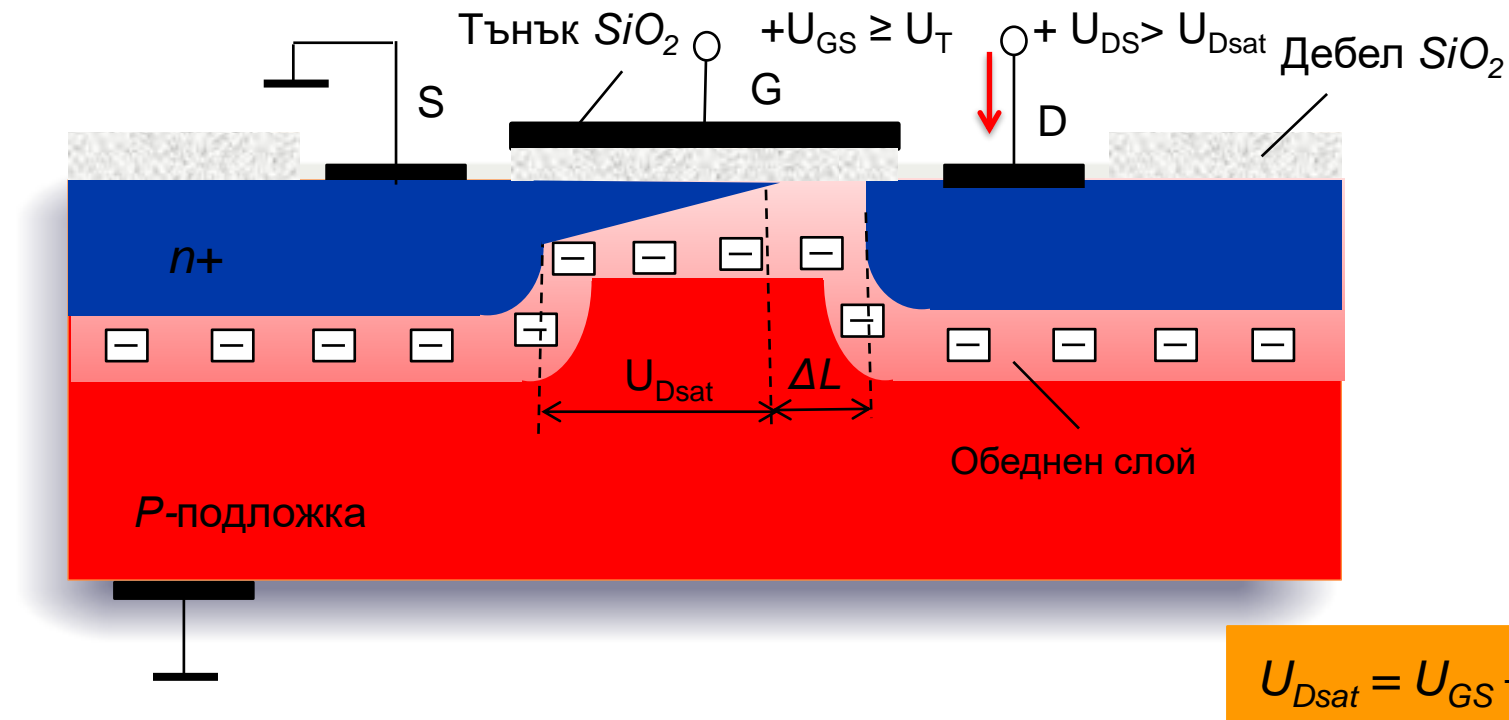


$$U_{Dsat} = U_{GS} - U_T$$

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**

MOSFET – Област на насищане



Ако $U_{DS} > U_{DSsat}$ каналът се скъсява, като напрежението върху него остава постоянно и равно на U_{DSsat} , което определя постоянния ток I_{DSat} .

Разликата $\Delta U_D = U_{DS} - U_{DSsat}$ 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.

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

Област на насищане $U_{DS} \geq U_{Dsat}$ $I_D = \frac{k}{2}(U_{GS} - U_T)^2$

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

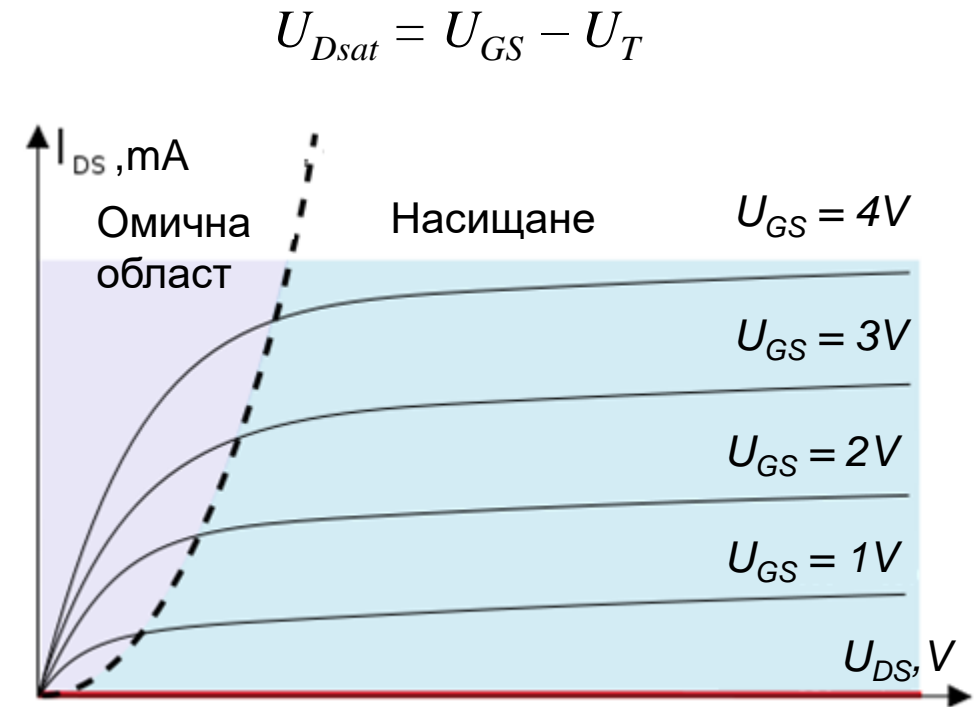
Специфична стръмност

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

Специфичен капацитет на окиса

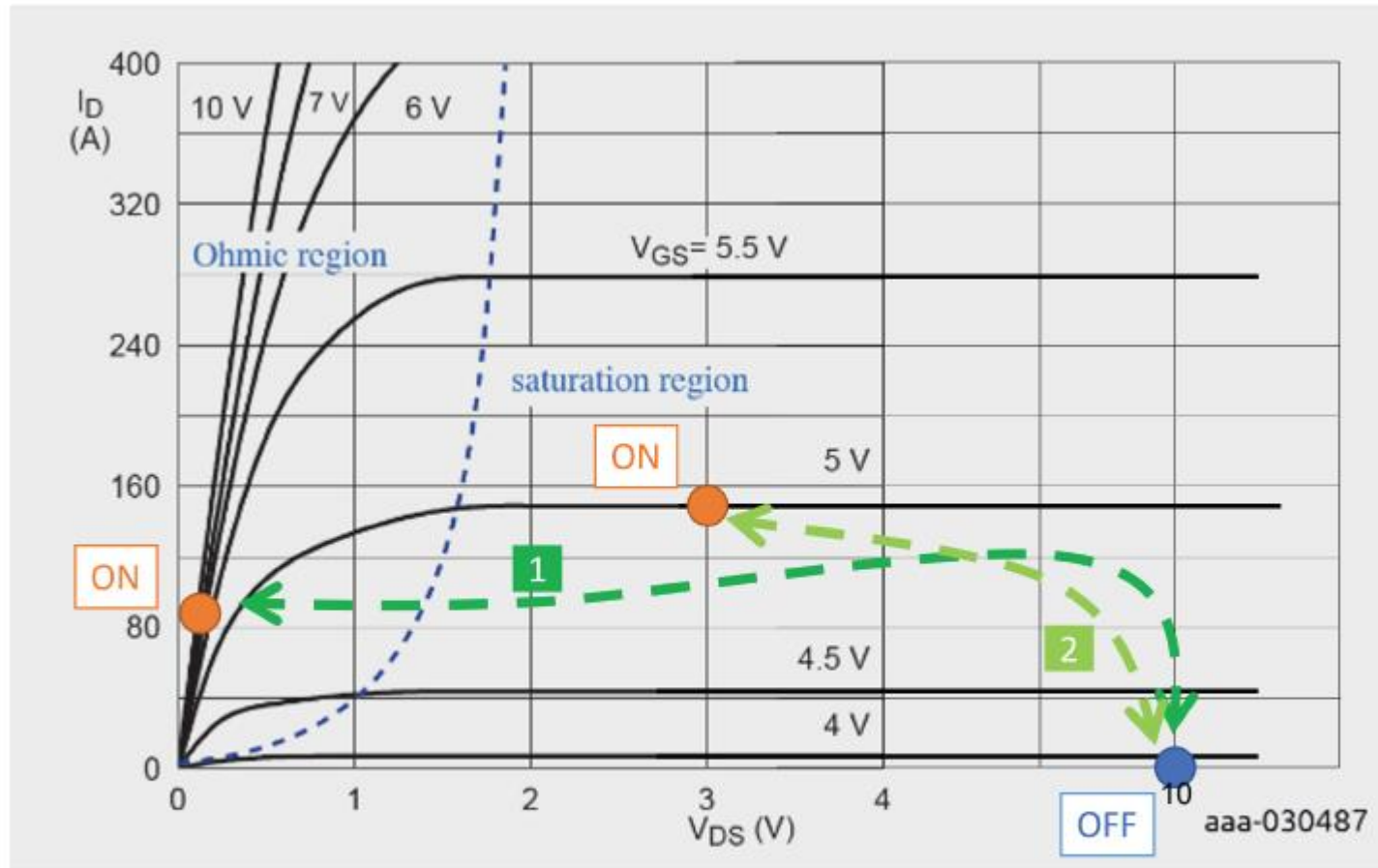
$$\mu_{eff}$$

Ефективна подвижност



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

Linear mode of operation == saturation region !!!



$$V_{GS} > V_{GS(th)}$$

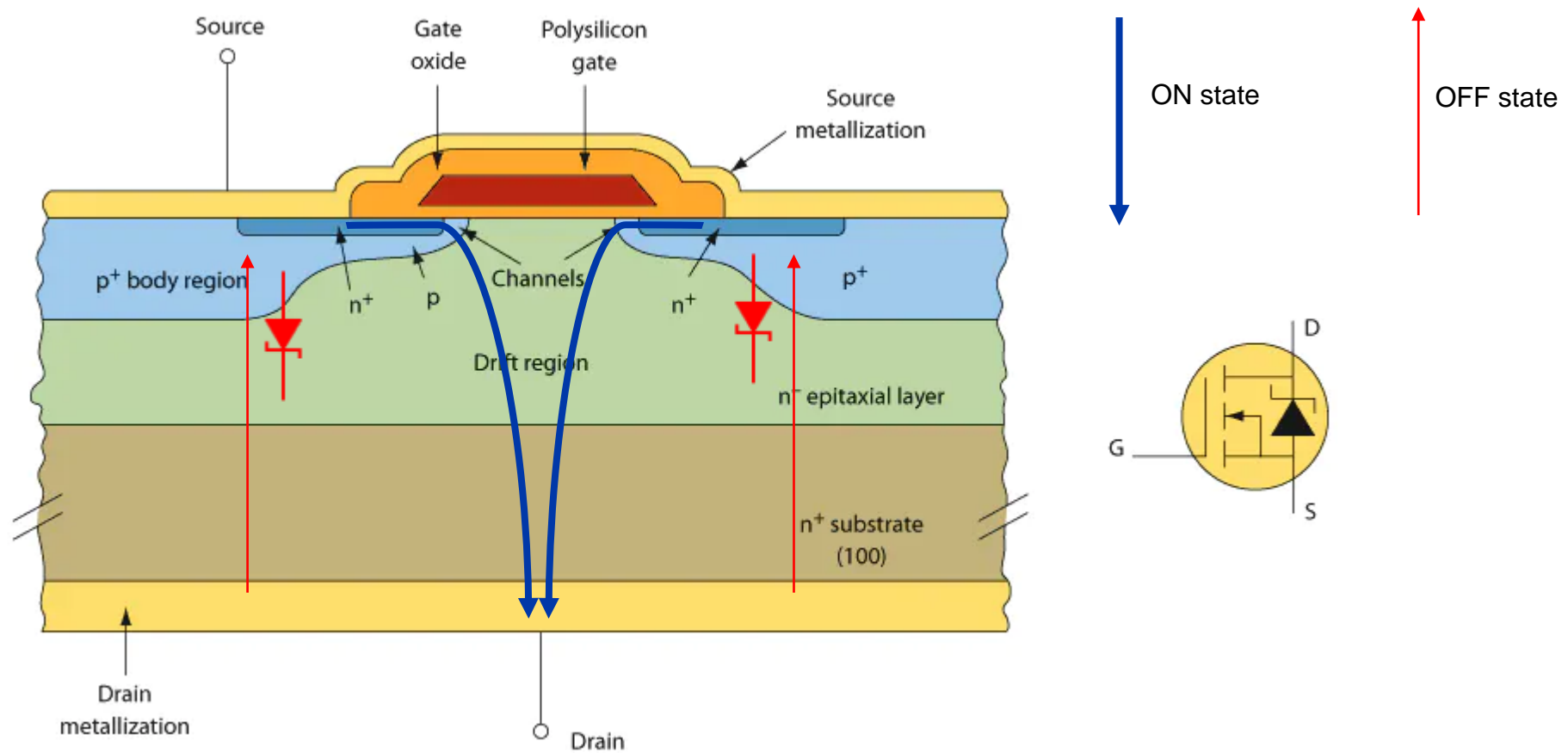
$$V_{DS} > V_{GS} - V_{GS(th)} = V_{OD}$$

$$I_D = k \cdot (V_{GS} - V_{GS(th)})^2$$

[1] R_{DSon} operation ON/OFF trajectory; [2] linear mode operation ON/OFF trajectory

Example of MOSFET output characteristic: ON/OFF trajectories

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 в коя област се намира работната точка. Изчислява се $U_{Dsat} = U_{GS} - U_T$

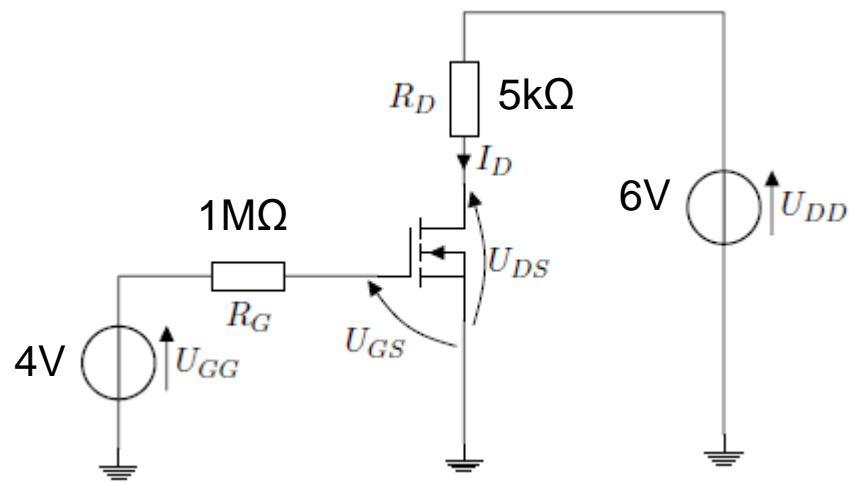
а) Ако $U_{DS} < U_{Dsat}$ - омична област

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

б) Ако $U_{DS} \geq U_{Dsat}$ - област на насищане

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

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 работната точка на транзисторът е в областта на насищане:

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

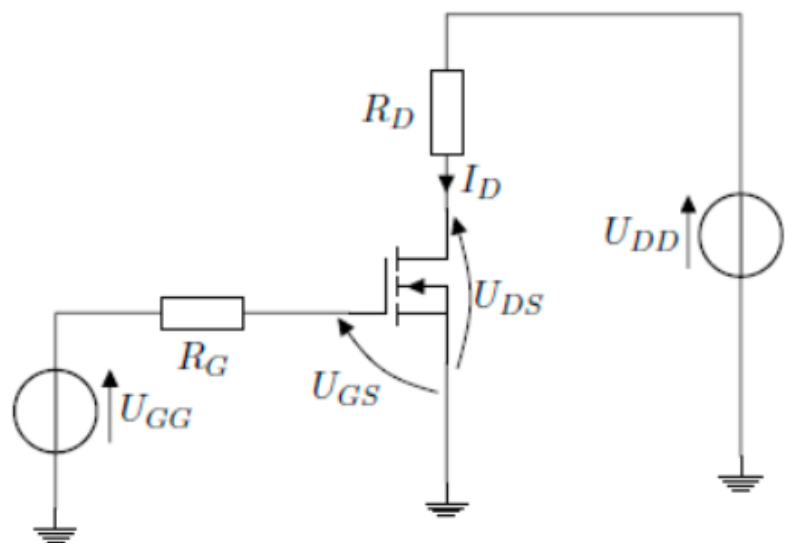
Проверка на режима

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

$$U_{DS} = U_{DD} - I_D \cdot R_D = 6 - 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^3 = 3,5\text{V} \quad U_{DS} > U_{Dsat} \quad \text{Транзисторът наистина е в областта на насищане}$$

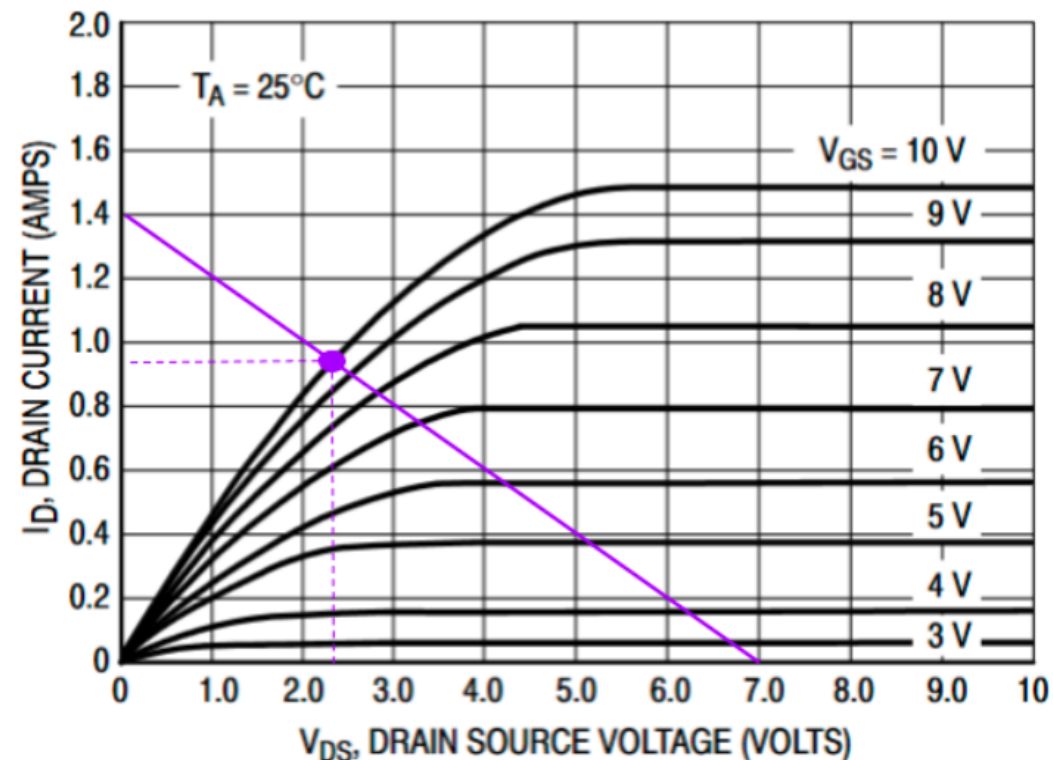
Отговор: $I_D = 0,5\text{mA}$, $U_{DS} = 3,5\text{V}$

Примери за графично определяне на областта на работа 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: $I_D = ?$, $U_{DS} = ?$



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 $U_{GS} = 10\text{V}$.

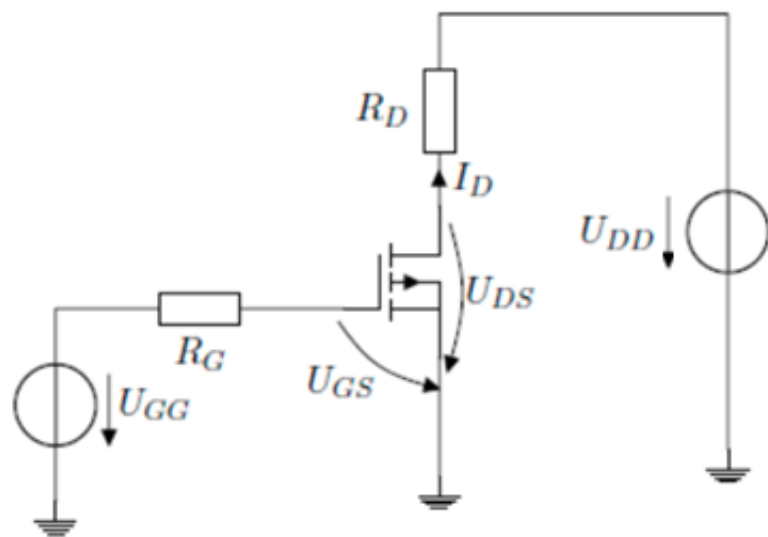
I_D [A]	0.95
U_{DS} [V]	2.4
Област на работа	Омична

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

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

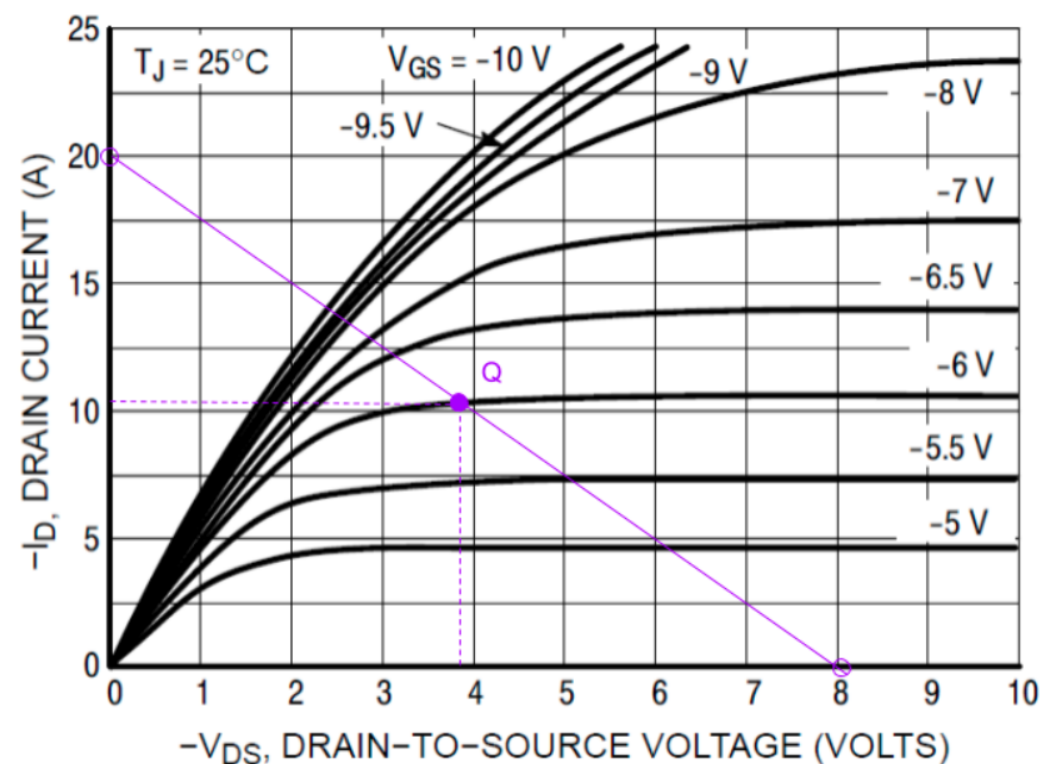
$U_{DS} < U_{Dsat}$ Транзисторът работи в линеен режим

