



Полеви транзистор

MOSFET - metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

Тема: Мощни MOSFET – Параметри и управление

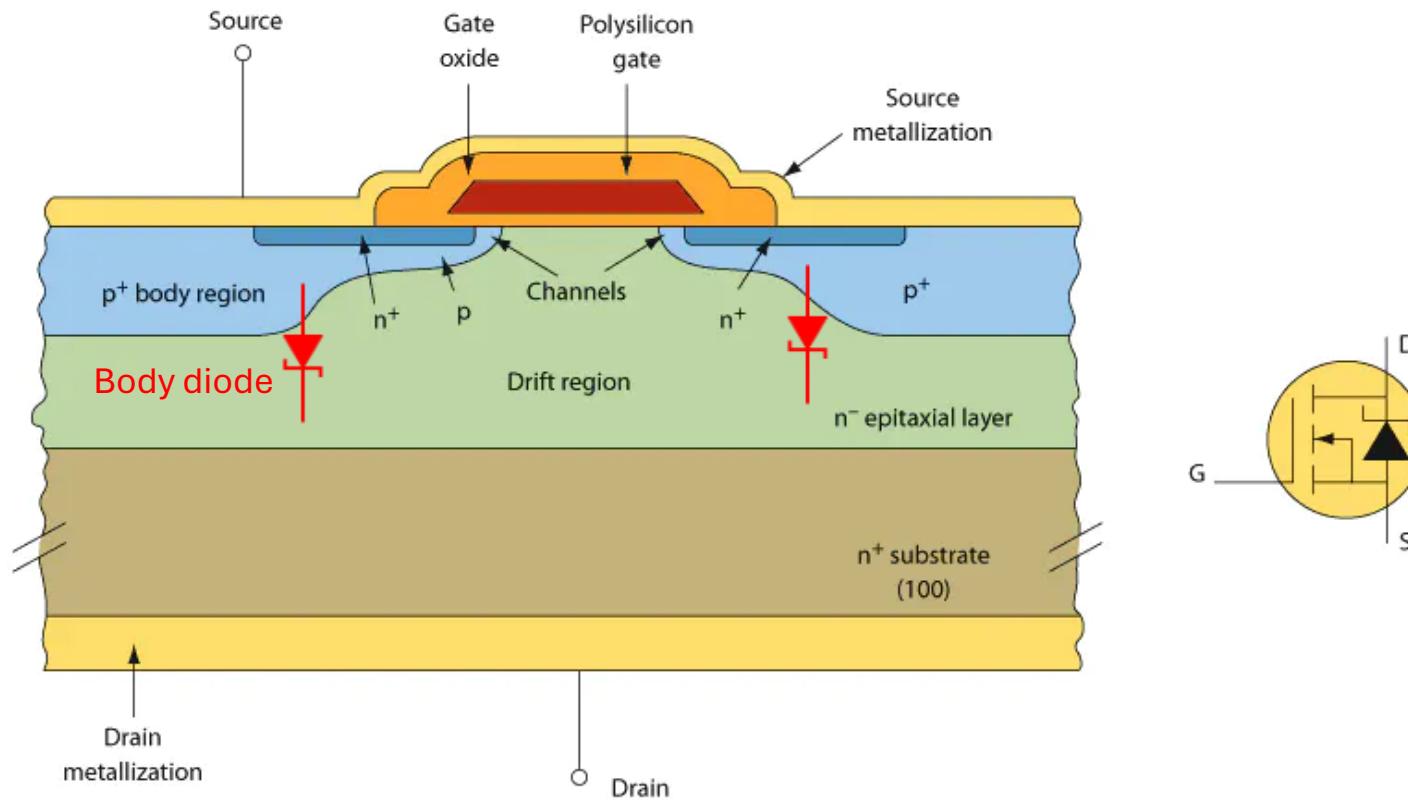
## От латерална към вертикална структура

Миналия път установихме фундаменталната физика на това как работи MOSFET, използвайки прост, плосък „латерален“ модел. Научихме за създаването на канал с напрежение на гейта, по-голямо от праговото напрежение,  $U_{th}$ . Също така идентифицирахме вътрешния диод в тялото.

Проблемът: Тази латерална структура е отлична за малки транзистори в микропроцесор, но е напълно неподходяща за мощни транзистори. Ако се опитаме да пропуснем 10 ампера през нея, тя ще използва огромно количество скъпа силициева площ и ще прегрее незабавно. За да се справим с реална мощност, трябва да изградим устройството по съвсем различен начин.