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: $I_D = ?$, $U_{DS} = ?$



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

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

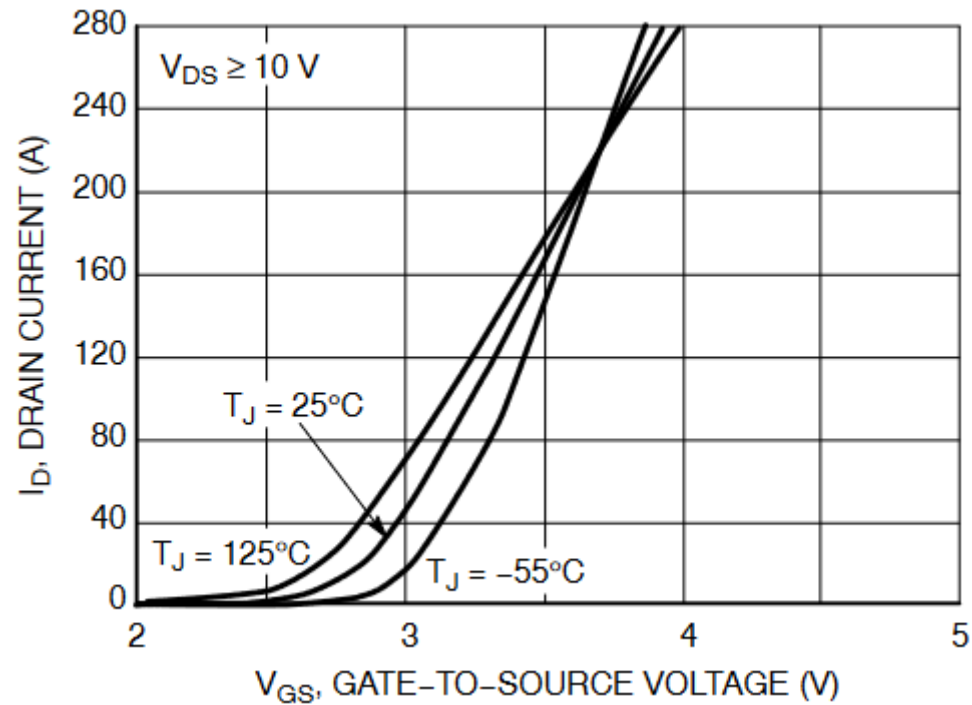
От характеристиката: $U_{DS} = -3.8V$

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

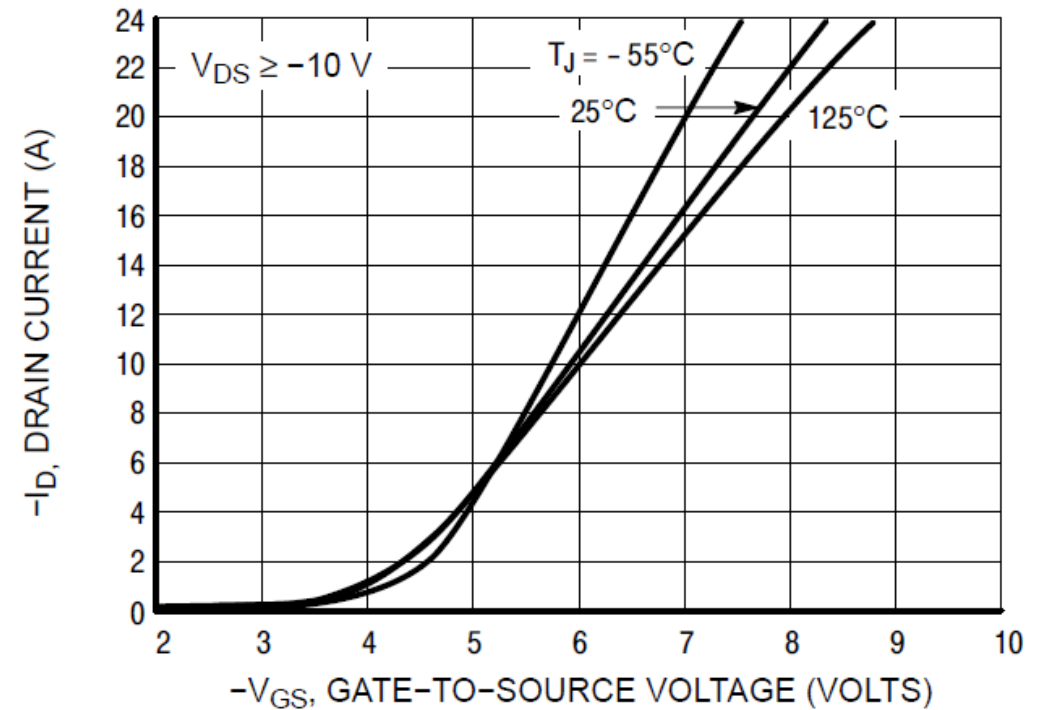
$|U_{DS}| > |U_{Dsat}|$ работната точка на транзисторът е в областта на насищане

Предавателни Характеристики (Transfer Characteristics)

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

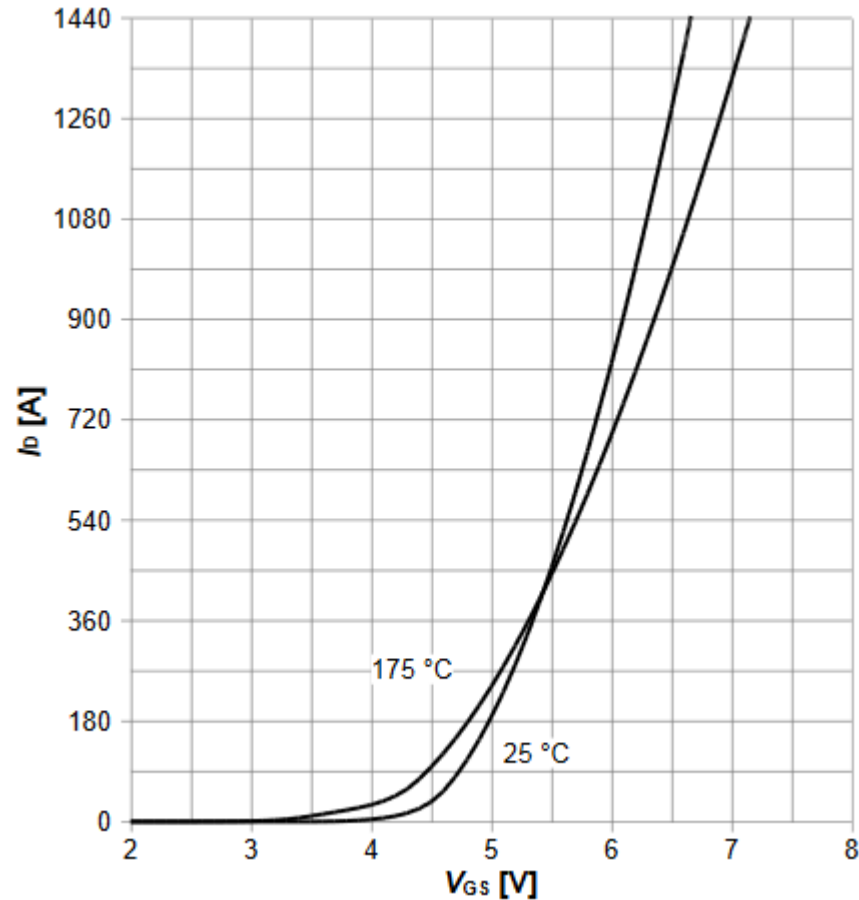


NMOS, индуциран канал



PMOS, индуциран канал

Предавателни Характеристики – Температурна Зависимост



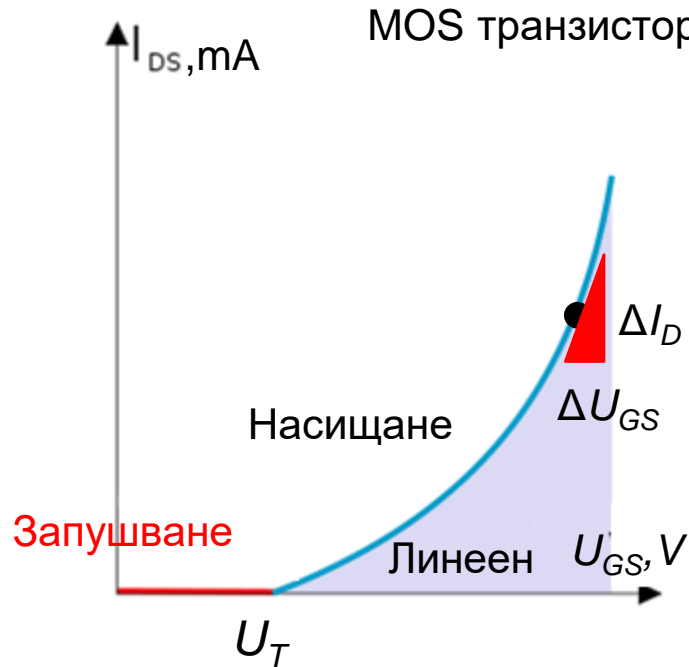
MOS транзистор с N индуциран канал

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)



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

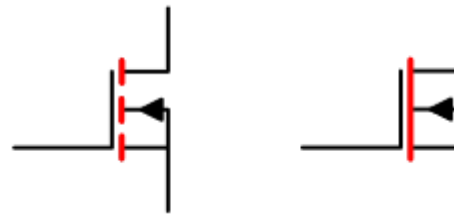
Стръмност на предавателната характеристика g_m , (S)

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

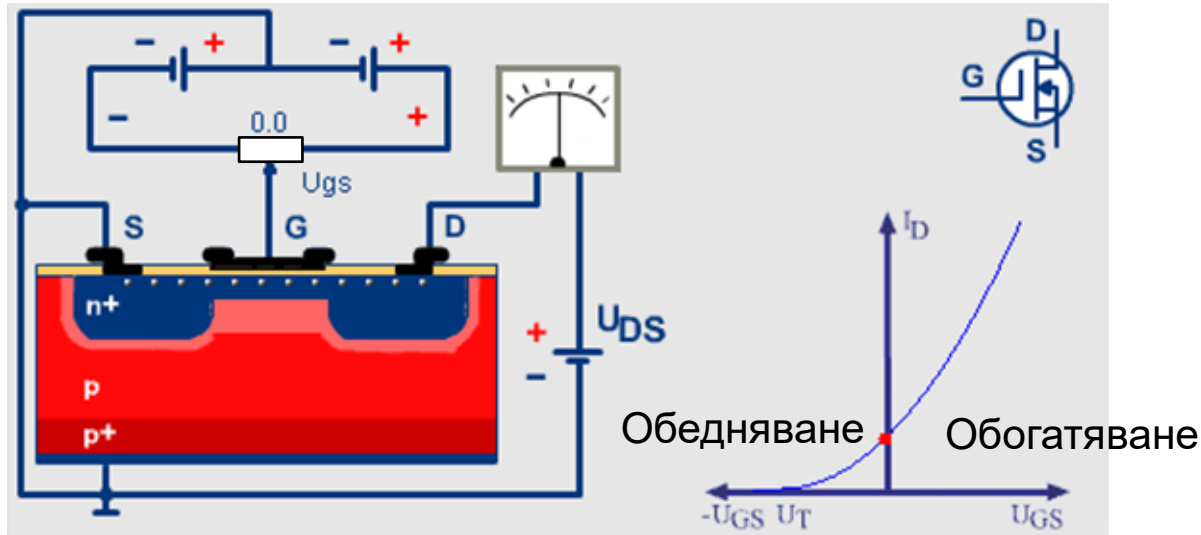
$$g_m = kU_{DS} \quad \text{за линеен режим}$$

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

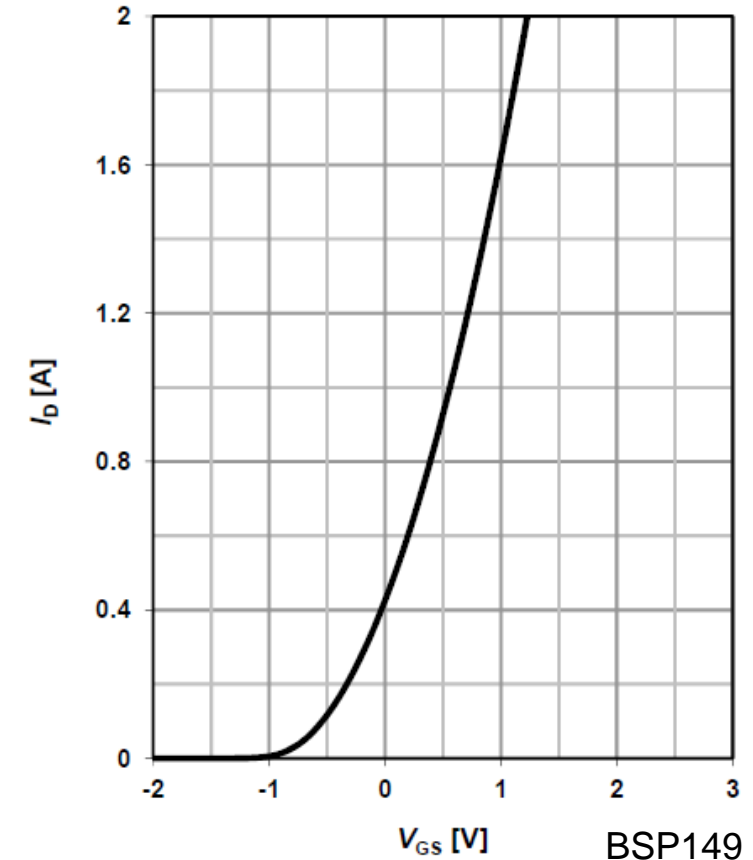
MOSFET с вграден канал Depletion MOSFET



MOSFET с вграден канал (depletion mode)



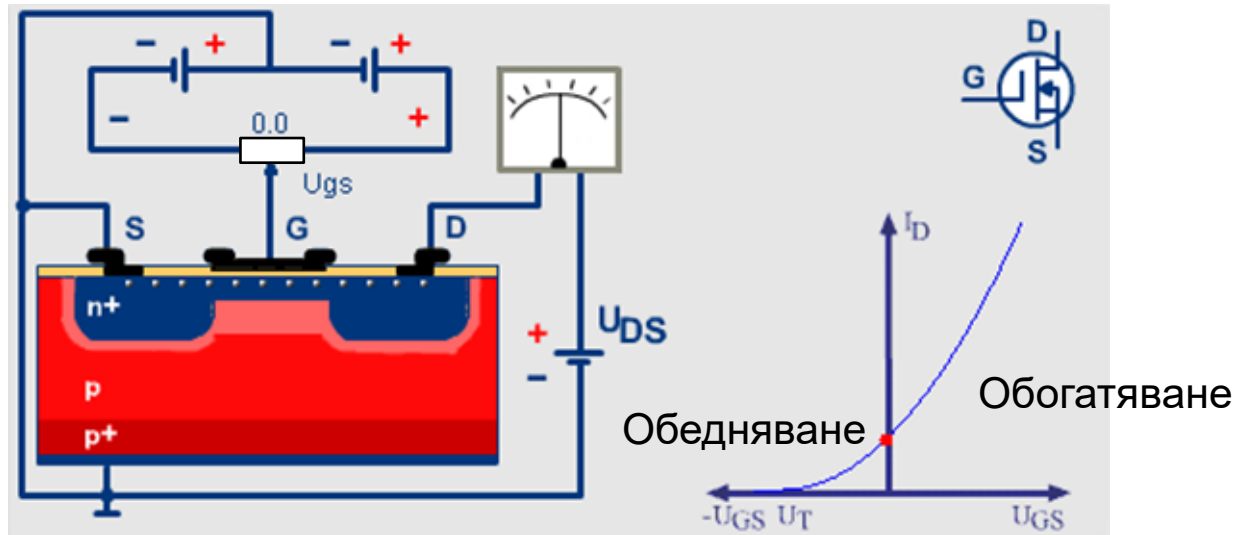
N-канален MOS транзистор с вграден канал
N-channel, depletion mode MOSFET



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

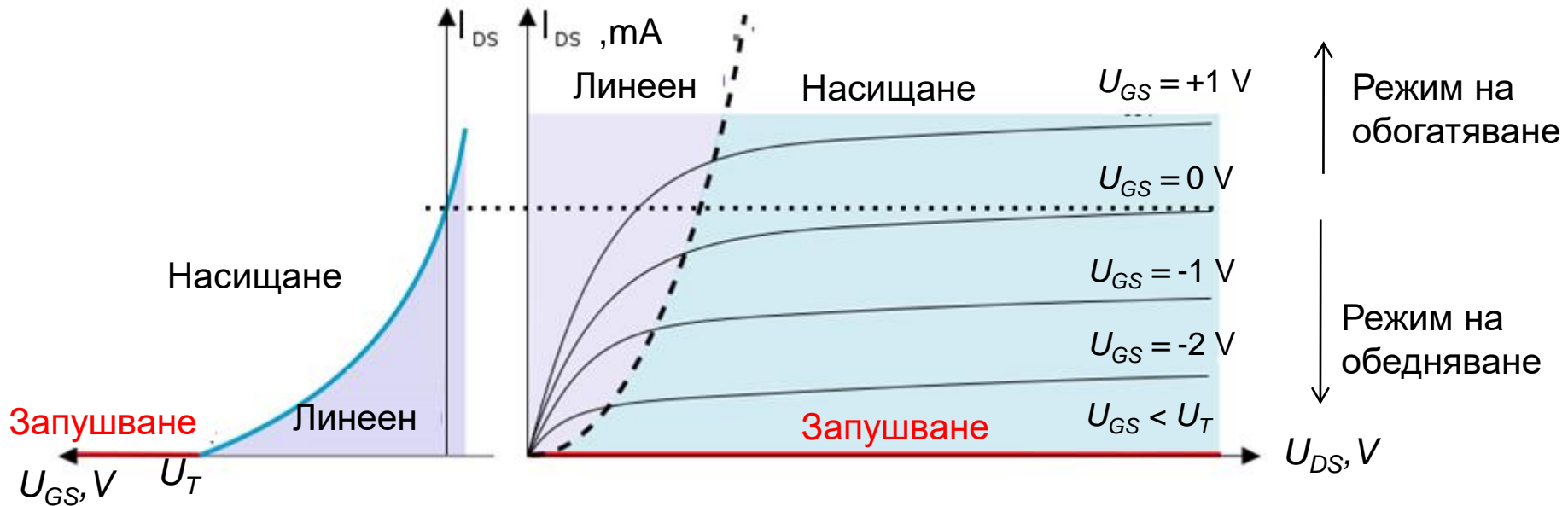


MOS транзистор с N вграден канал

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

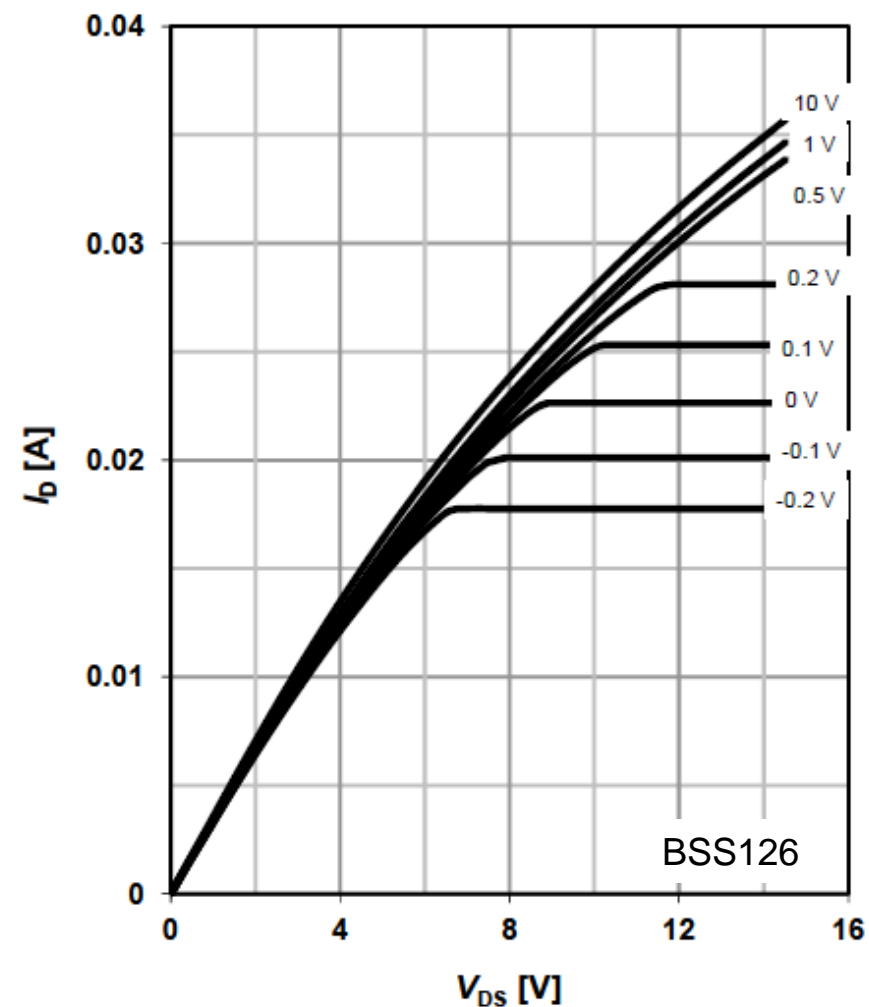
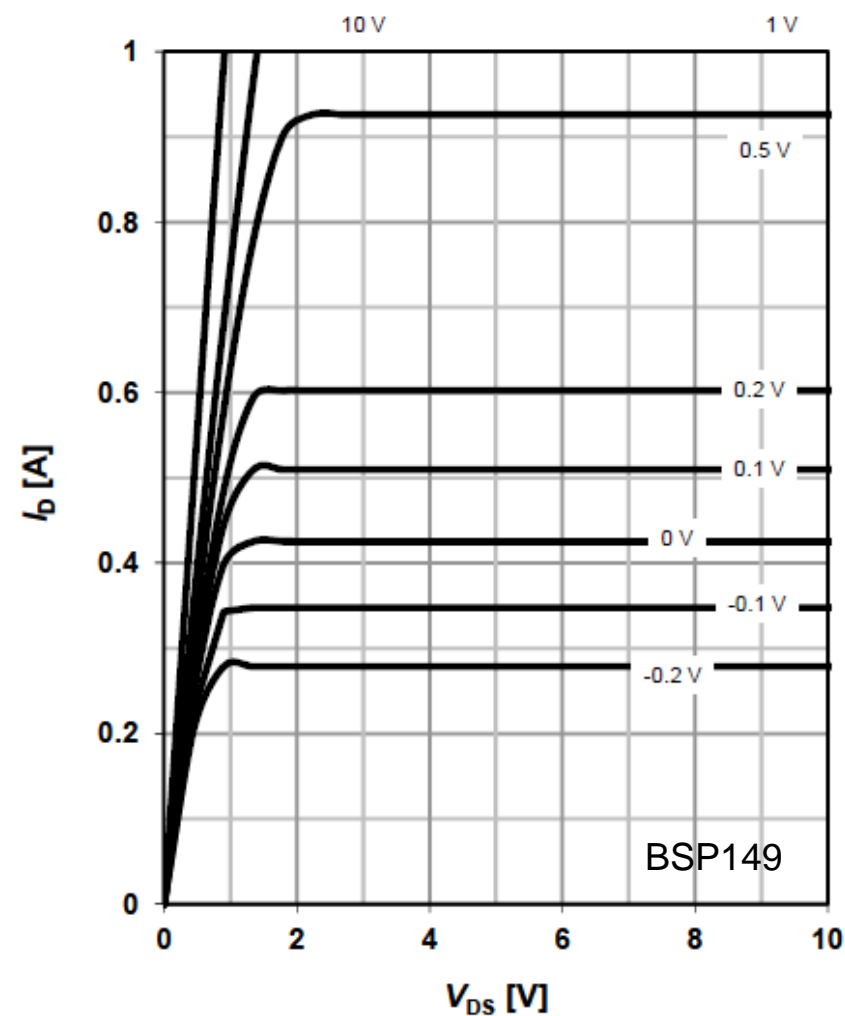
При $U_{GS} = 0\text{ V}$ протича ток.

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

При $U_T < U_{GS} < 0$ I_D намалява.