Решението: Вертикален мощен MOSFET

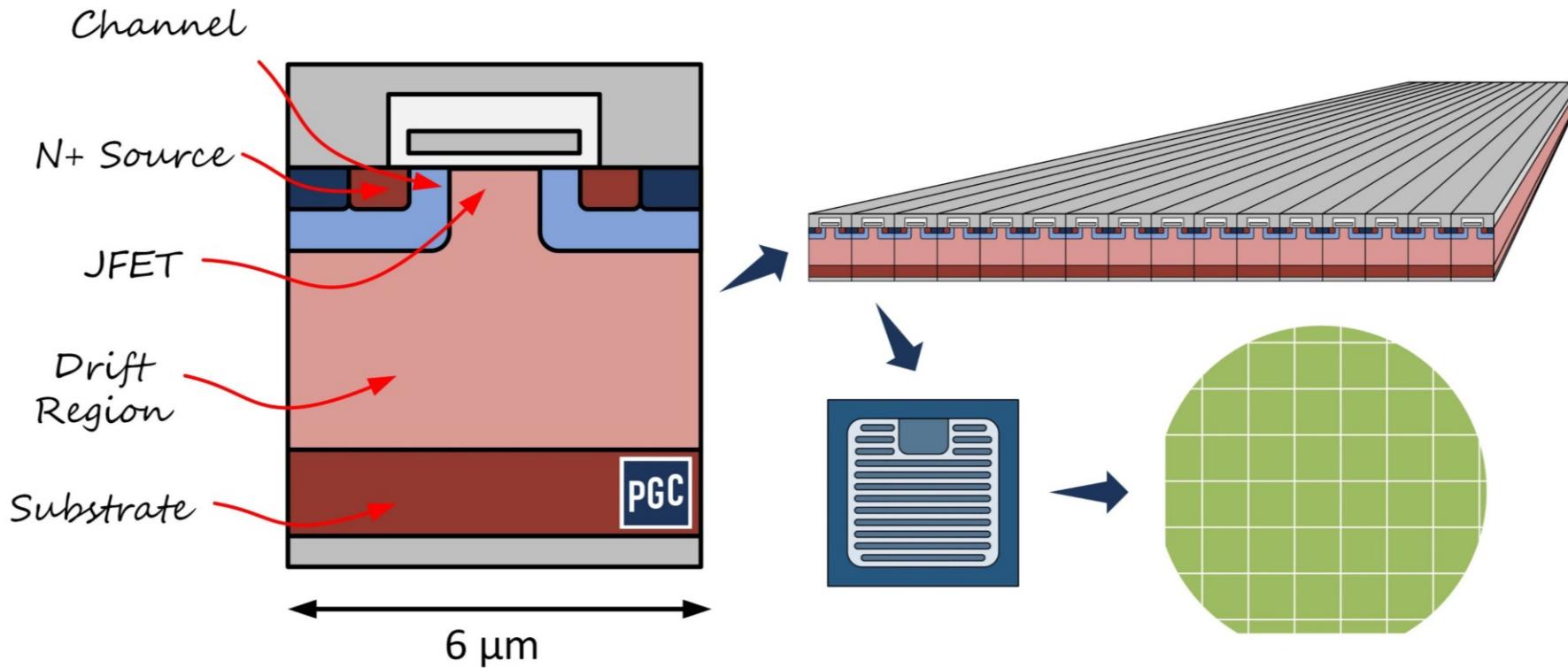
# MOSFET – Структура на вертикален транзистор



Вместо токът да тече странично по повърхността, в мощния MOSFET, той тече вертикално през чипа.

The **Source** contact is a large metal plate on the top surface. The **Drain** contact is a metal plate covering the entire bottom surface of the chip. The current path goes down from the source, turns horizontally to pass through the channel under the gate, and then flows vertically down to the drain. Сорс контактът е голяма метална пластина на горната повърхност. Дрейнът е метална пластина, покриваща цялата долната повърхност на чипа. Пътят на тока слизга от сорса, завива хоризонтално, за да премине през канала под гейта, и след това тече вертикално надолу към дрейна.

# Многоклетъчният подход



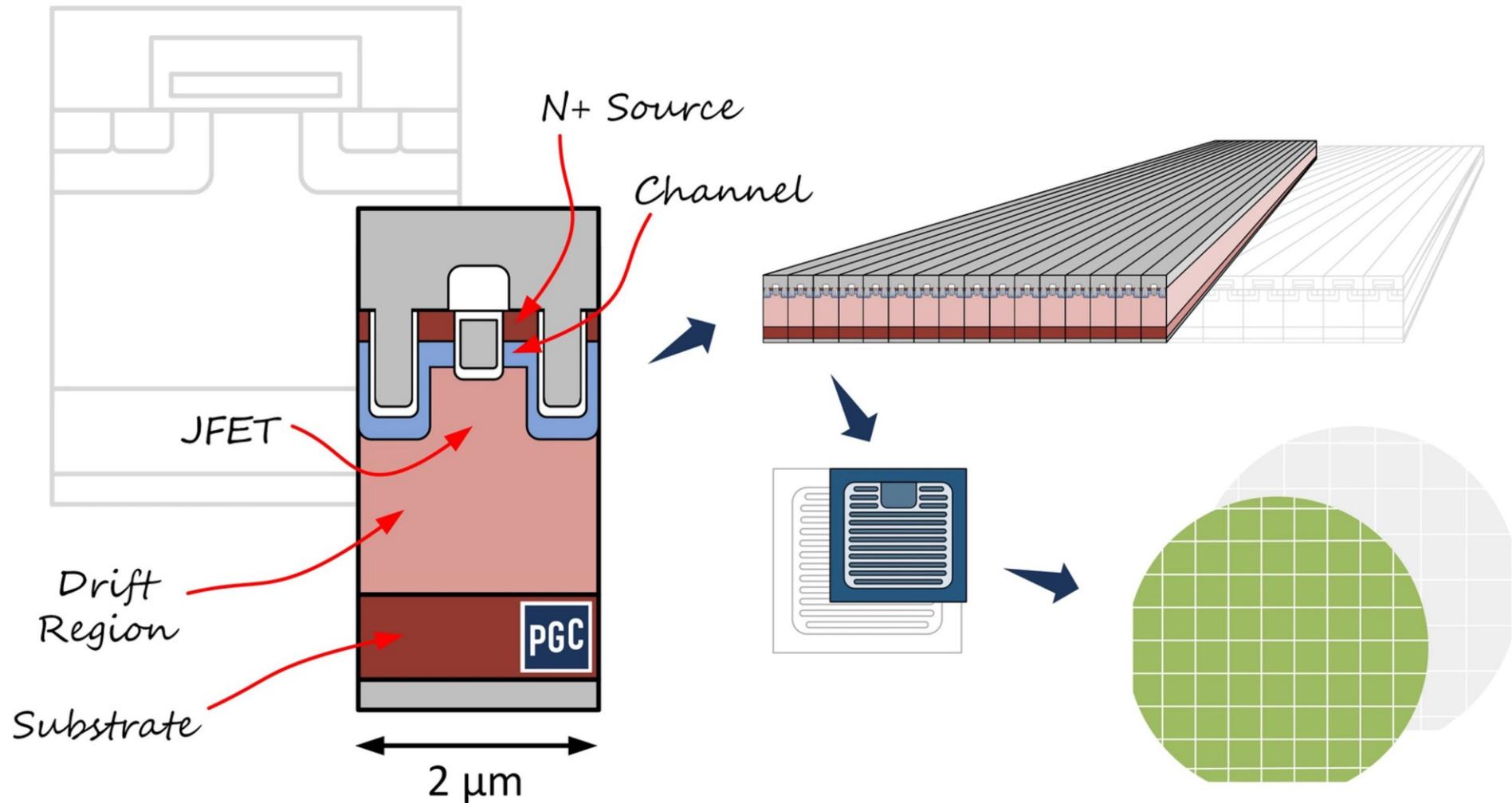
**PGC Consultancy Ltd**  
Take a deep dive into the SiC industry

[www.pgcconsultancy.com](http://www.pgcconsultancy.com) | © PGC Consultancy Ltd 2024

Ключът към постигането на висок токов капацитет е массивната паралелизация. Ние не изграждаме един огромен транзистор; ние произвеждаме хиляди или дори милиони еднакви микроскопични MOSFET „клетки“ върху един силициев кристал.

Всяка клетка е завършен, малък MOSFET. Всички те споделят общ гейт връзка и общ дрейн връзка (подложката). Сорс металът отгоре свързва всички отделни сорсове на клетките заедно.