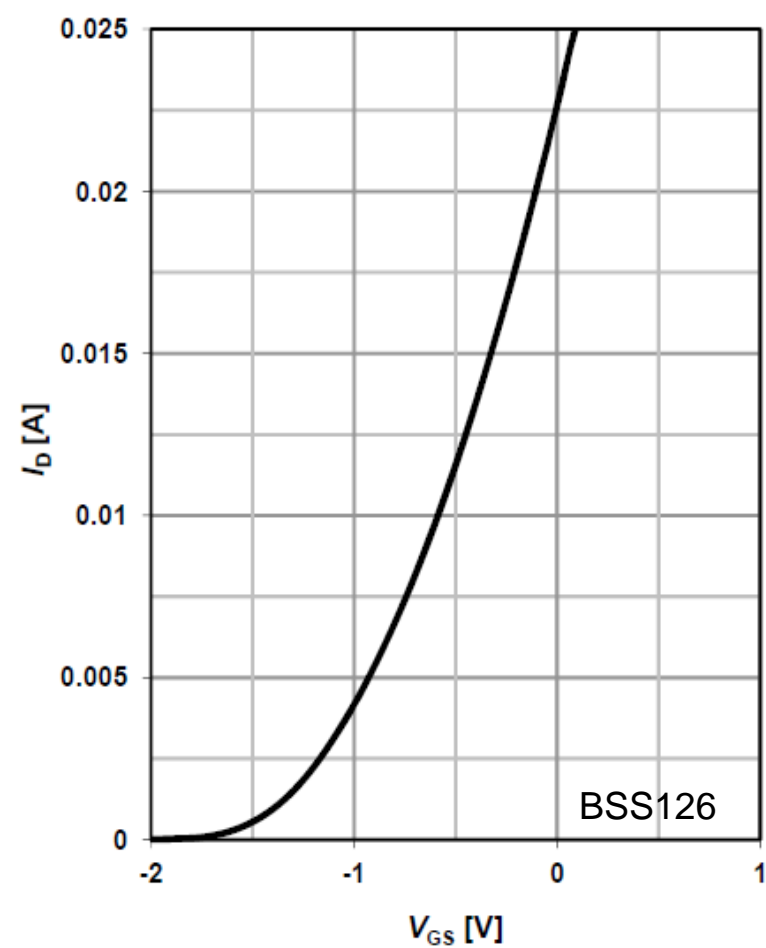
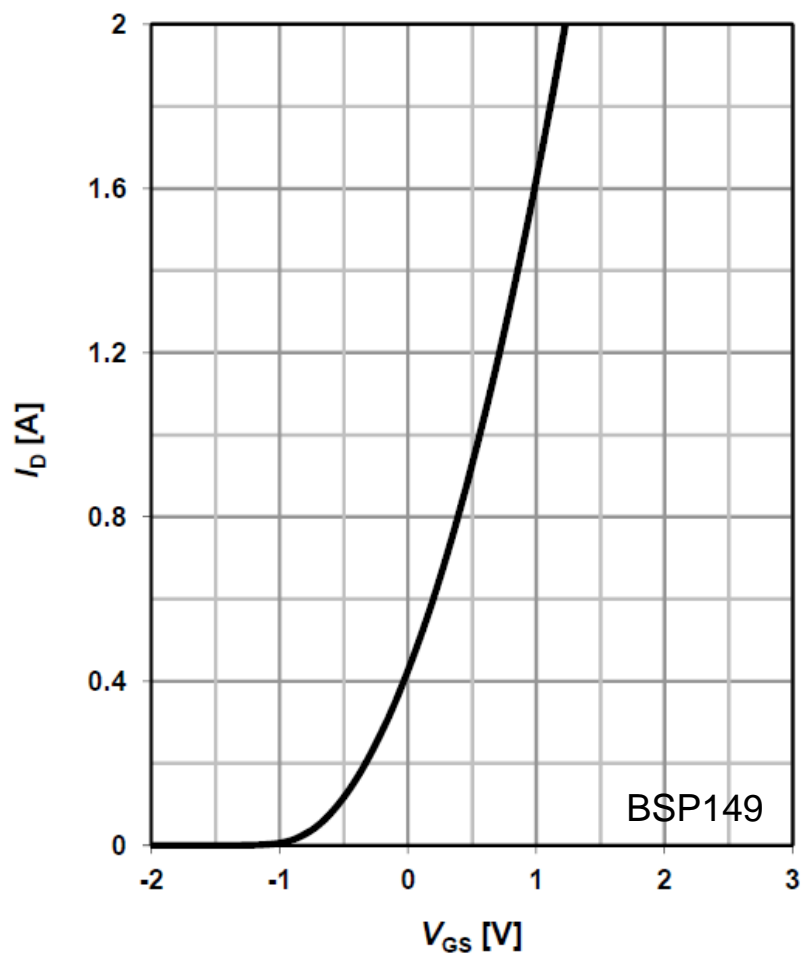
При $U_{GS} < U_T$ каналът не съществува. U_T е праговото напрежение на транзистора.

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

Параметри на MOS Транзисторите

Параметри – key performance parameters

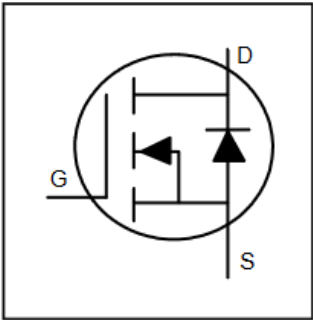
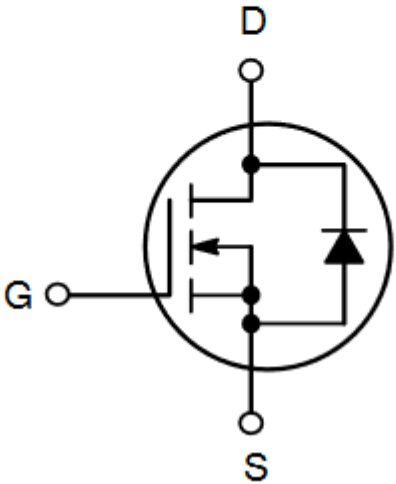
Най-важните параметри според различни производители на MOS транзистори

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 – 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

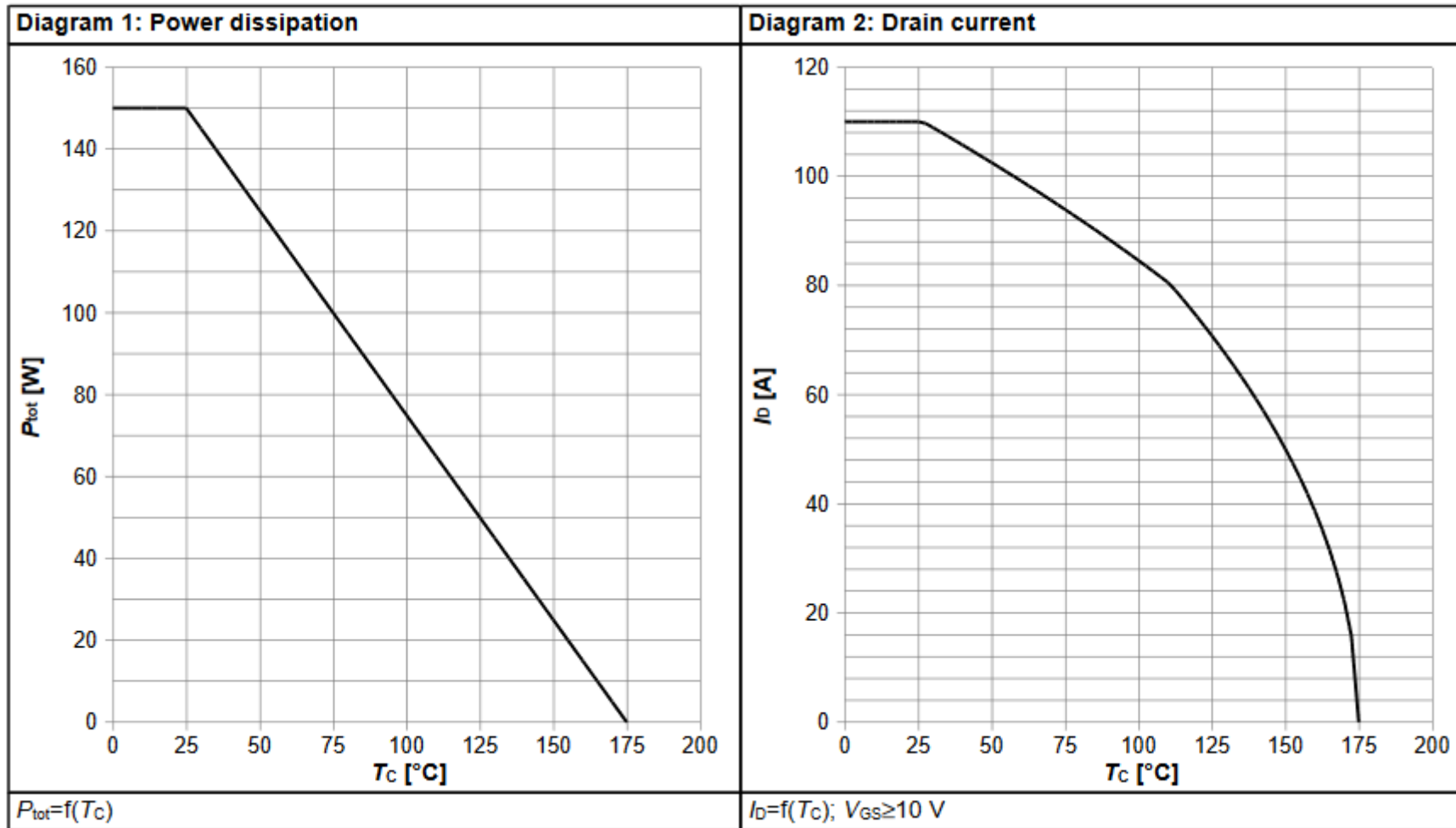
$$P_D = \frac{T_J - T_C}{R_{\theta JC}} \quad P_D = \frac{T_J - T_A}{R_{\theta JA}}$$

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

Температурна зависимост на максимално допустими параметри

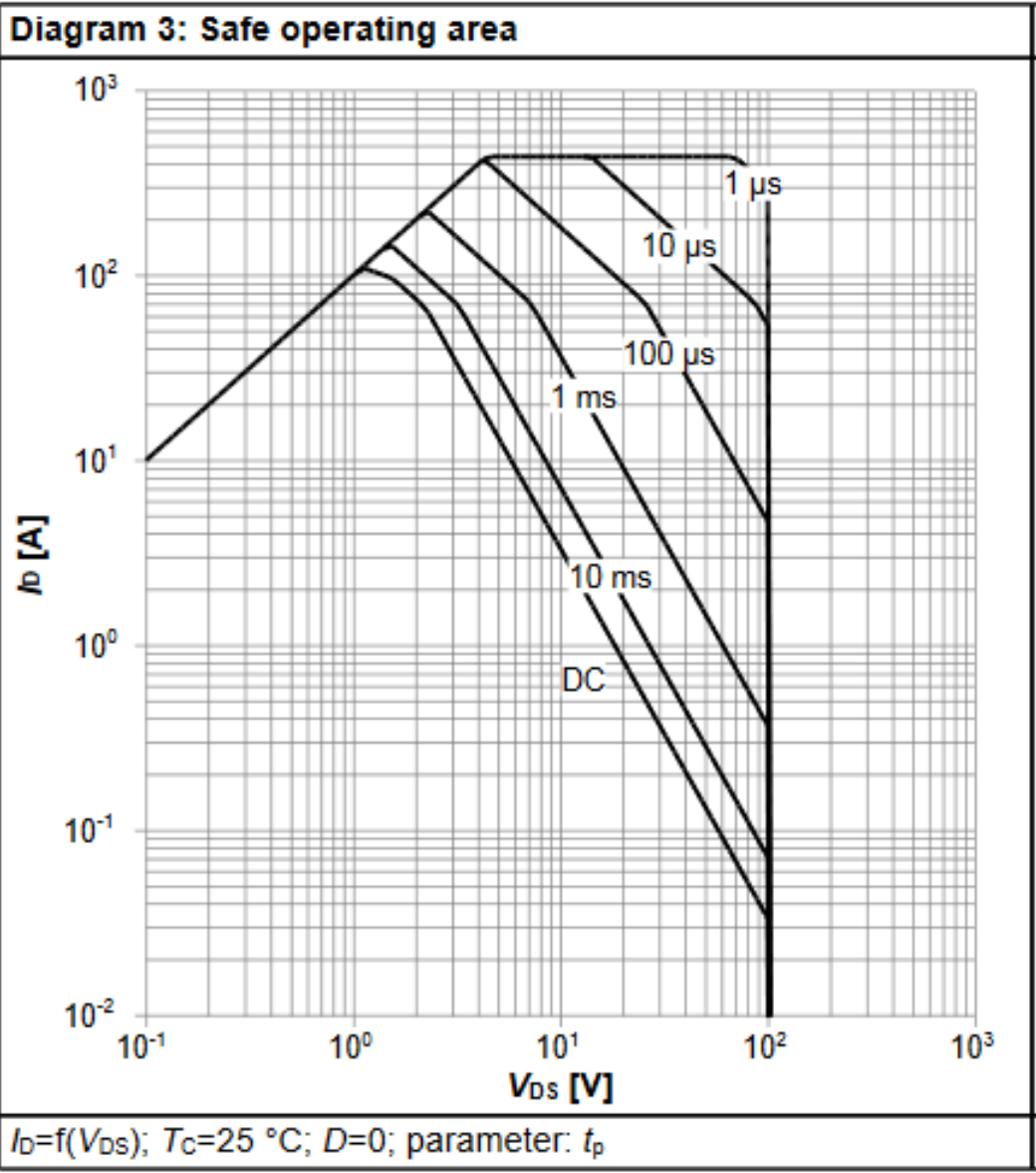


Safe Operating Area (SOA)

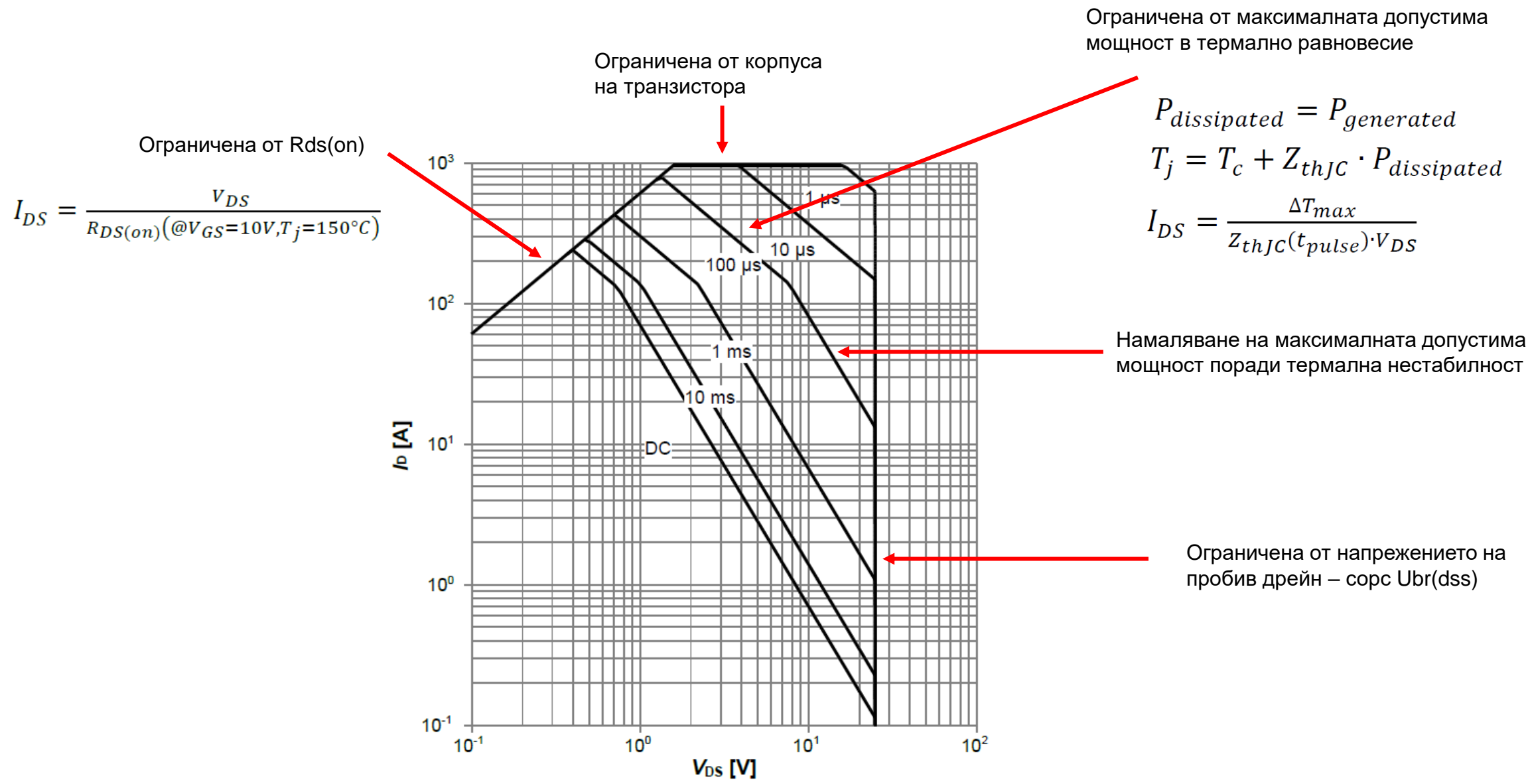
Table 2 Maximum ratings

Parameter	Symbol	Values			Unit	Note / Test Condition
		Min.	Typ.	Max.		
Continuous drain current ¹⁾	I_D	-	-	110 85 78 19.4	A	$V_{GS}=10\text{ V}, T_C=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ $V_{GS}=10\text{ V}, T_C=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ $V_{GS}=6\text{ V}, T_C=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ $V_{GS}=10\text{ V}, T_A=25\text{ }^{\circ}\text{C}, R_{thJA}=40\text{ }^{\circ}\text{C/W}^{2)}$
Pulsed drain current ³⁾	$I_{D,pulse}$	-	-	440	A	$T_A=25\text{ }^{\circ}\text{C}$
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	$T_C=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_A=25\text{ }^{\circ}\text{C}, R_{thJA}=40\text{ }^{\circ}\text{C/W}^{2)}$
Operating and storage temperature	T_J, T_{stg}	-55	-	175	$^{\circ}\text{C}$	IEC climatic category; DIN IEC 68-1: 55/175/56

Графично представяне на някои от максимално допустимите параметри



Safe Operating Area (SOA)



Параметри – $U_{GS(th)}$

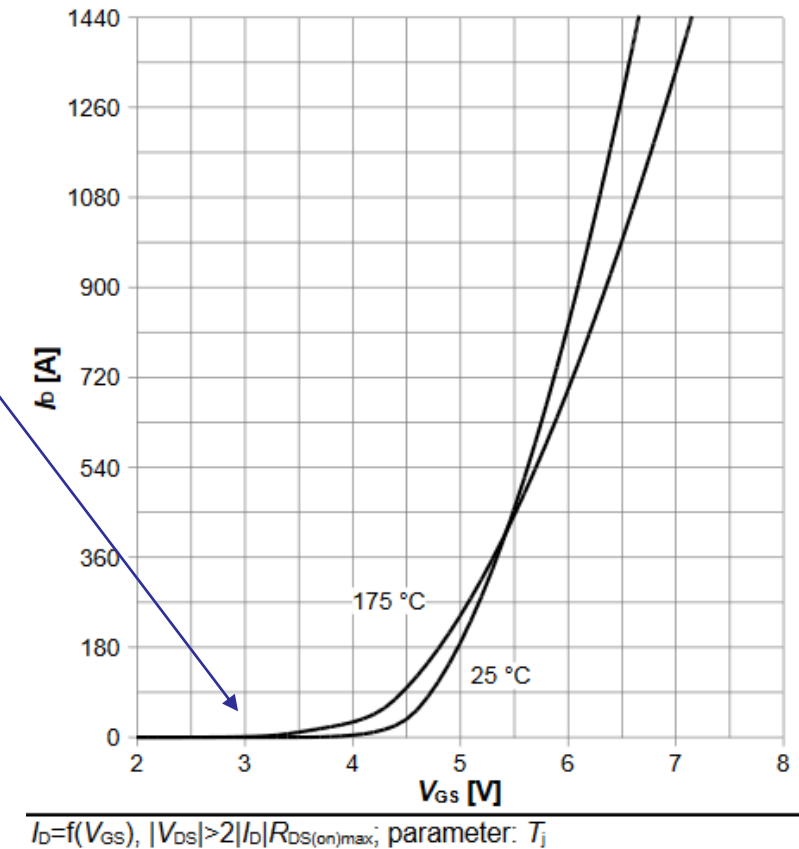
Прагово напрежение (gate threshold voltage) - $U_{GS(th)}$

Table 4 Static characteristics

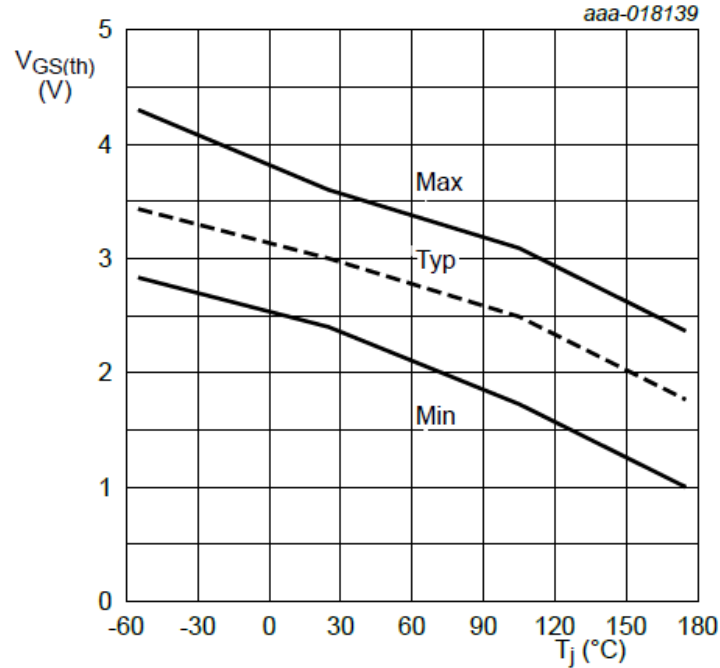
Parameter	Symbol	Values			Unit	Note / Test Condition
		Min.	Typ.	Max.		
Drain-source breakdown voltage	$V_{(BR)DSS}$	40	-	-	V	$V_{GS}=0\text{ V}$, $I_D=250\text{ }\mu\text{A}$
Breakdown voltage temperature coefficient	$dV_{(BR)DSS}/dT_j$	-	36	-	mV/°C	$I_D=5\text{ mA}$, referenced to 25 °C
Gate threshold 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.

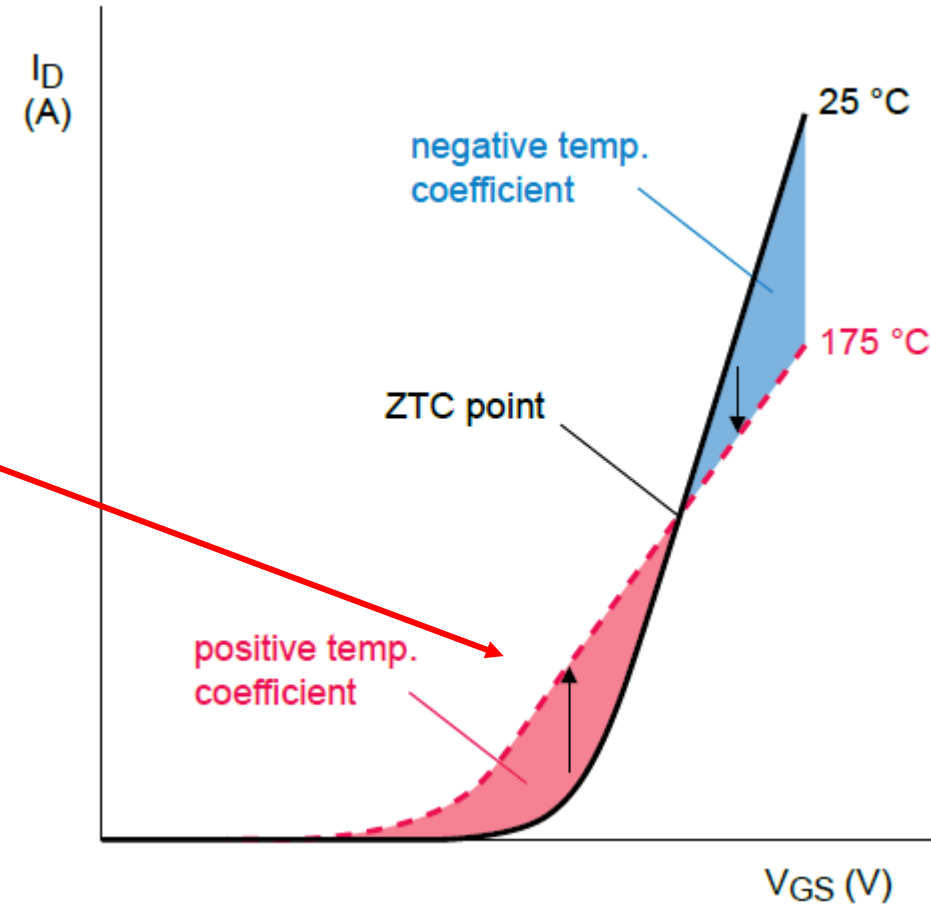


Температурна зависимост на $U_{GS(th)}$



$U_{GS(th)}$ намалява с увеличение на температурата, т.е. MOSFET ще се включи при по-ниско напрежение гейт-сорс.