# Trench MOSFET Device Design



# Ключовият показател за ефективност

Когато MOSFET-а е напълно включен, искаме той да бъде перфектен проводник с нулево съпротивление. В действителност, всяка част от този вертикален път – от металния сорс, през канала, надолу до дрейна – има малко съпротивление. Сумата от всички тези малки съпротивления е съпротивлението във включено състояние или  $R_{ds(on)}$ .

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

За мощен ключ,  $R_{ds(on)}$  е най-важният показател. Той определя ефективността на вашата система. Цялата мощност, която се губи като топлина, когато ключът е напълно включен (conduction power loss), се изчислява по формулата:

$$P_d = I_d^2 * R_{ds(on)}$$

Удвояването на тока означава четири пъти по-голяма загуба на мощност.

Следователно, вашата задача номер едно като инженер, избиращ MOSFET, често е да намерите такъв с възможно най-нисък  $R_{ds(on)}$ , който отговаря на вашите изисквания за напрежение.

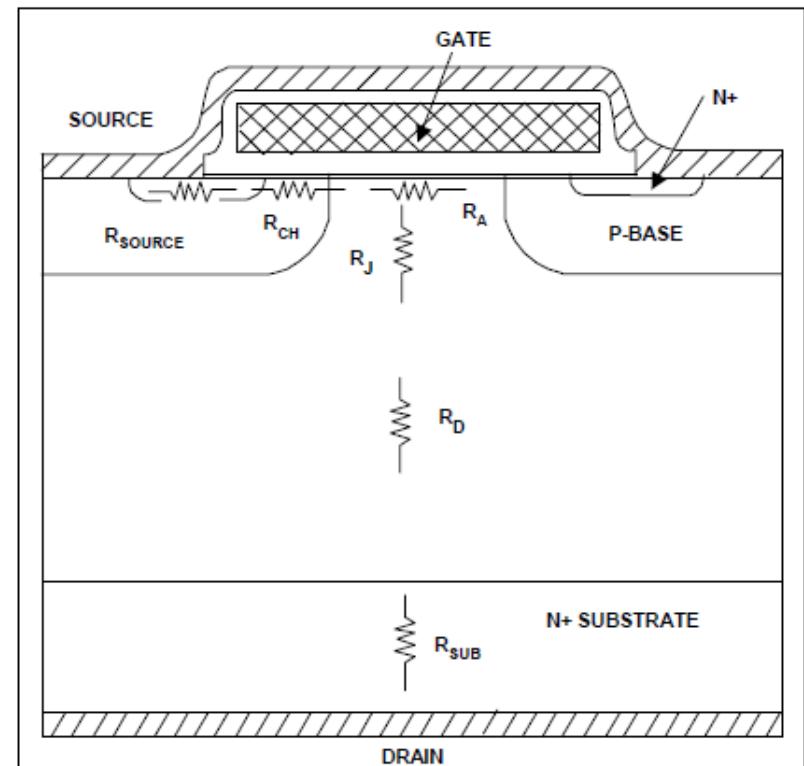


Figure 8. Origin of Internal Resistance in a Power MOSFET.

# Най-важната графика

Това ни води до най-често срещаната и опасна грешка, която един начинаещ може да направи.  
Как да постигнем това ниското  $R_{DS(on)}$  рекламирано в техническите данни на транзистора?

В каталога е посочено, че праговото напрежение  $U_{GS(th)}$  е например между 2,2 V и 3,7 V. Може би си мислите, че прилагането на 5 V към гейта е достатъчно, за да го включите напълно. Нека разгледаме графиката.

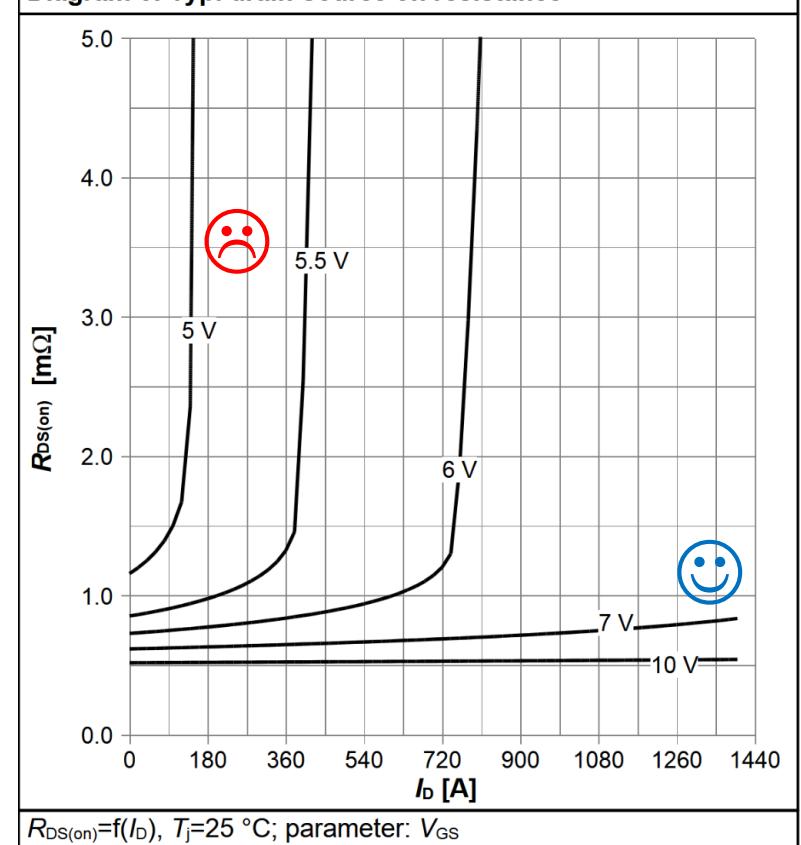
При  $U_{GS} = 5V$ ,  $R_{DS(on)}$  е все още много високо! Транзисторът е във високо съпротивление. Ако сега пропуснете голям ток през него, той ще изгори.

Сега погледнете графиката за  $U_{GS} = 10V$ . Кривата се е изравnilа. Съпротивлението е спаднало до абсолютната си минимална стойност. Това е областта, където транзисторът е наистина „включен“.