Температурен коефициент на дрейновия ток: dI/dT

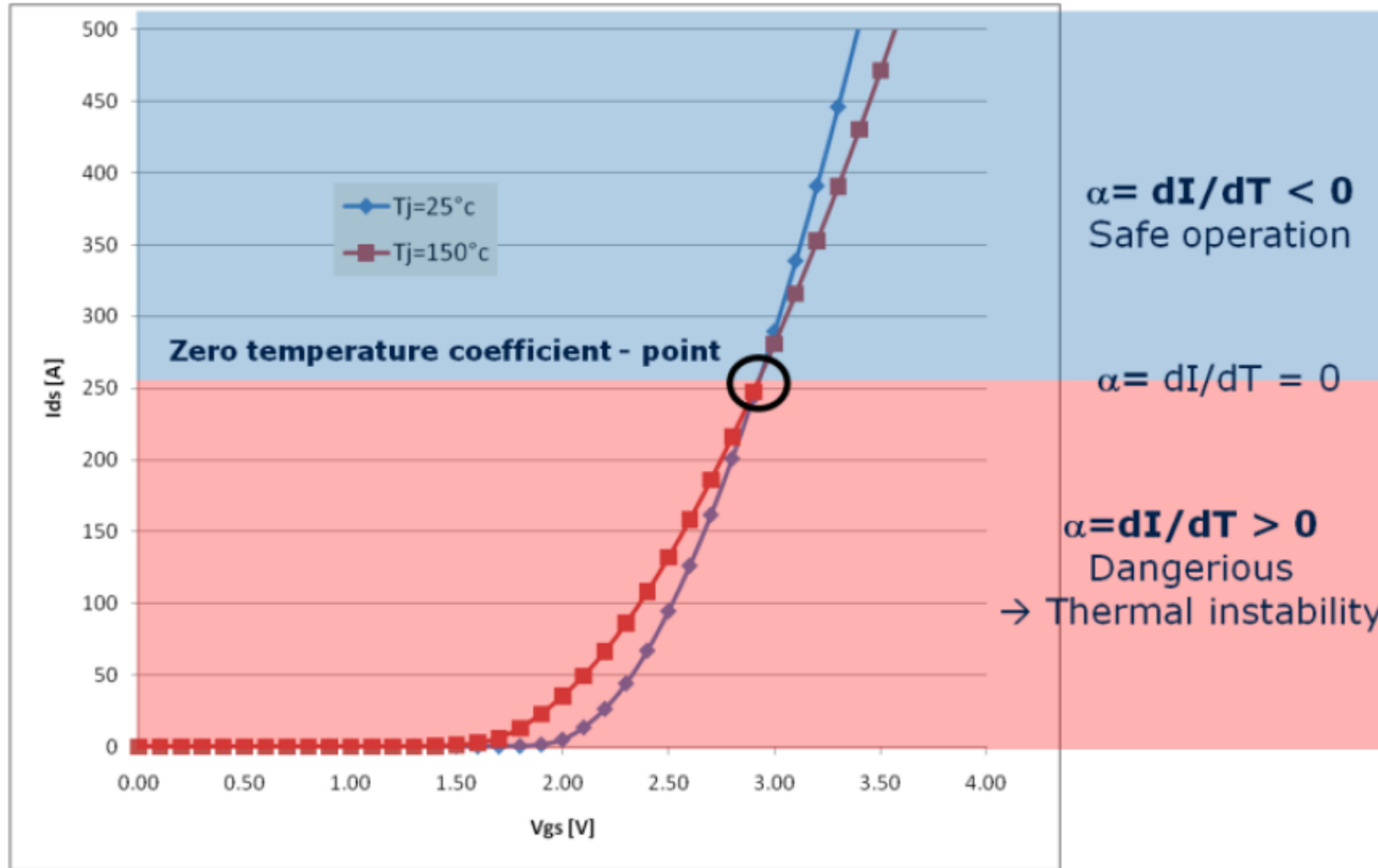


Фактори, които определят температурният коефициент на I_D :

- съпротивлението на канала нараства с температурата поради намаляване подвижността на токоносителите
- праговото напрежение намалява с температурата поради повишеното количество на токоносителите в канала.

Точката от графиката, в която двата фактора се компенсират взаимно, се нарича Zero Temperature Coefficient point

Термална нестабилност в MOSFET транзистори

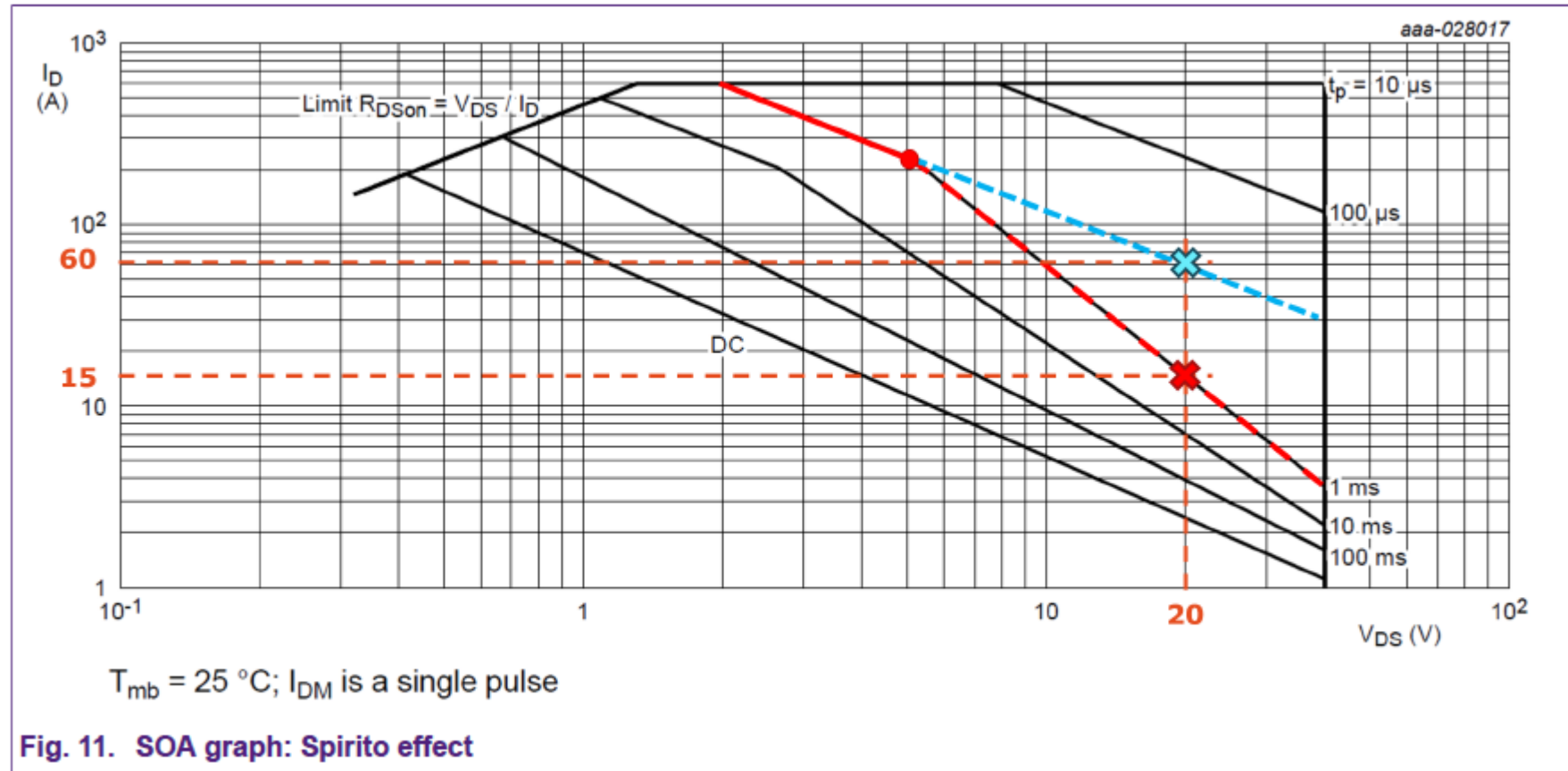


Област на термална нестабилност: Повишаването на температурата на транзистора води до нарастване на I_d и респективно на загубите ($P=I.U$). По-високите загуби предизвикват ново увеличение на температурата и се получава положителна обратна връзка ☹.

Влияние на термалната нестабилност върху SOA

Теоретичен максимален ток

Редукция заради
термална нестабилност



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}$, $I_D=100\text{ A}$

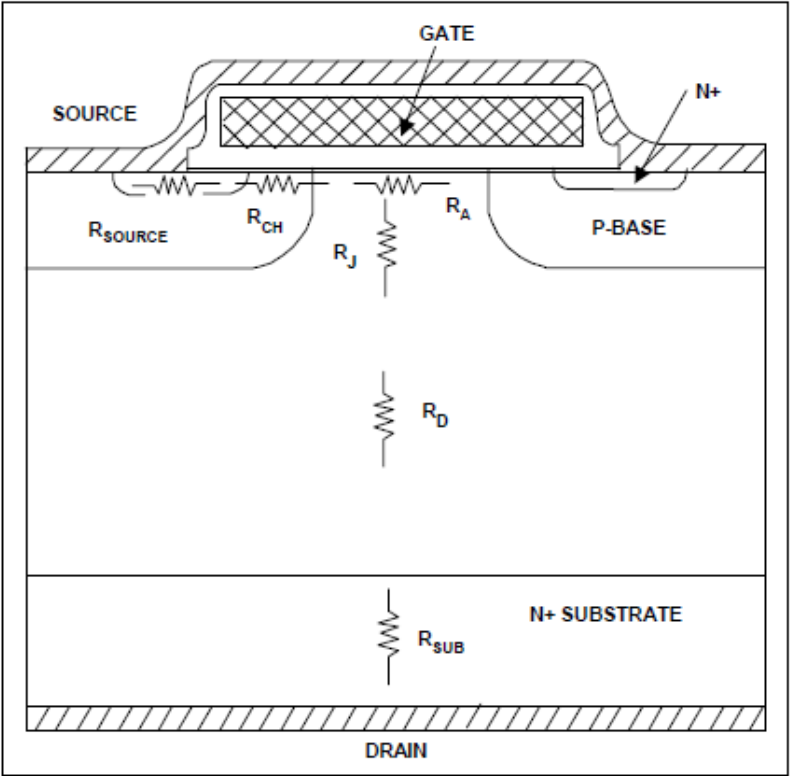
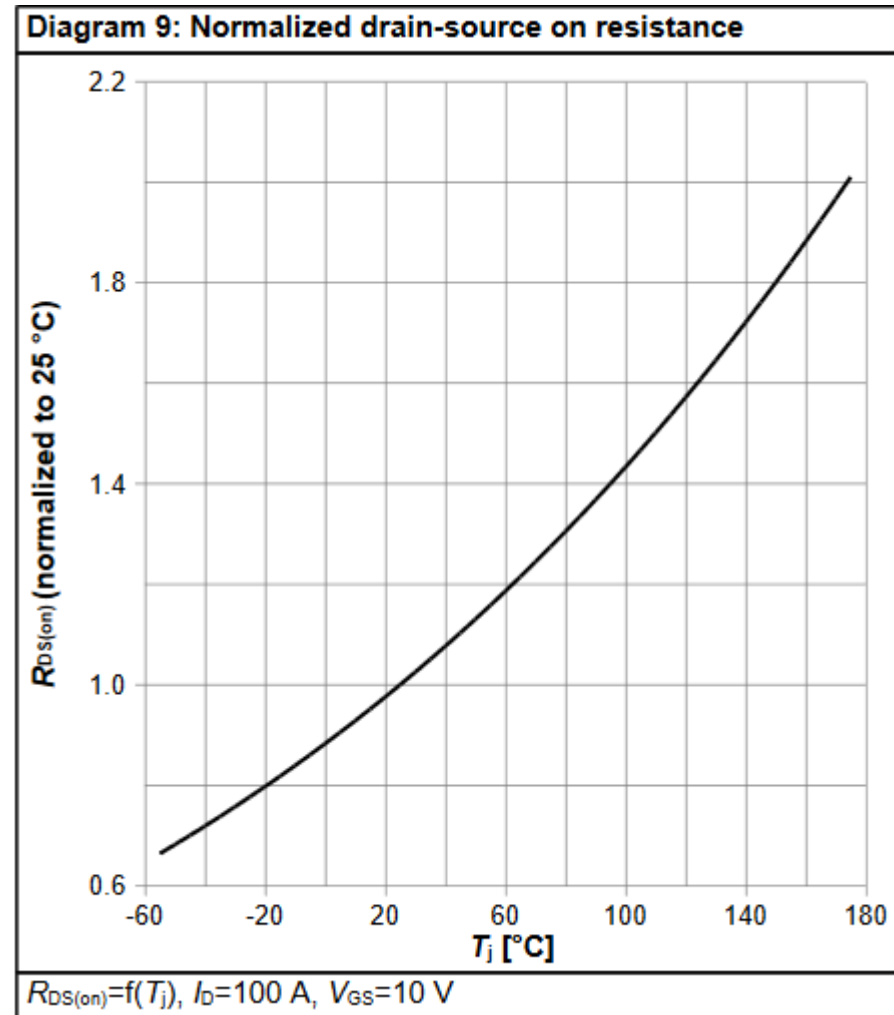


Figure 8. Origin of Internal Resistance in a Power MOSFET.

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

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

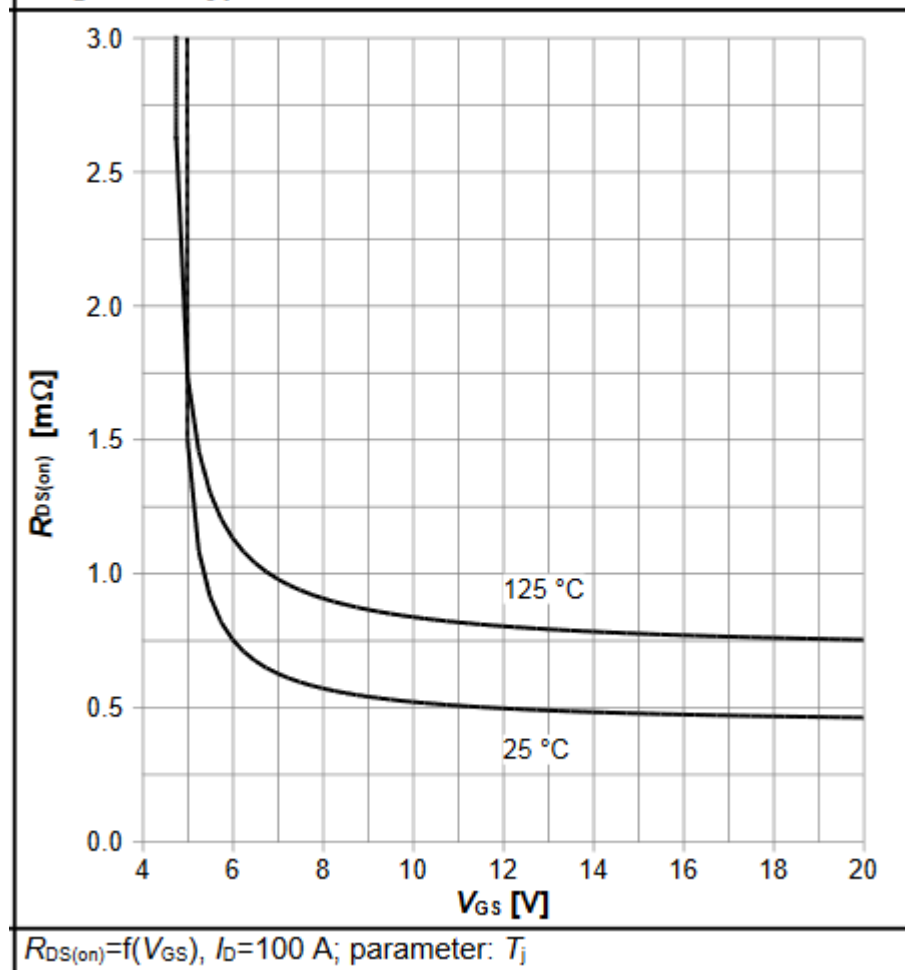
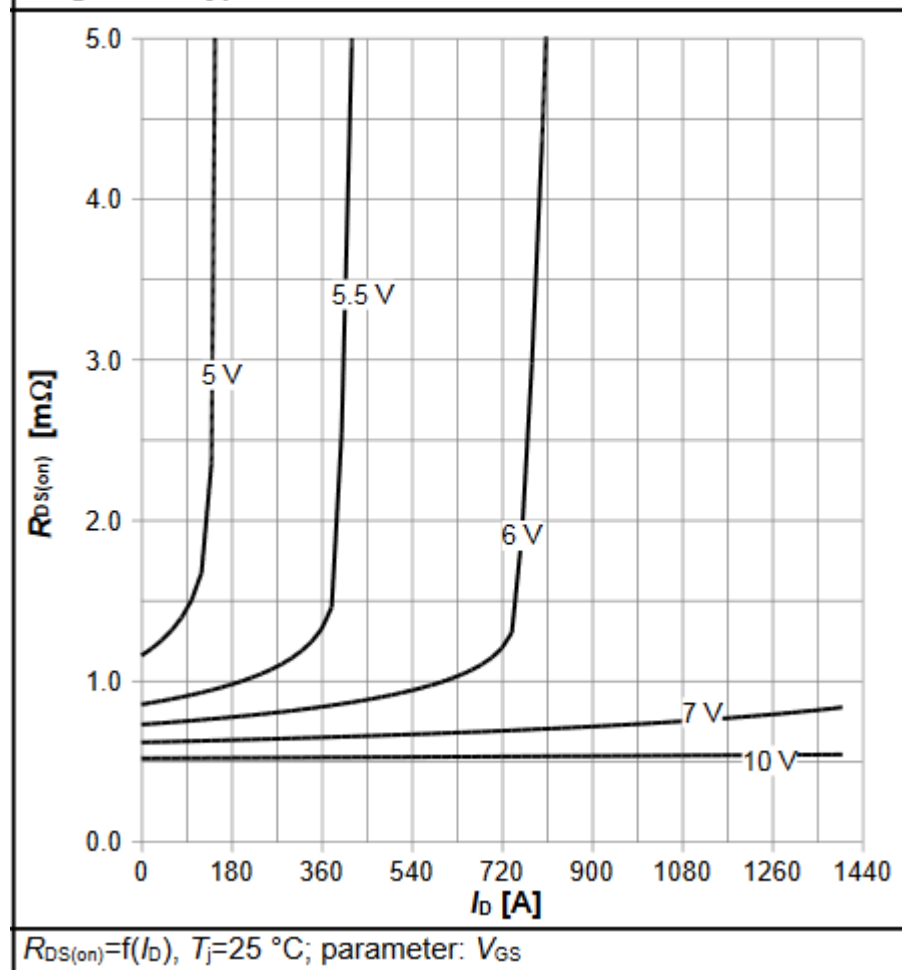


Diagram 6: Typ. drain-source on resistance



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 $V_{(BR)DSS}$

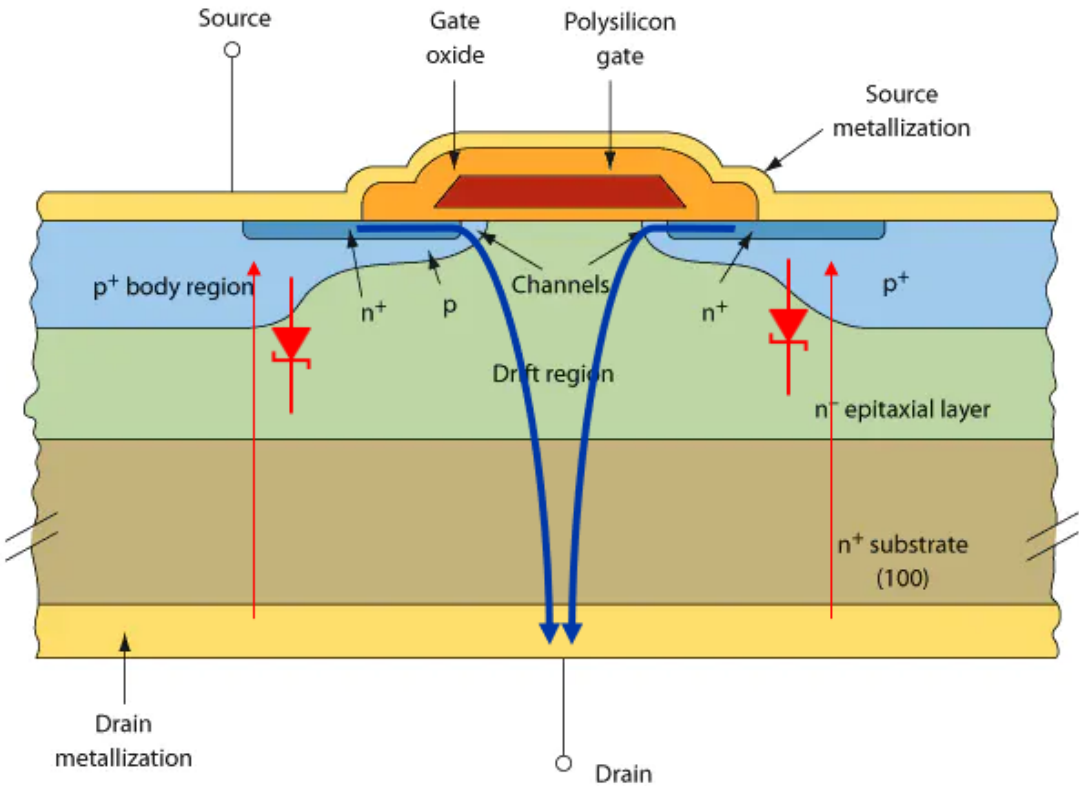
Table 4 Static characteristics

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}$, $I_D=100\text{ A}$

Напрежението дрейн-сорс при $U_{GS}=0$, при която ще протече дрейнов ток 250uA.

Работа над този праг ще причини високи електрически полета в обратно поляризираните р-п преходи. Поради ударната йонизация, високите електрически полета създават двойки електрон-дупка, които се подлагат на ефект на лавинно умножение, водещ до увеличен ток. Увеличеният обратен ток води до по-голяма разсейвана мощност ($P=U.I$) и съответно повишаване на температурата. Това може да доведе до разрушаване на транзистора.

Когато MOSFET се използва като ключ, се получават индуктивни пикове на напрежението. За да не настъпи лавинен пробив, трябва да се избере транзистор с $V_{(BR)DSS}$ поне 20-30% по-високо от захранващото напрежение U_{DD} .

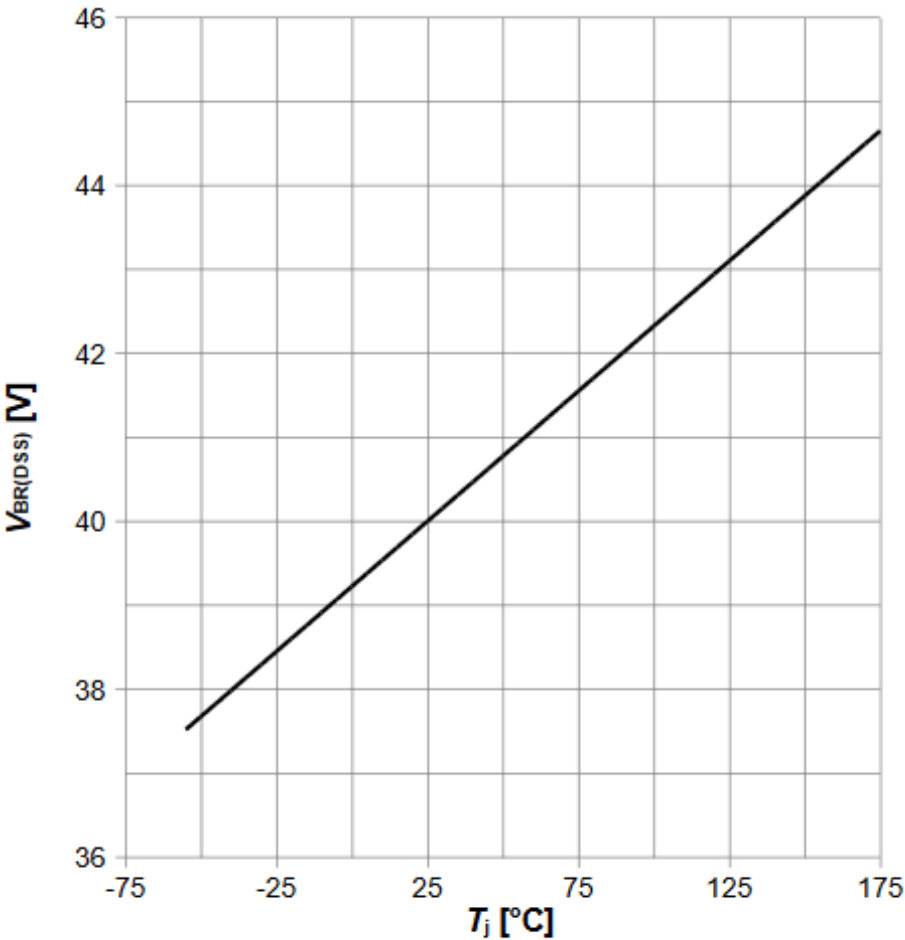


Параметри – Drain-source breakdown voltage $V_{(BR)DSS}$

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}$, $I_D=100\text{ A}$

Както е показано на фигурата, $V_{(BR)DSS}$ има положителен температурен коефициент. MOSFET може да блокира повече напрежение, когато е горещ, отколкото когато е студен.

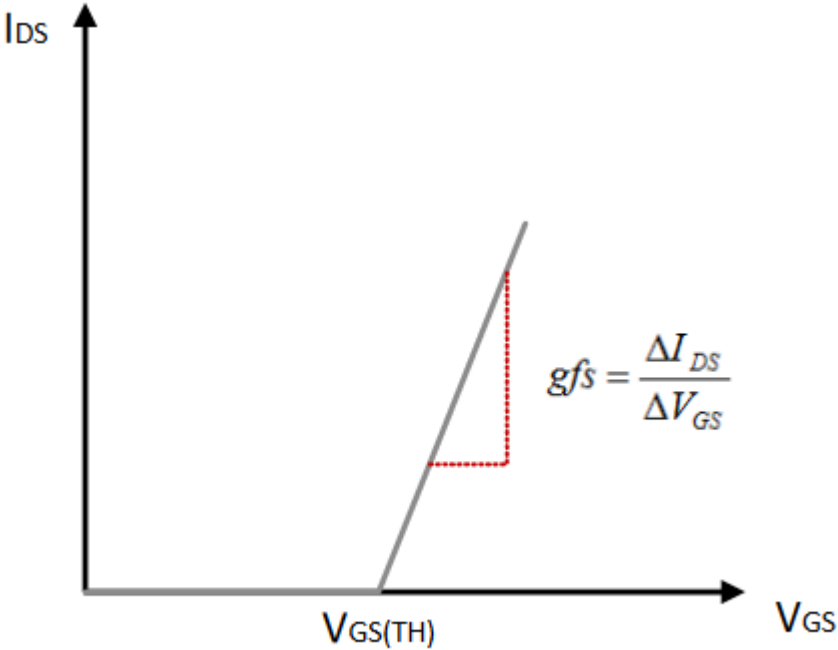


$V_{BR(DSS)}=f(T_j); I_D=1\text{ mA}$

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	-				

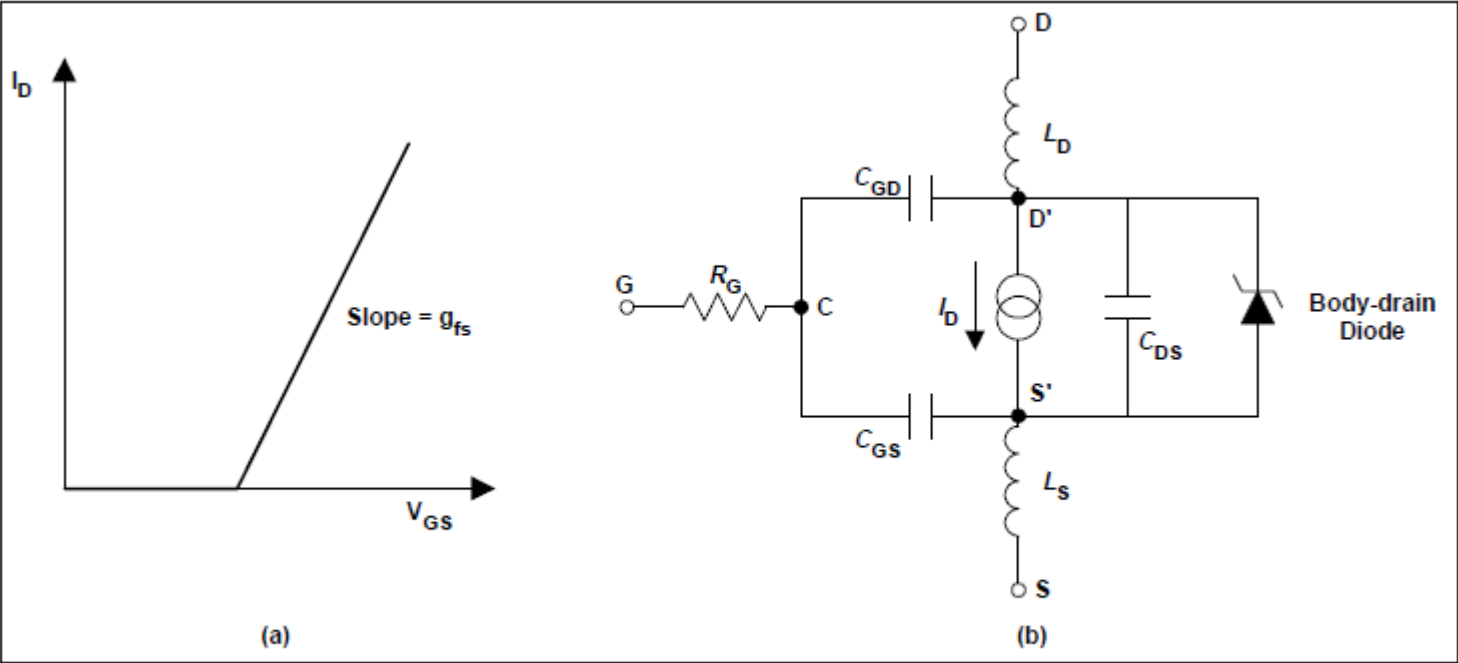
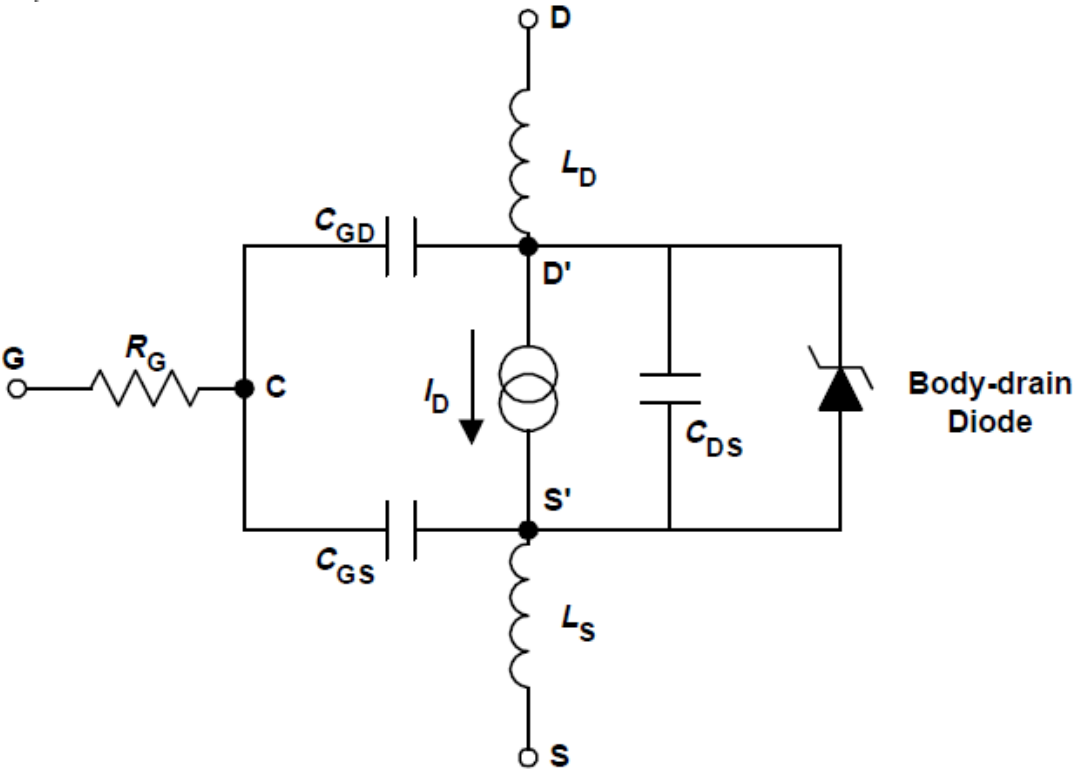


Figure 11. Power MOSFET (a) Transfer characteristics, (b) Equivalent Circuit Showing Components That Have Greatest Effect on Switching

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	-	ns	
Rise time	t_r	-	75	-	ns	
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$	-	197	-	ns	
Fall time	t_f	-	114	-	ns	



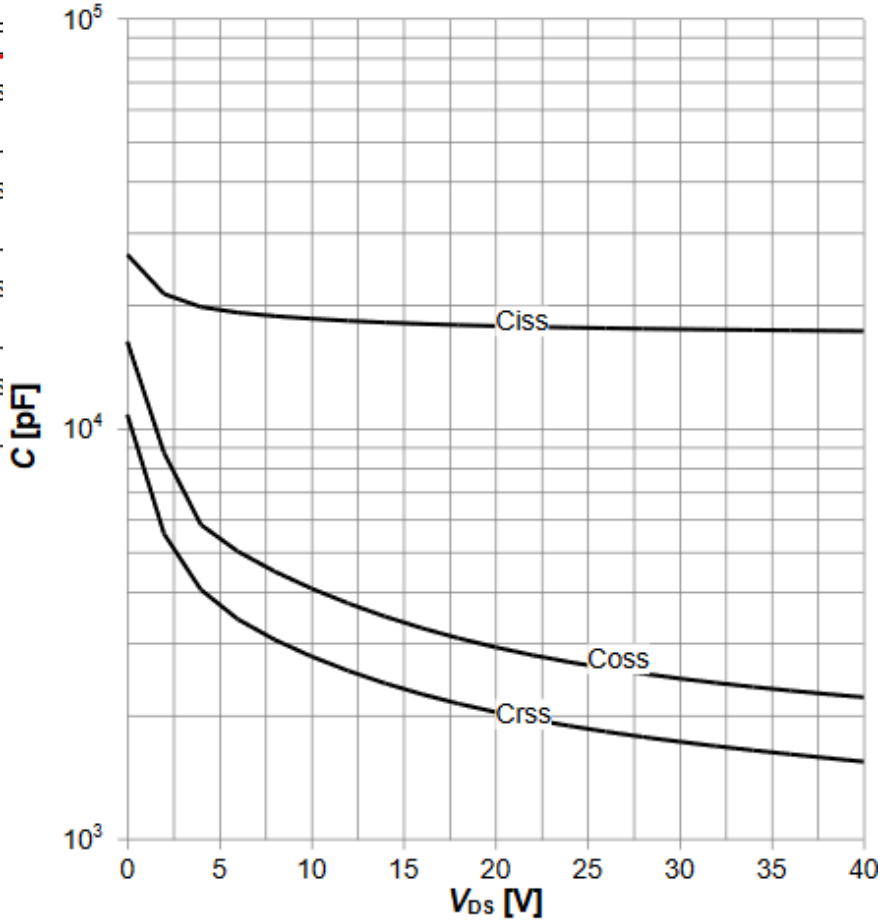
$C_{iss} = C_{GS} + C_{GD}, C_{DS} \text{ shorted}$

$C_{rss} = C_{GD}$

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

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} $R_{G,ext}=2.7\ \Omega$



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“.

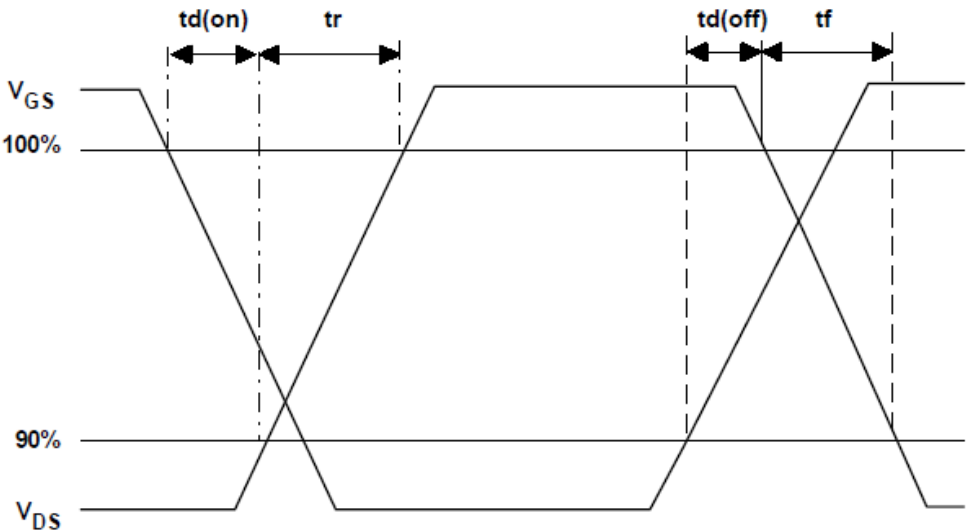


Table 5 Dynamic characteristics

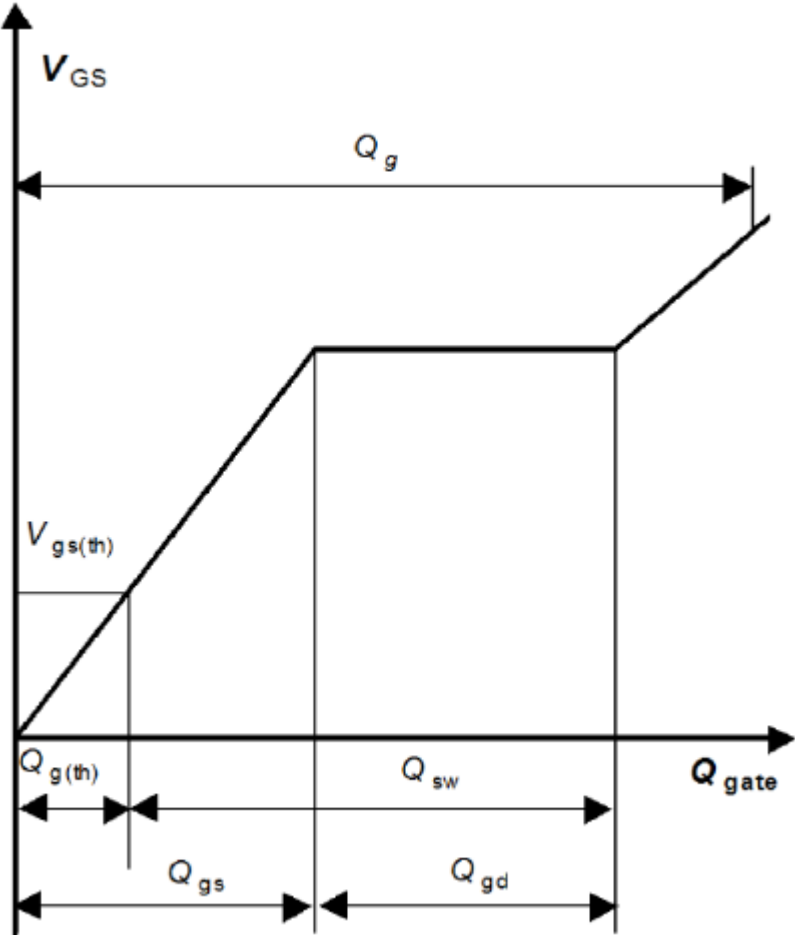
Parameter	Symbol	Values			Unit	Note / Test Condition
		Min.	Typ.	Max.		
Input capacitance ¹⁾	C_{iss}	-	18000	-	pF	$V_{GS}=0\text{ V}$, $V_{DS}=20\text{ V}$, $f=1\text{ MHz}$
Output capacitance ¹⁾	C_{oss}	-	2900	-	pF	$V_{GS}=0\text{ V}$, $V_{DS}=20\text{ V}$, $f=1\text{ MHz}$
Reverse transfer capacitance 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 – заряди на гейта

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.



Въпреки че стойностите на входния капацитет са полезни, те не дават точни резултати при сравняване на комутационни характеристики на два транзистора от различни производители. Влиянието на геометричните размери и стръмността g_{fs} правят подобни сравнения по-трудни. По-полезен параметър от гледна точка на схемното проектиране е зарядът на гейта, а не капацитетът.

Процес на включване на транзистора

t1: $U_{gs} = U_{th}$ - започва да тече дрейнов ток.

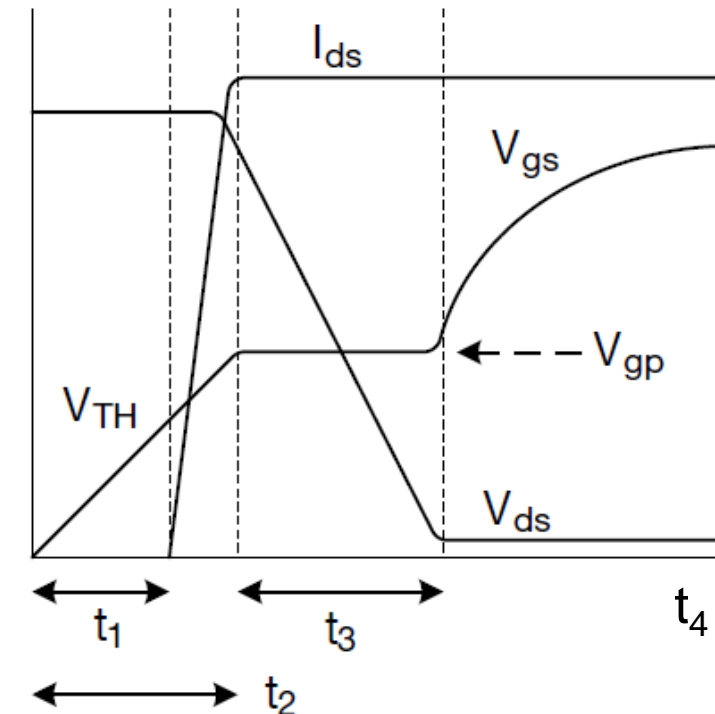
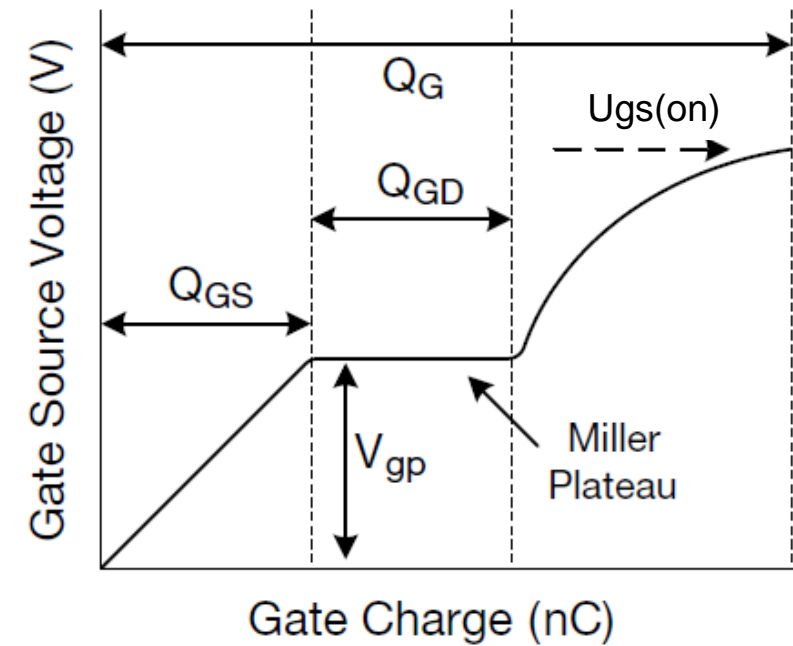
t2: C_{gs} е напълно зареден и токът на дрейна достига стойността I_d и остава постоянен, докато напрежението на дрейна започва да намалява.

t3: Дрейновият ток зарежда капацитета C_{gd} . U_{gs} не расте защото U_{ds} намалява и с това увеличава ефективната стойност на U_{gd} – т.нар. ефект на Милер.

t4: След като и двата капацитета C_{gs} и C_{gd} са напълно заредени, напрежението на гейта започва да се увеличава отново, докато достигне желаната стойност $U_{gs(on)}$.

Зарядът на гейта ($Q_{gs} + Q_{gd}$), съответстващ на времето t3, е минималният заряд, необходим за включване на транзистора.

За да се минимизира $R_{ds(on)}$ е необходимо да се избере напрежение на гейта, по-високо от минимално необходимото. Затова при изчисленията се използва заряд на гейта Q_g .



Параметри – Avalanche data

Table 4. Avalanche data

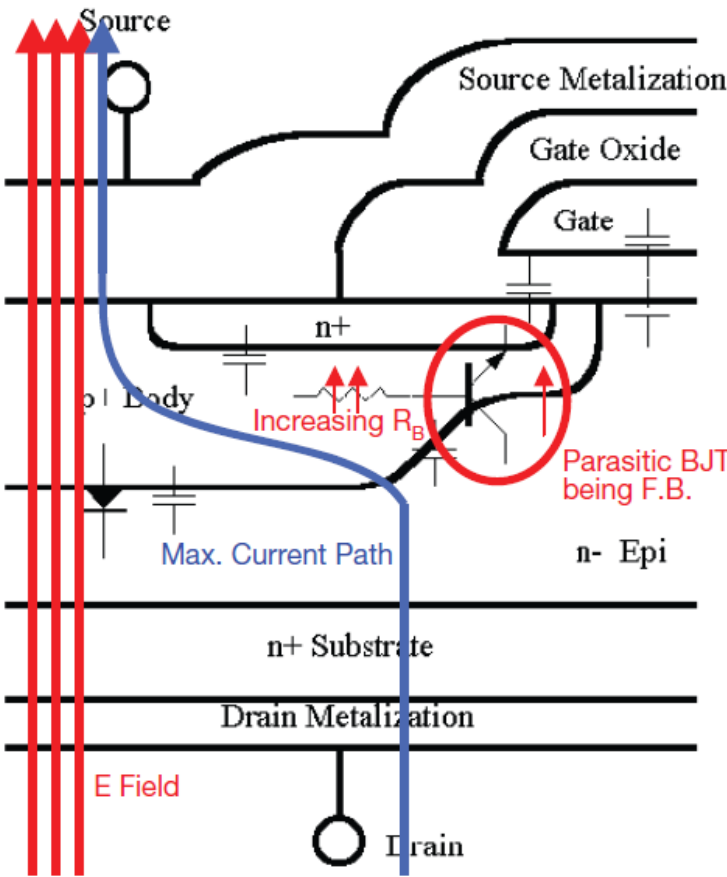
Symbol	Parameter	Value	Unit
I_{AR}	Avalanche current, repetitive or not repetitive (pulse width limited by T_{jmax})	30	A
E_{AS}	Single pulse avalanche energy (starting $T_j=25^{\circ}C$, $I_D=I_{AR}$, $V_{DD}=50V$)	140	mJ

STP30NF20

Лавинен пробив (avalanche operation) – протича дрейнов ток, въпреки че $U_{gs}=0$. Типичен причинител е изключване на индуктивен товар.

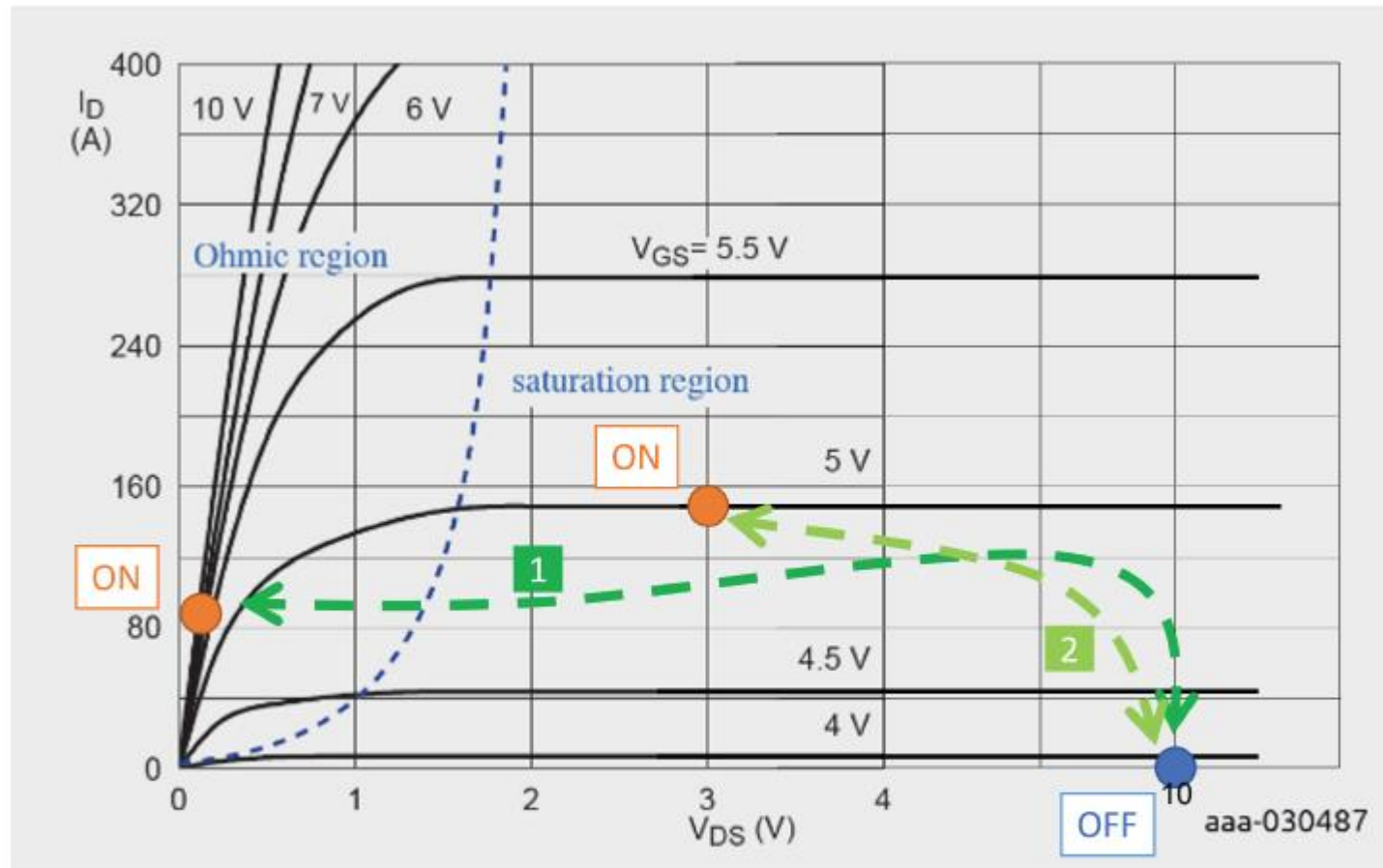
I_{AR} е максималният лавинен дрейнов ток, който може да протече, без това да доведе до включване на паразитният биполярен транзистор и настъпване на вторичен пробив в него. Подобен вторичният пробив в биполярният транзистор е необратим и води до термично разрушаване на MOS транзистора.

E_{AS} е максималната енергия, която може да бъде разсеяна от транзистора по време на единичен лавинен пробив, преди температурата на прехода (T_j) да достигне максималната допустима стойност.



Приложения на MOS Транзисторите

Ключов Режим и Линеен Режим



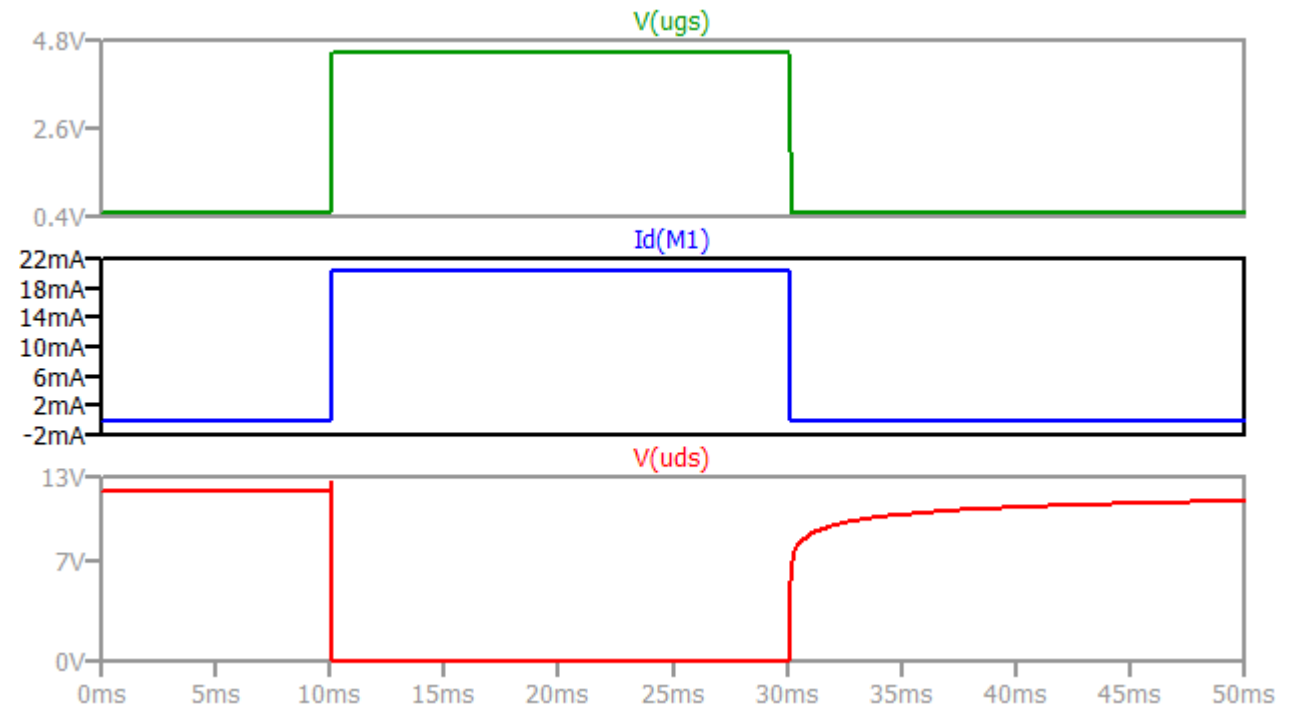
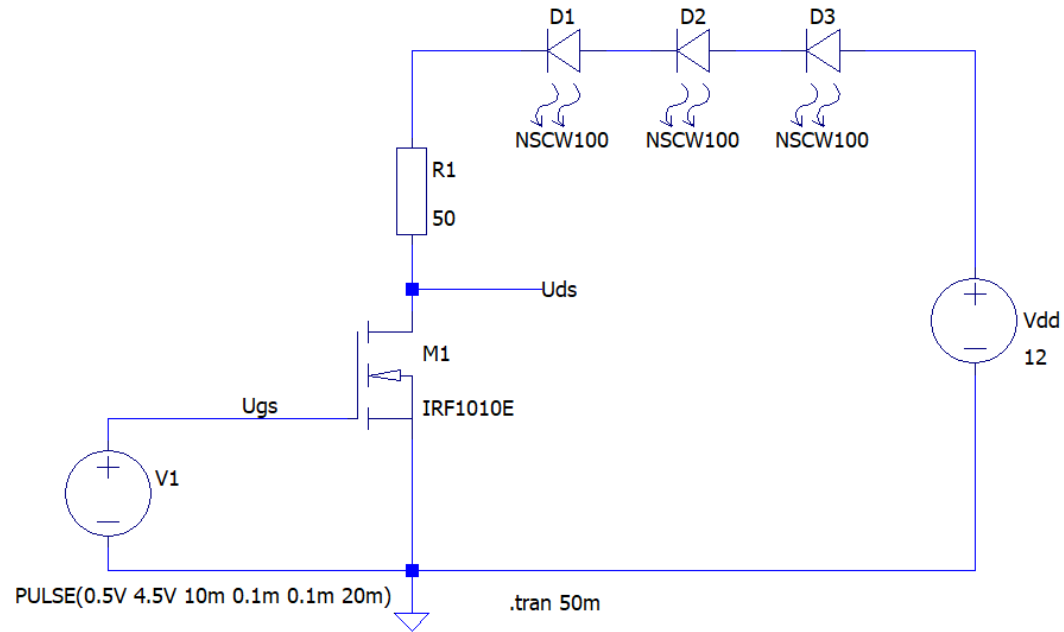
[1] R_{DSon} operation ON/OFF trajectory; [2] linear mode operation ON/OFF trajectory

Example of MOSFET output characteristic: ON/OFF trajectories

Приложения на MOS Транзисторите
Ключов режим

MOSFET Ключ – Резистивен Товар

Управление на светодиоди (резистивен товар)



OFF

ON

OFF

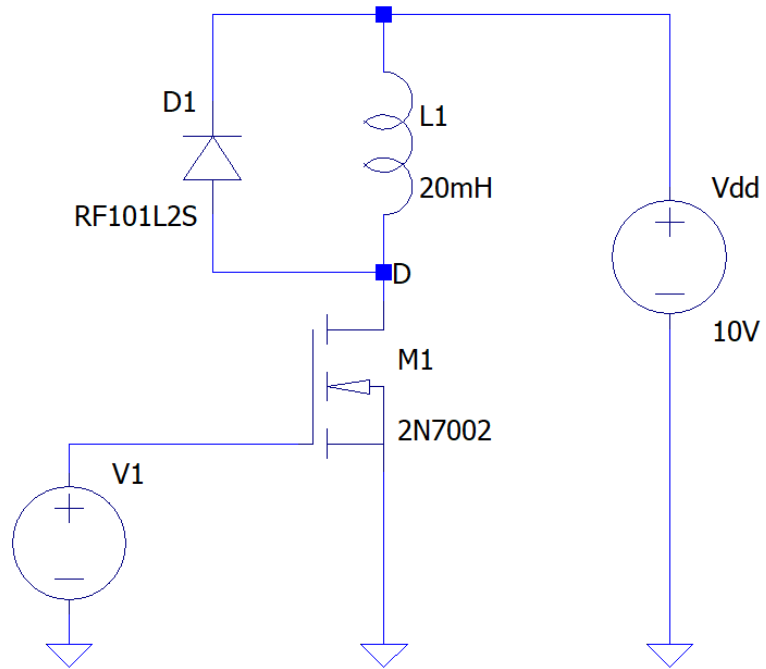
LED-DRV.asc

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

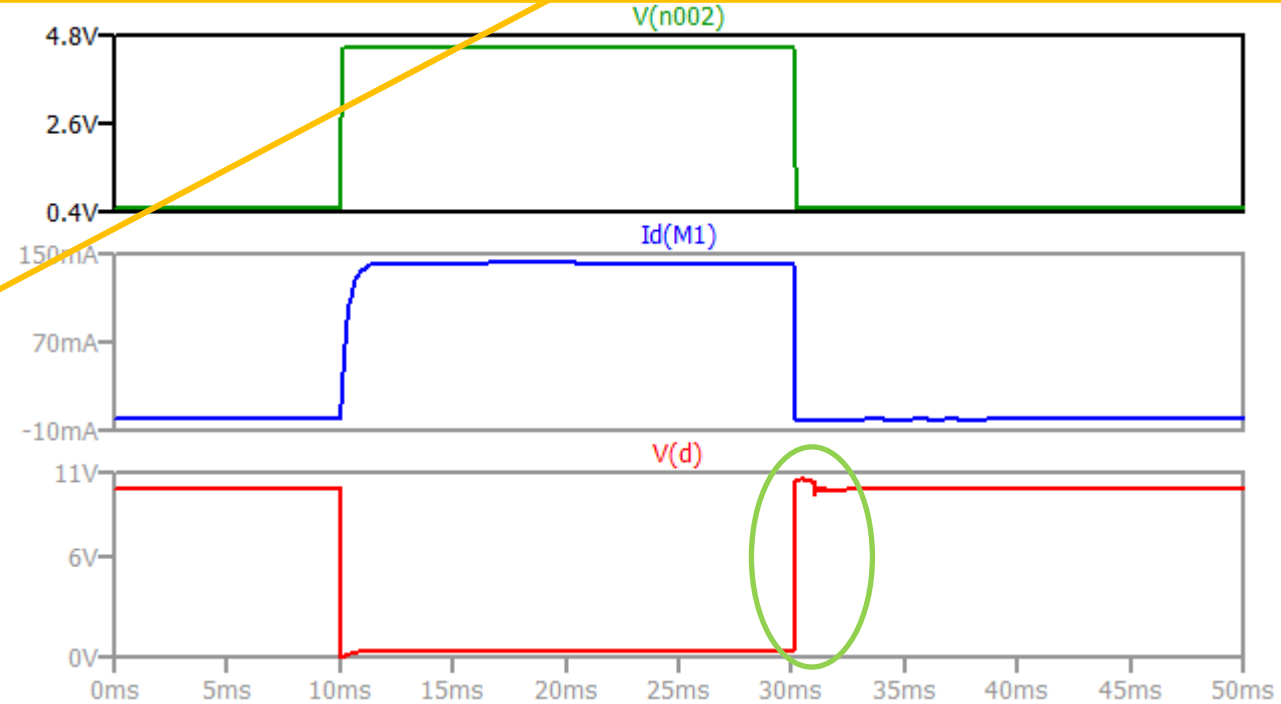
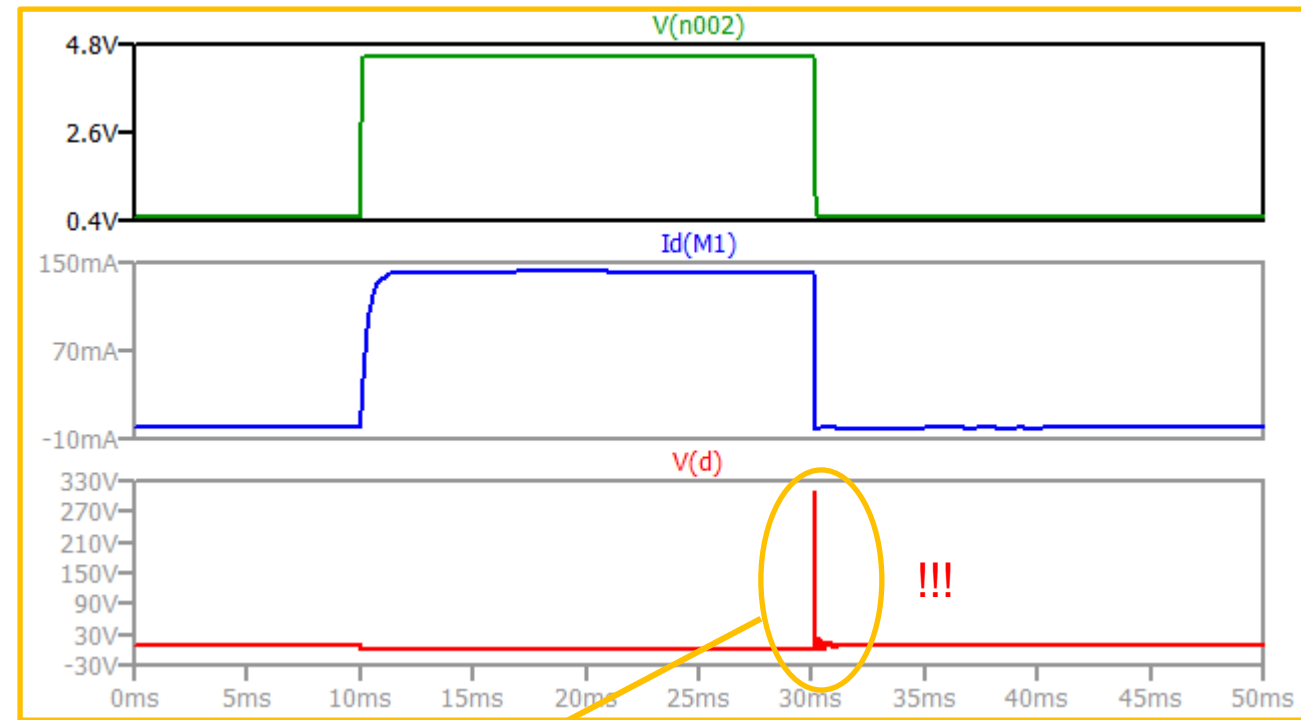
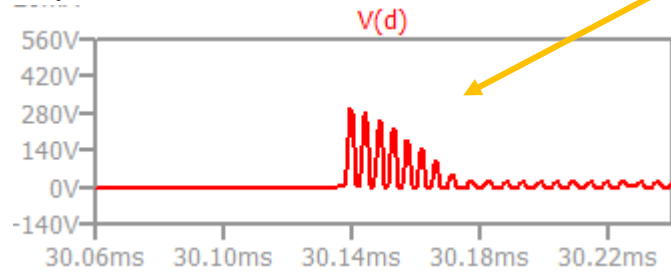
MOSFET Ключ – Индуктивен Товар

Без D1

Управление на индуктивен товар



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

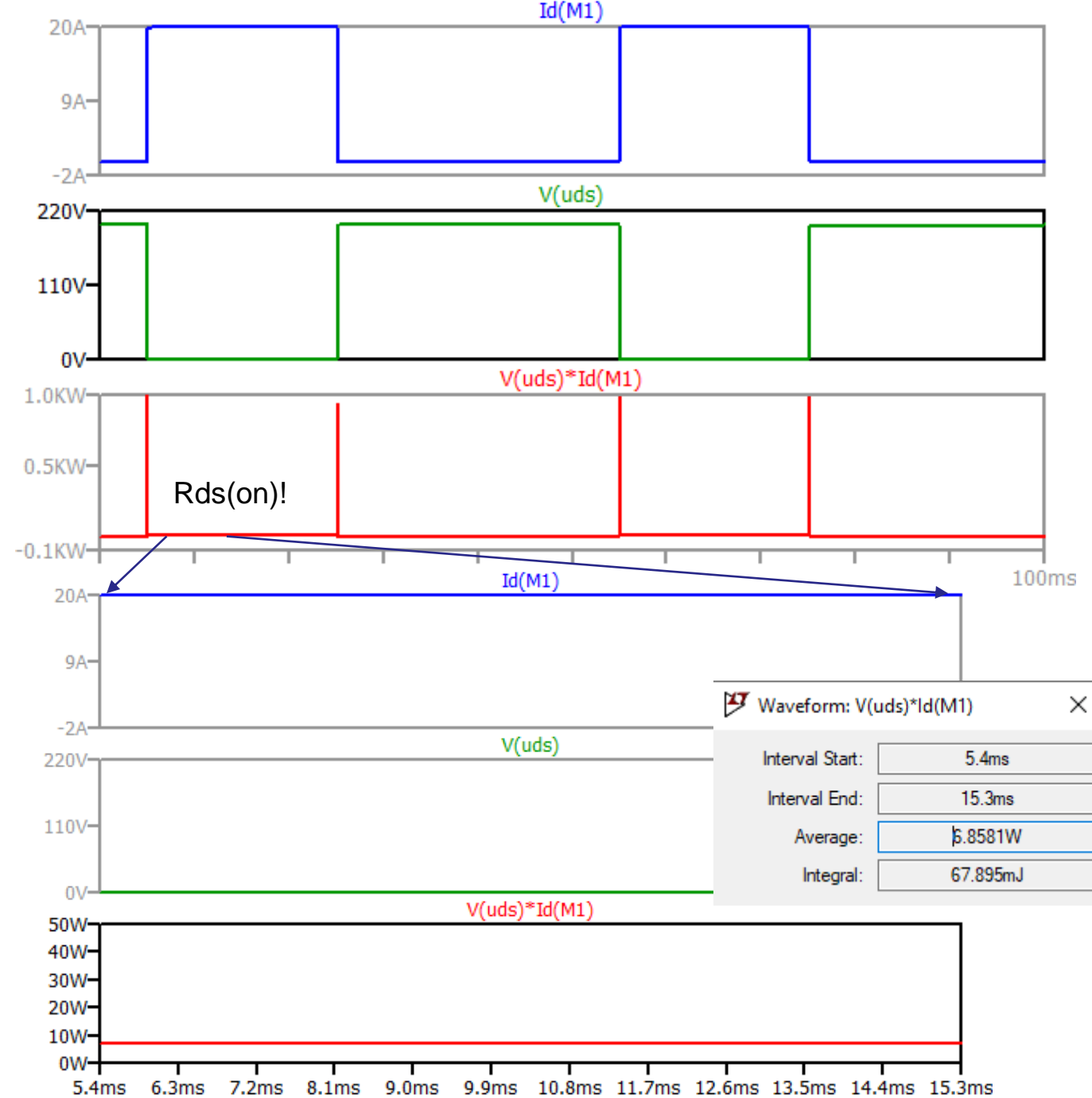
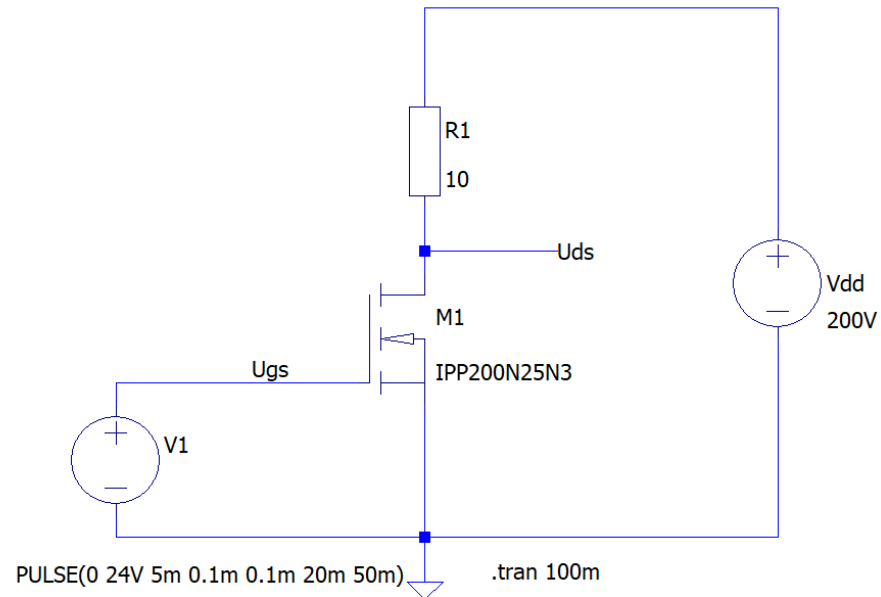


FET-switch-ind-2.asc

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

MOSFET Ключ – Загуби

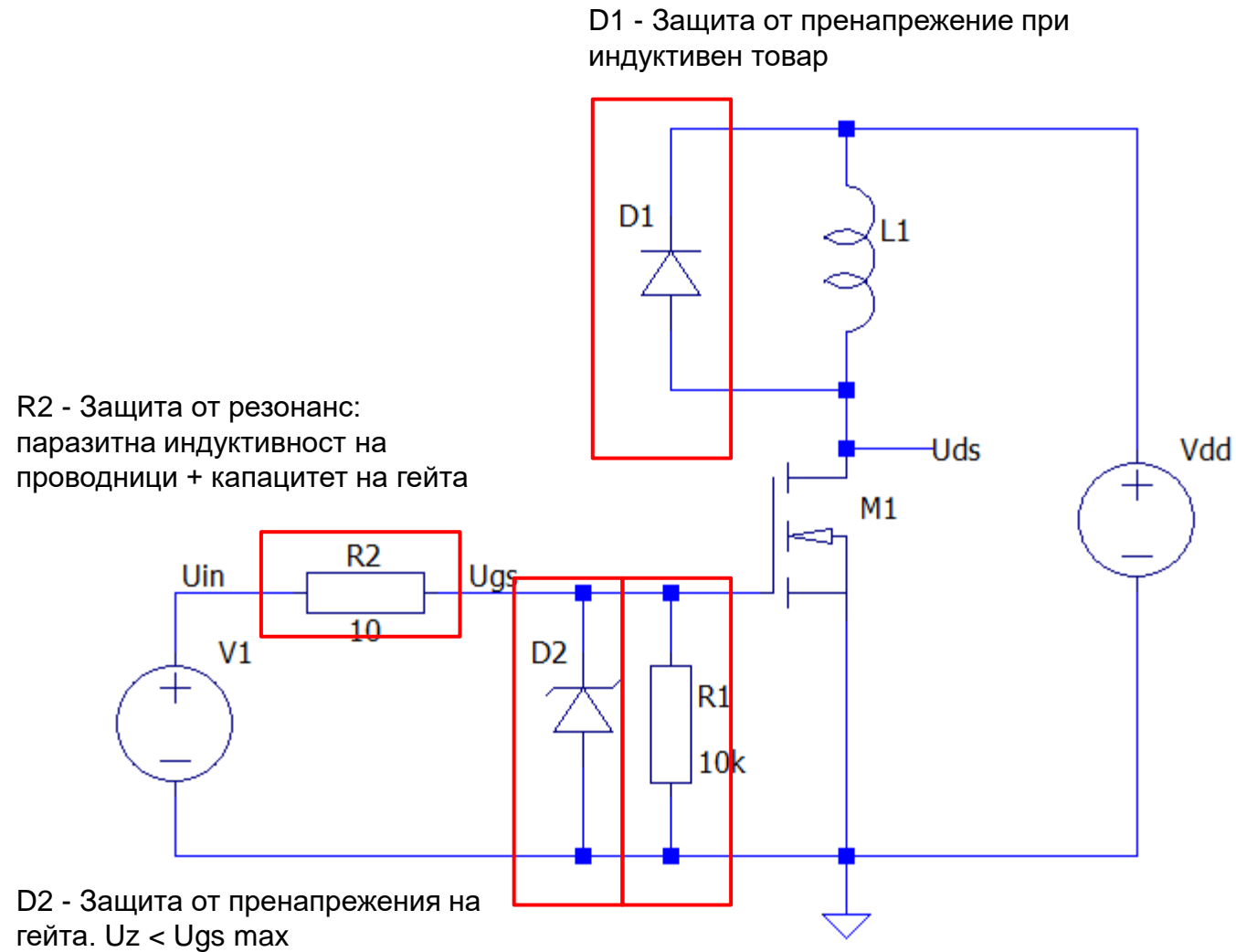
Разсейвана мощност



FET-switch-power.asc

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

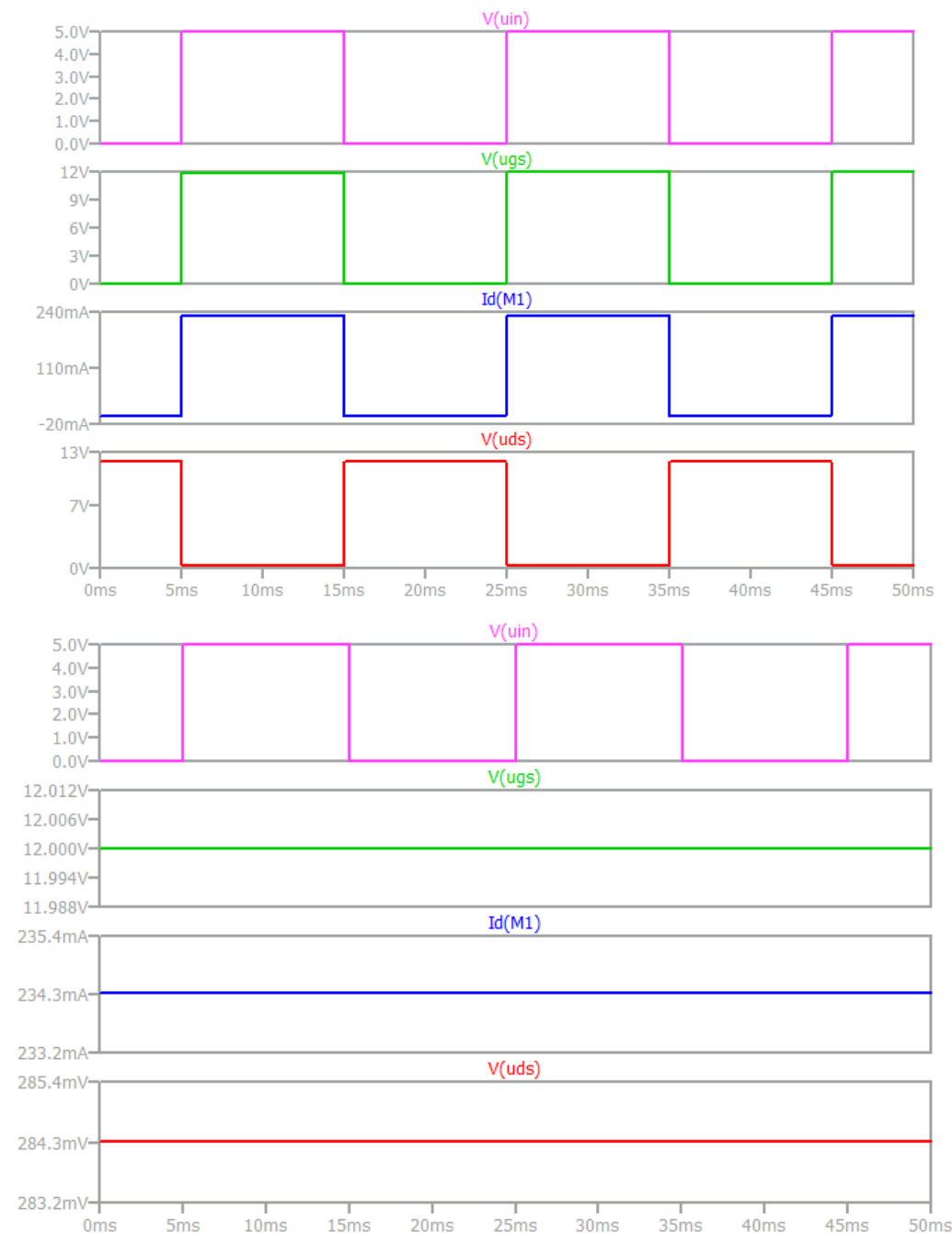
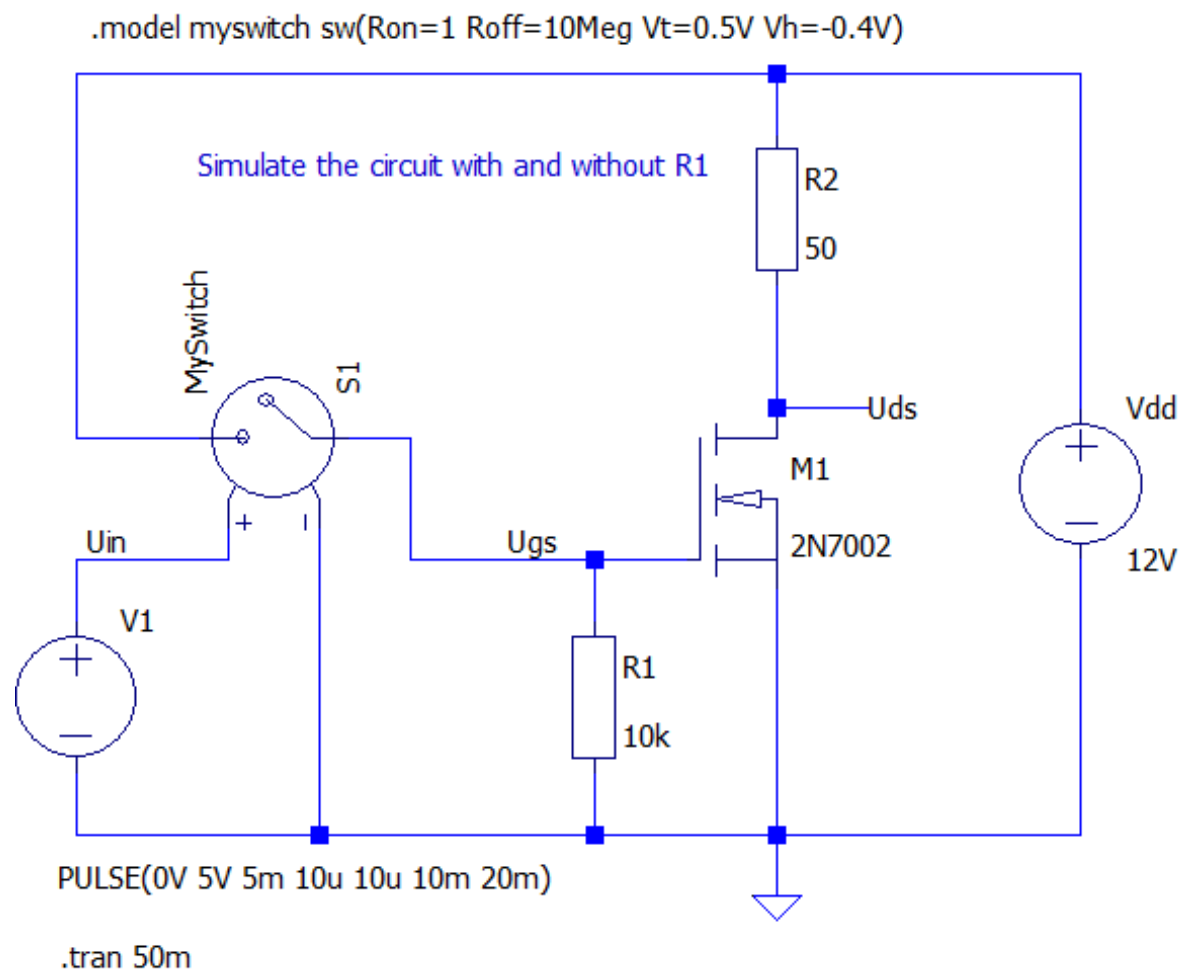
Практическа схема на MOSFET ключ



Защо е необходим резистора между гейта и сорса?

Практическа схема на MOSFET ключ

Защо е необходим резистора между гейта и сорса?

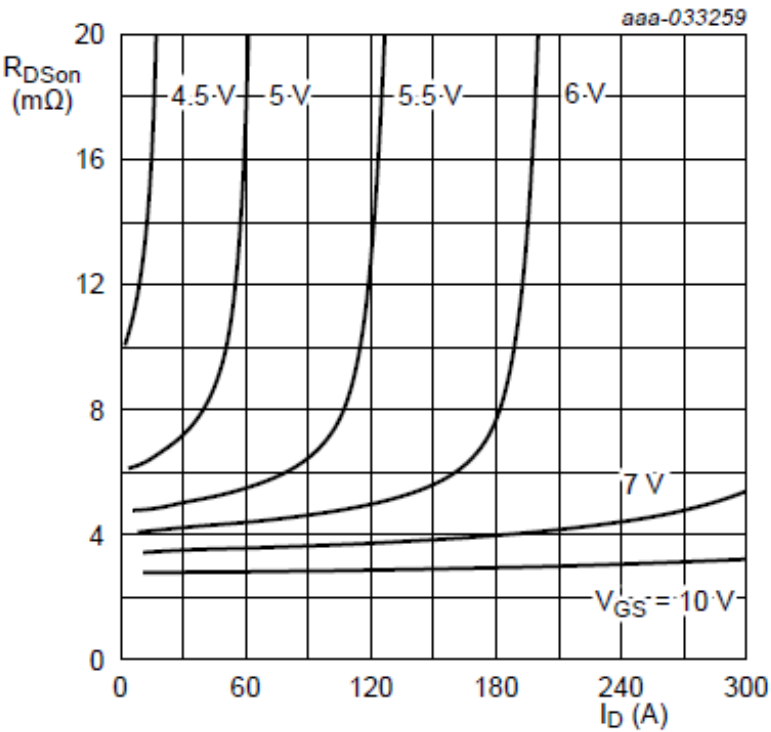
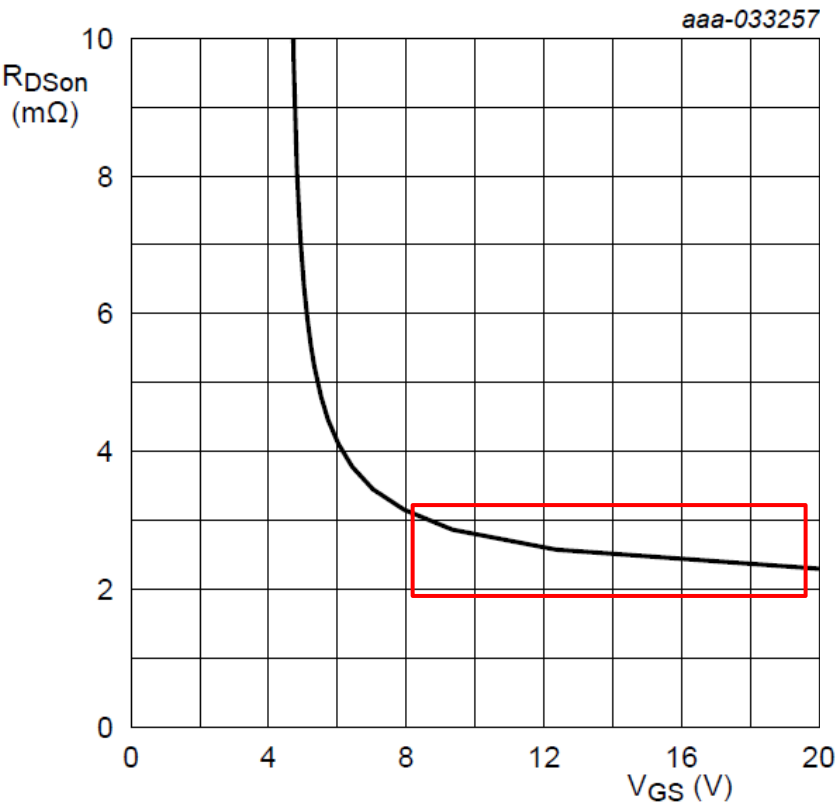
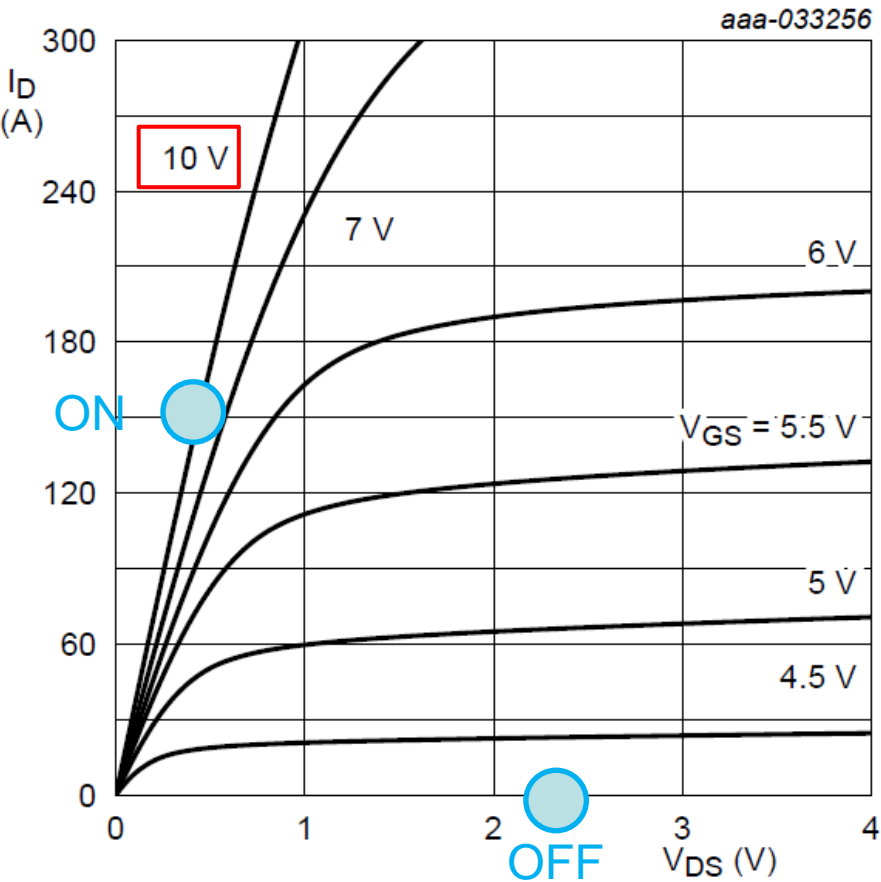


Избор на Ugs

Table 7. Characteristics

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Static characteristics						
V _{(BR)DSS}	drain-source breakdown voltage	I _D = 250 μA; V _{GS} = 0 V; T _J = 25 °C	80	-	-	V
		I _D = 250 μA; V _{GS} = 0 V; T _J = -55 °C	72	-	-	V
V _{GS(th)}	gate-source threshold voltage	I _D = 1 mA; V _{DS} =V _{GS} ; T _J = 25 °C; Fig. 11	2	3	4	V
		I _D = 1 mA; V _{DS} =V _{GS} ; T _J = 175 °C	-	1.8	-	V
		I _D = 1 mA; V _{DS} =V _{GS} ; T _J = -55 °C	-	3.4	-	V

Ugs трябва да бъде
значително по-голямо от
Ugs(th) за минимални загуби
Id * Uds



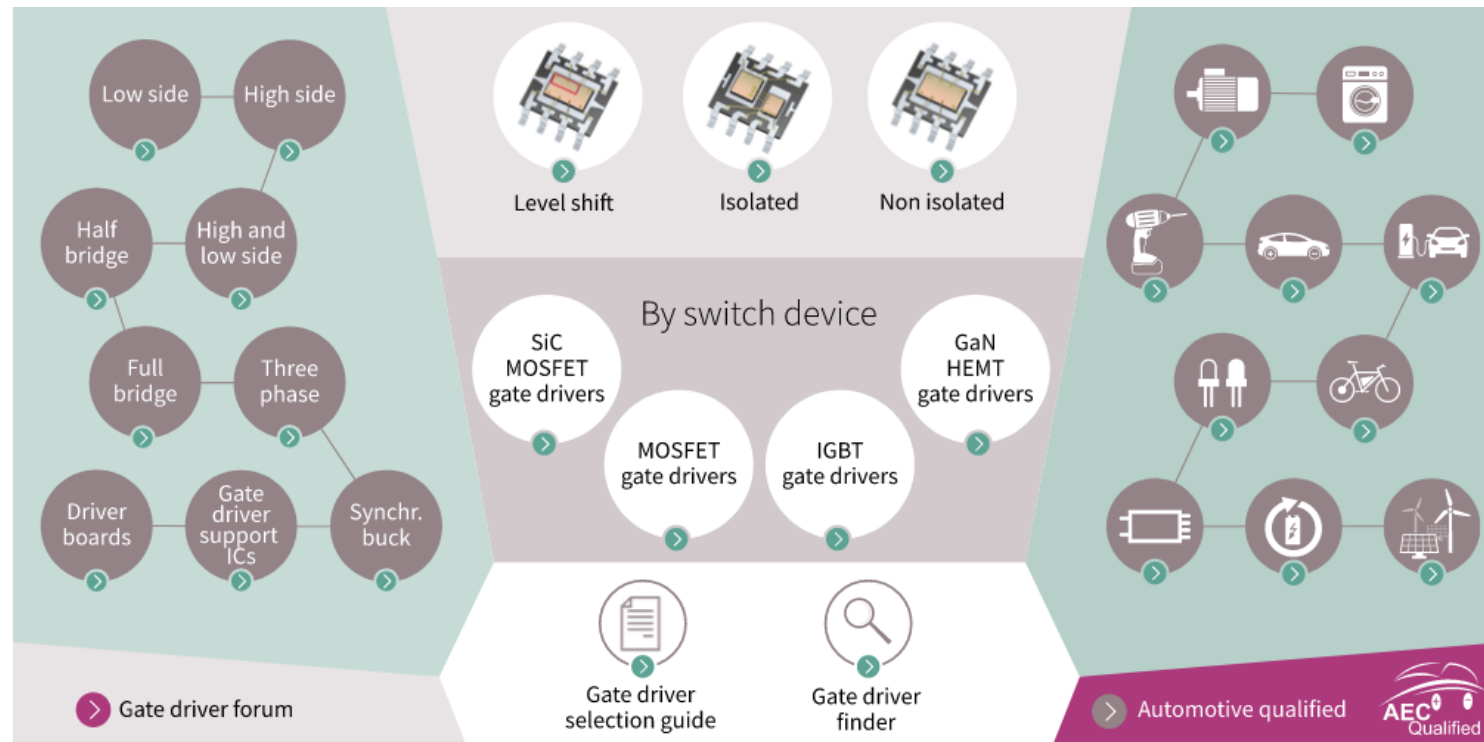
Схеми за управление на гейта (gate drivers)

Входният сигнал към схемата за управление на гейта обикновено е под формата на серия от импулси на логическо ниво от 3,3 или 5 V. Тези сигналите могат да произхождат от микроконтролер, FPGA или друга логическа интегрална схема, или компаратор.

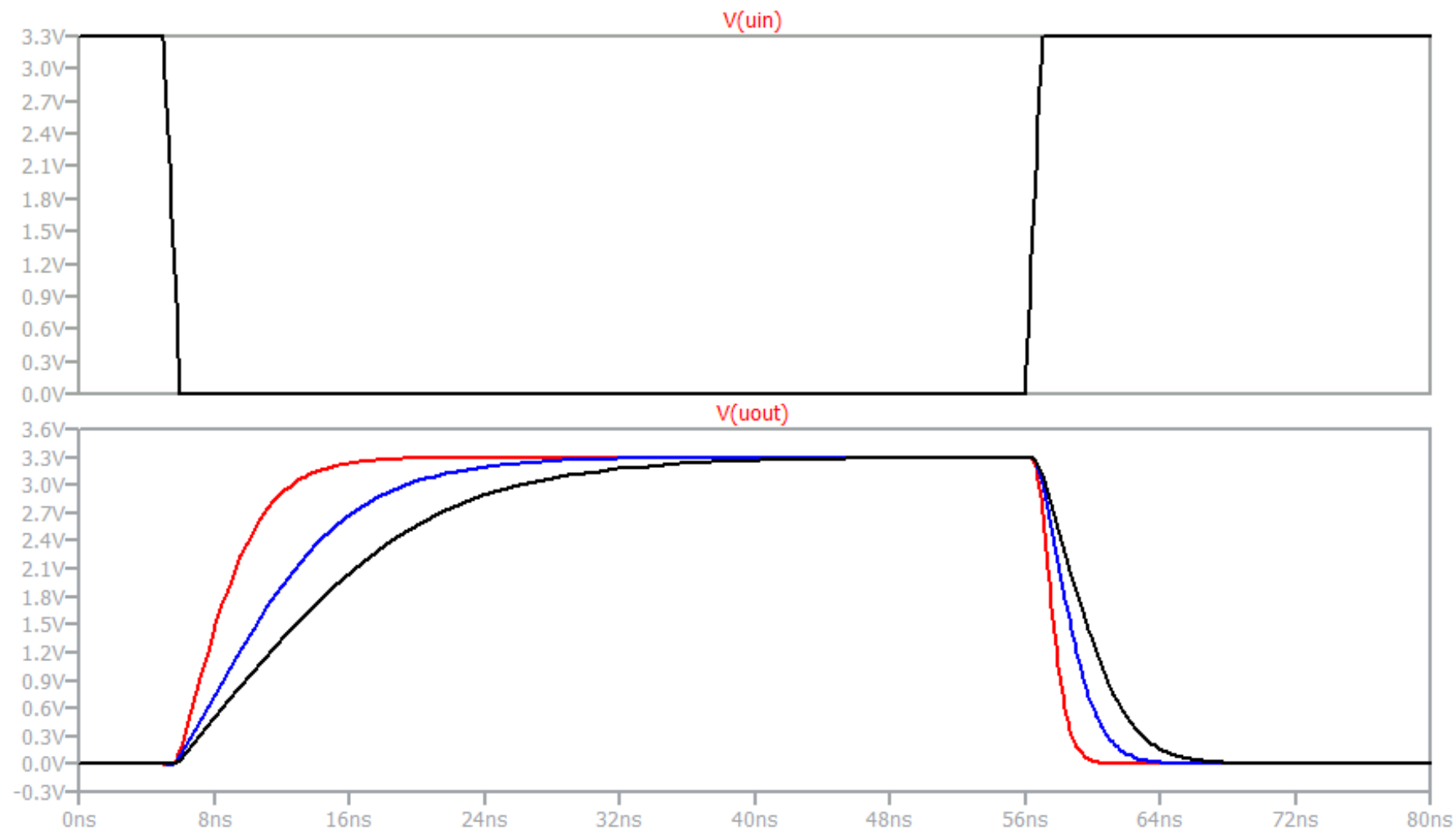
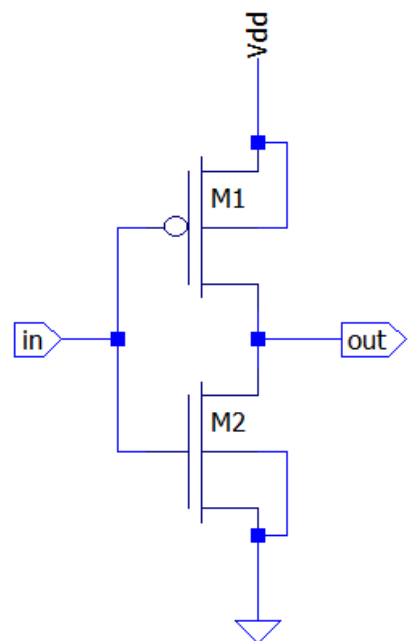
Обикновено тези източници на сигнали не са способни да отдават или приемат достатъчен ток, за да включват и изключват мощен MOSFET за желаното време.

Поради това се добавя схема за управление на гейта, която изпълнява следните задачи:

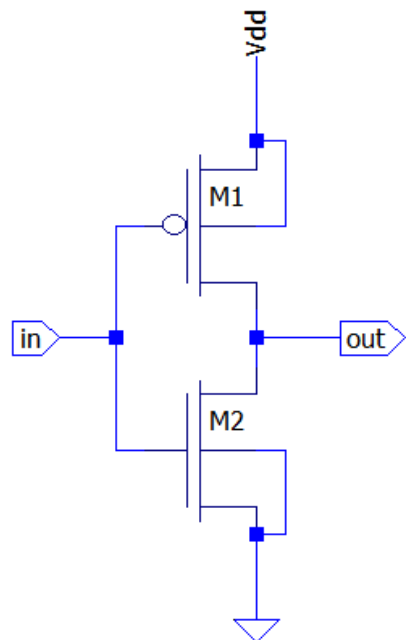
1. Увеличава напрежението до достатъчно високи стойности на U_{gs}
2. Осигурява достатъчно голям ток за зареждане или разреждане на входния капацитет на MOSFET.



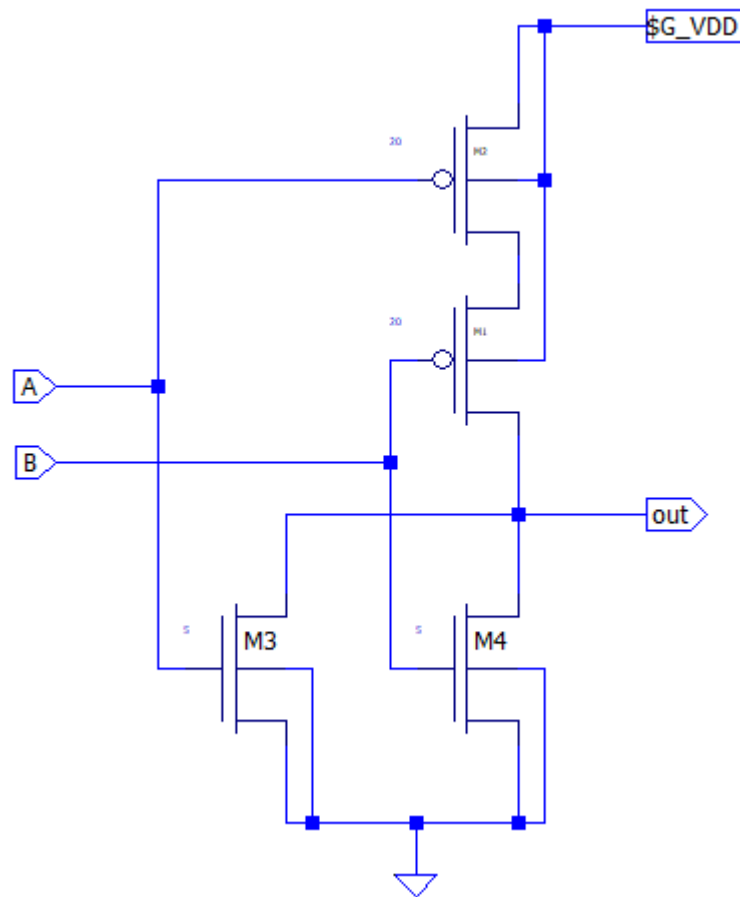
MOSFET в Интегрални Схеми – CMOS



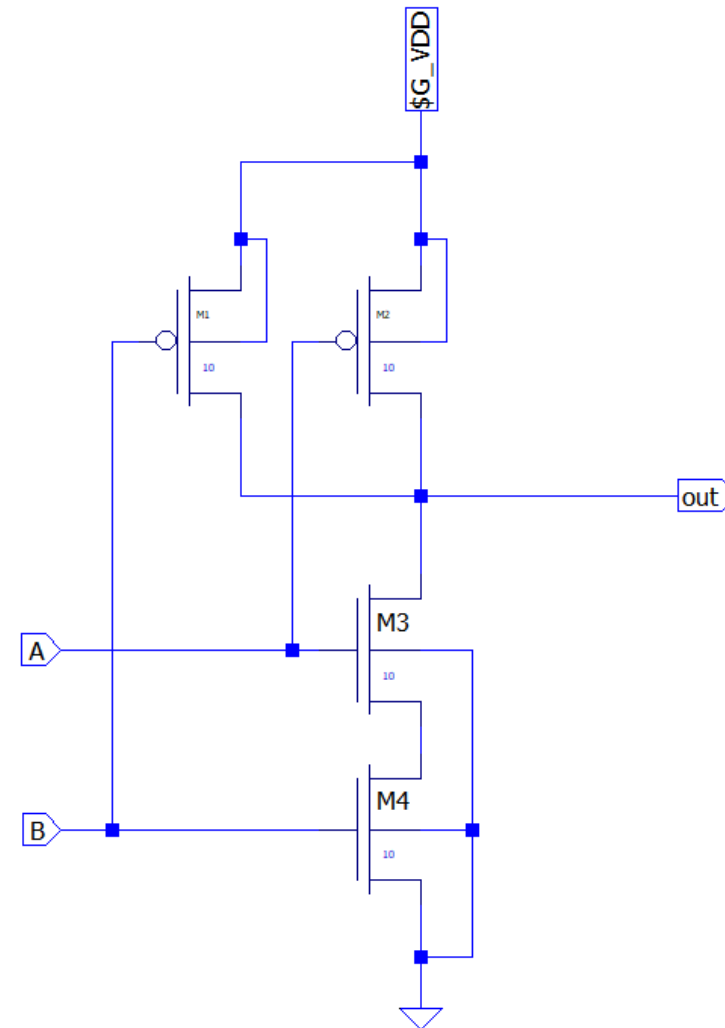
CMOS Логически Елементи



NOT (не)
 $Y = !A$

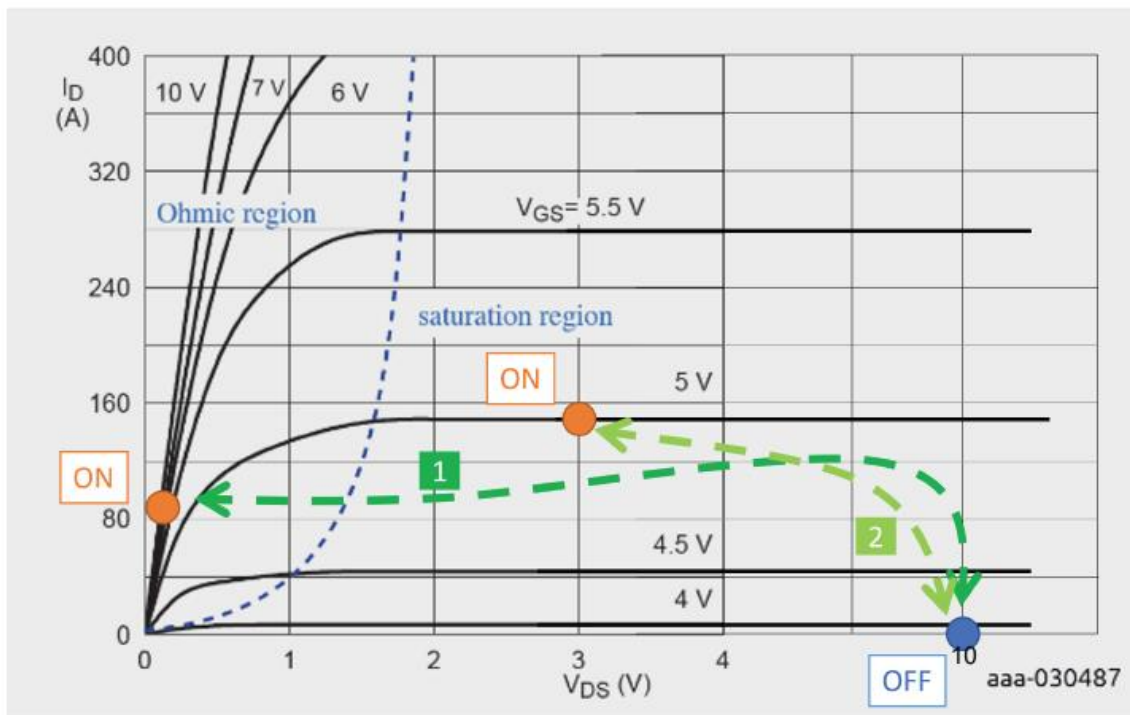


NOR (или – не)
 $Y = !(A + B)$



NAND (и – не)
 $Y = !(A \cdot B)$

Приложения на MOS Транзисторите
Линеен режим



[1] R_{DSon} operation ON/OFF trajectory; [2] linear mode operation ON/OFF trajectory

Example of MOSFET output characteristic: ON/OFF trajectories

For the given input signal, the MOSFET can't be fully switched on due to the low gate driver voltage. The gate voltage will be above the gate threshold voltage but the MOSFET is working in linear mode in order to control the voltage applied to the airbag squibs.

airbag application

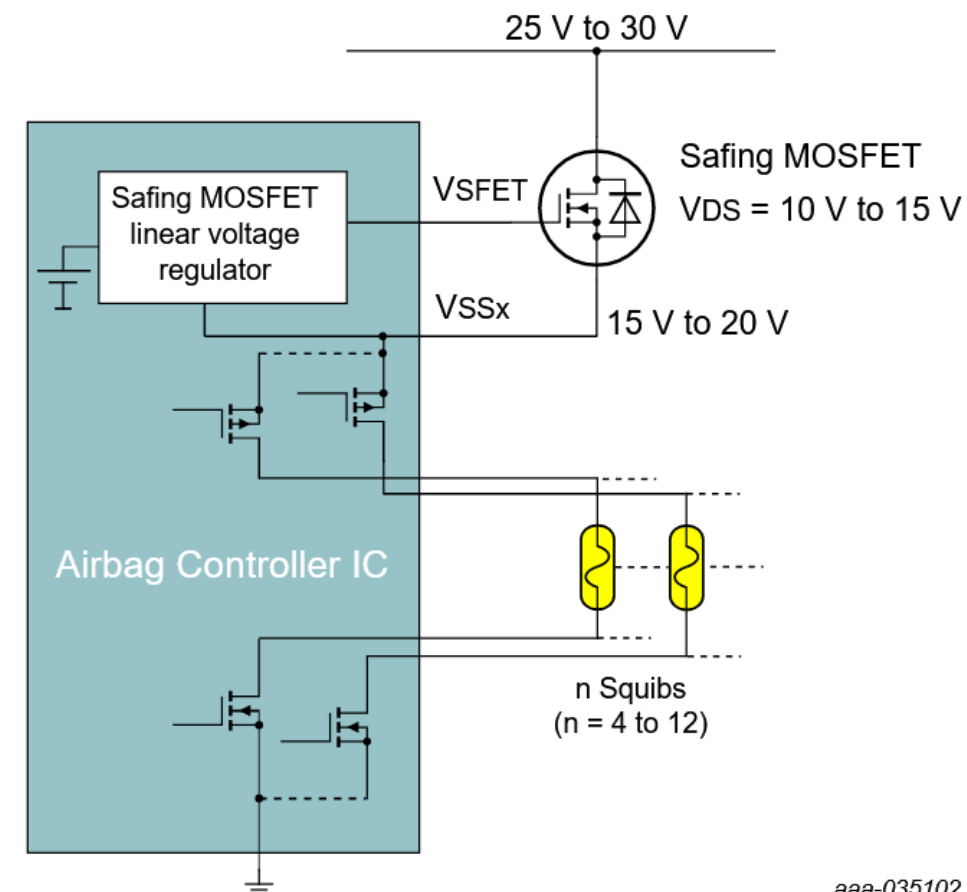


Figure 1. Airbag Squib typical application circuit

aaa-035102

Приложения – Линеен режим – Hot Swap

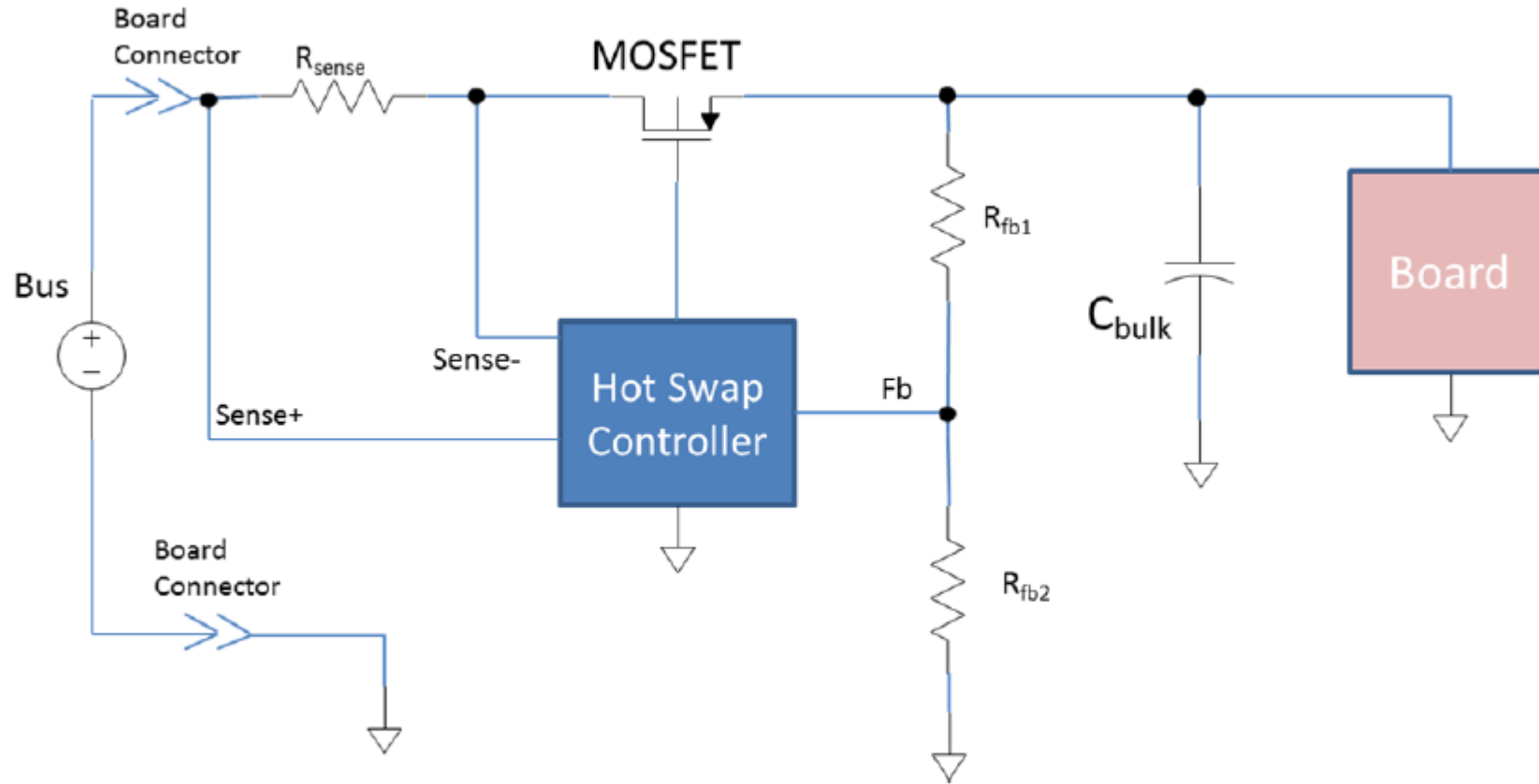
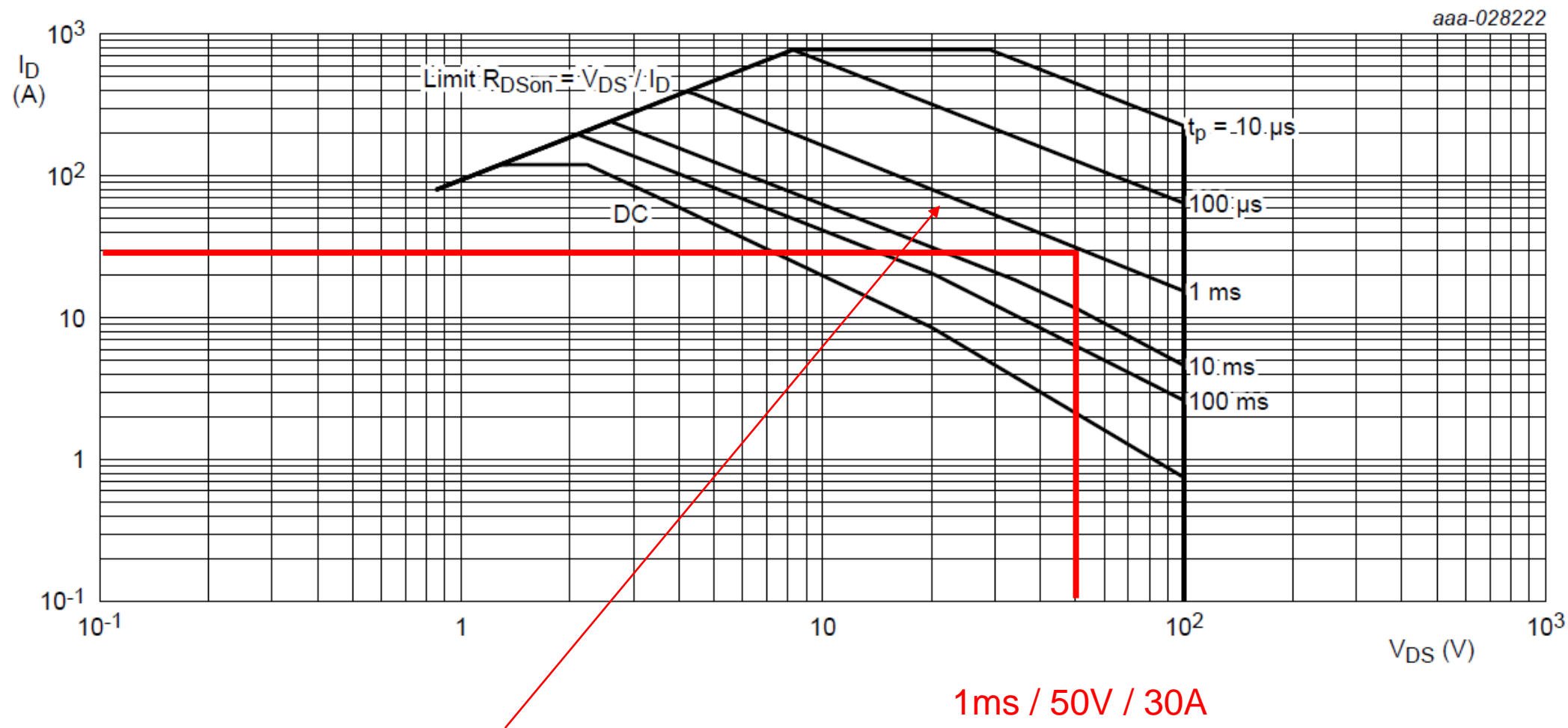


Figure 1 - Generic Hot Swap Circuit

In essence the Hot Swap circuit, which is between the board input rail and the rest of the board's circuitry, is an inrush current limiter that allows for charging of the bulk capacitance in a controlled manner. Also faults, such as over current and overvoltage are managed by Hot Swap circuits.

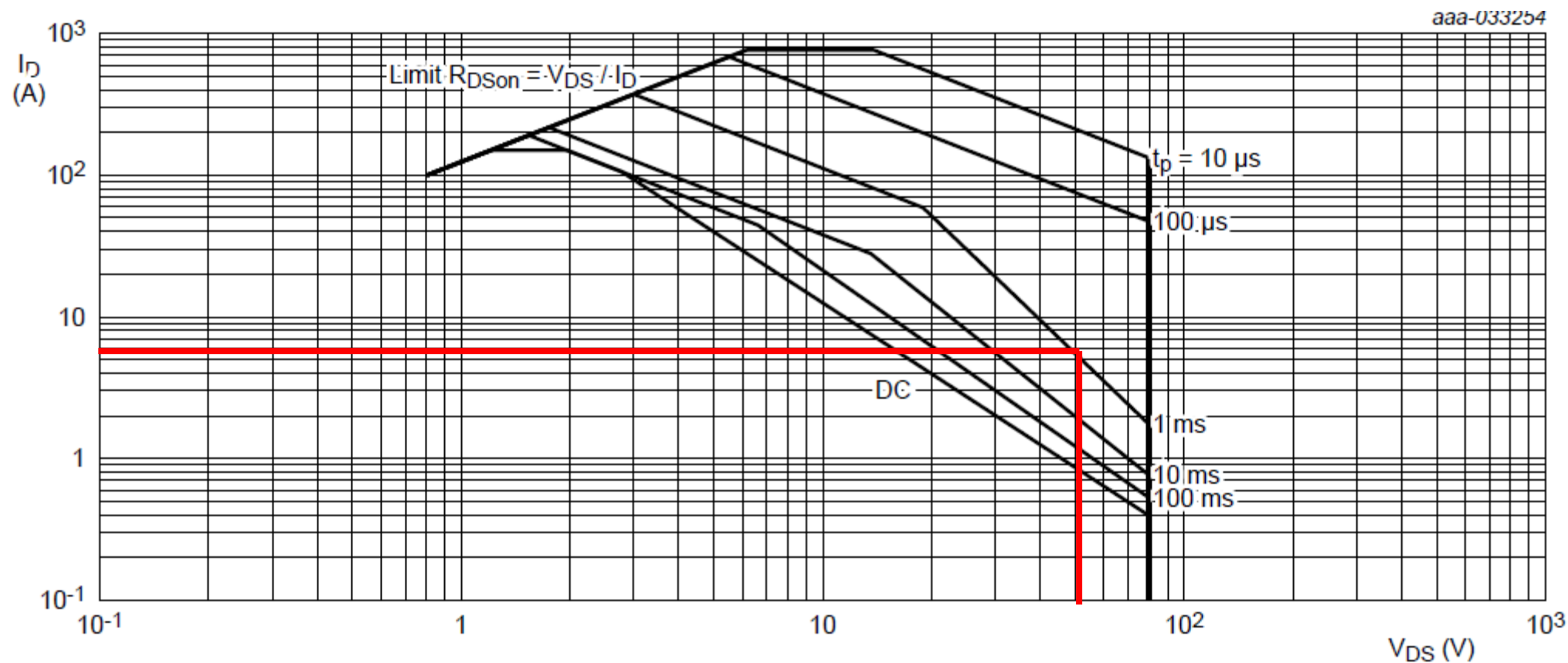
Приложения – Линеен режим

Съществуват модели транзистори, които са специално оптимизирани за работа в линеен режим



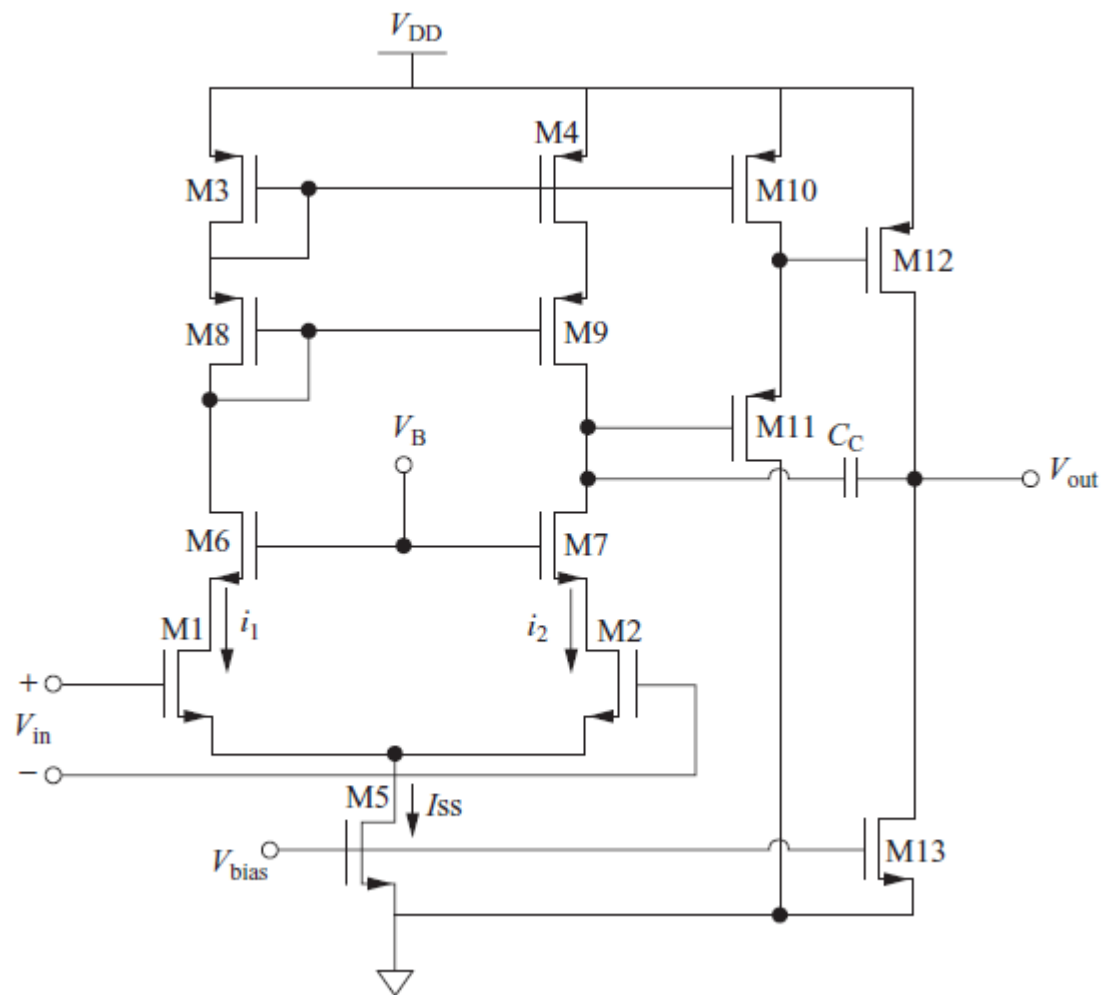
Влиянието на ефекта на Spirito върху SOA е намалено

Сравнение с транзистор със сходни параметри, който не е оптимизиран за линеен режим



1ms / 50V / 6A

Интегрални Схеми – Операционен Усилвател



Други Приложения – Предпазване от обратно включване на автомобилен акумулатор