**Table 4 Static characteristics**

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

**Diagram 6: Typ. drain-source on resistance**

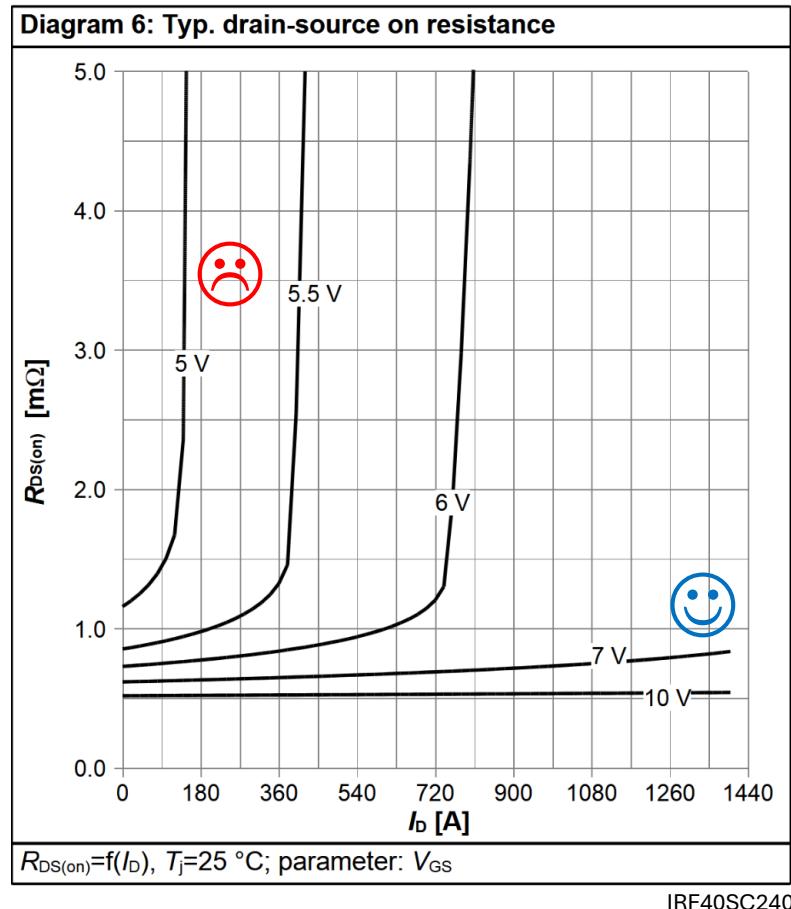


# The Golden Rule of Driving MOSFETs

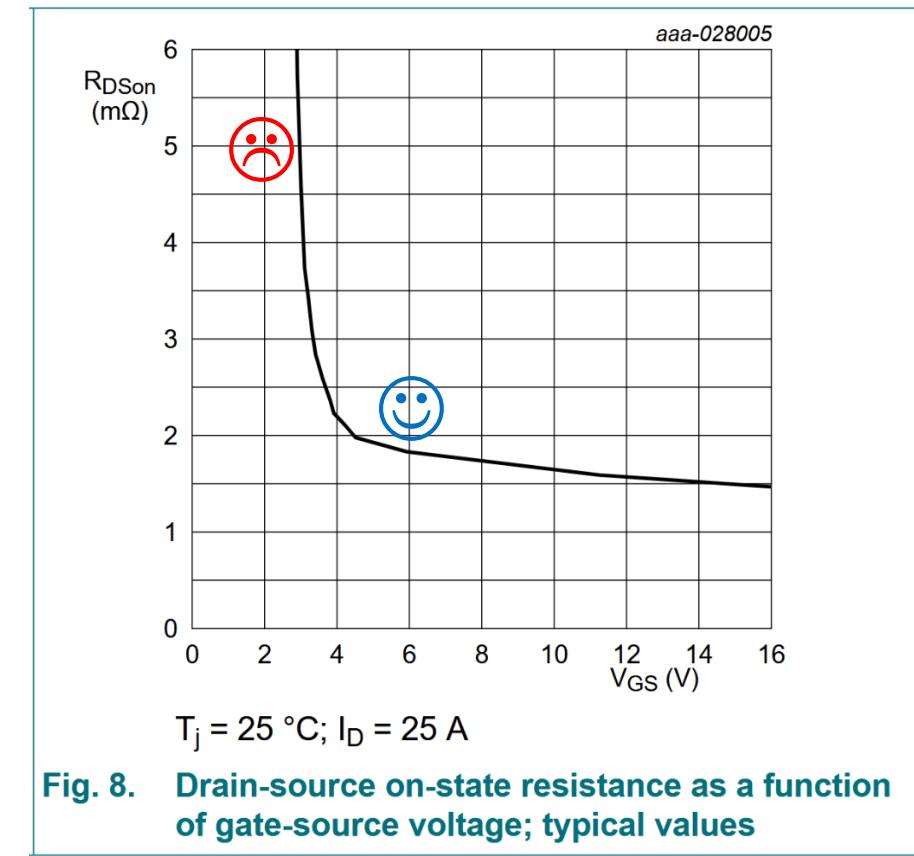
НЕ е достатъчно да подадете  $U_{GS}$  >  $U_{GS(th)}$ , за да включите напълно мощн MOSFET. Трябва да подадете достатъчно високо напрежение на гейта, за да постигнете номиналния  $R_{DS(on)}$ .

За стандартни мощн MOSFET това напрежение обикновено е +10V. За MOSFET с „логическо ниво“, предназначени за микроконтролери, това може да е 4,5V или 5V. Винаги трябва да проверявате графиката в каталога.

standard power MOSFET



logic level MOSFET



# The Golden Rule of Driving MOSFETs

Ако в каталога няма графика  $R_{DS(on)} = f(U_{GS})$ , проверете табличните данни.

Ако стойността на  $R_{DS(on)}$  е дадена само за  $U_{GS}=10V$ , това е стандартен MOSFET и не може да го управлявате с логическо ниво.

## Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	100	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu\text{A}$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.12	—	V/ $^\circ\text{C}$	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	44	$\text{m}\Omega$	$V_{GS} = 10V, I_D = 16\text{A}$ ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu\text{A}$
$g_{fs}$	Forward Transconductance	21	—	—	S	$V_{DS} = 50\text{V}, I_D = 16\text{A}$ ④
$I_{DSS}$	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	$\mu\text{A}$	$V_{DS} = 100\text{V}, V_{GS} = 0V$
		—	—	250	$\mu\text{A}$	$V_{DS} = 80\text{V}, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
$I_{GSS}$	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20\text{V}$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	$V_{GS} = -20\text{V}$
$Q_g$	Total Gate Charge	—	—	71	nC	$I_D = 16\text{A}$
$Q_{gs}$	Gate-to-Source Charge	—	—	14	nC	$V_{DS} = 80\text{V}$
$Q_{gd}$	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	21	nC	$V_{GS} = 10\text{V}$ , See Fig. 6 and 13

IRF40SC240

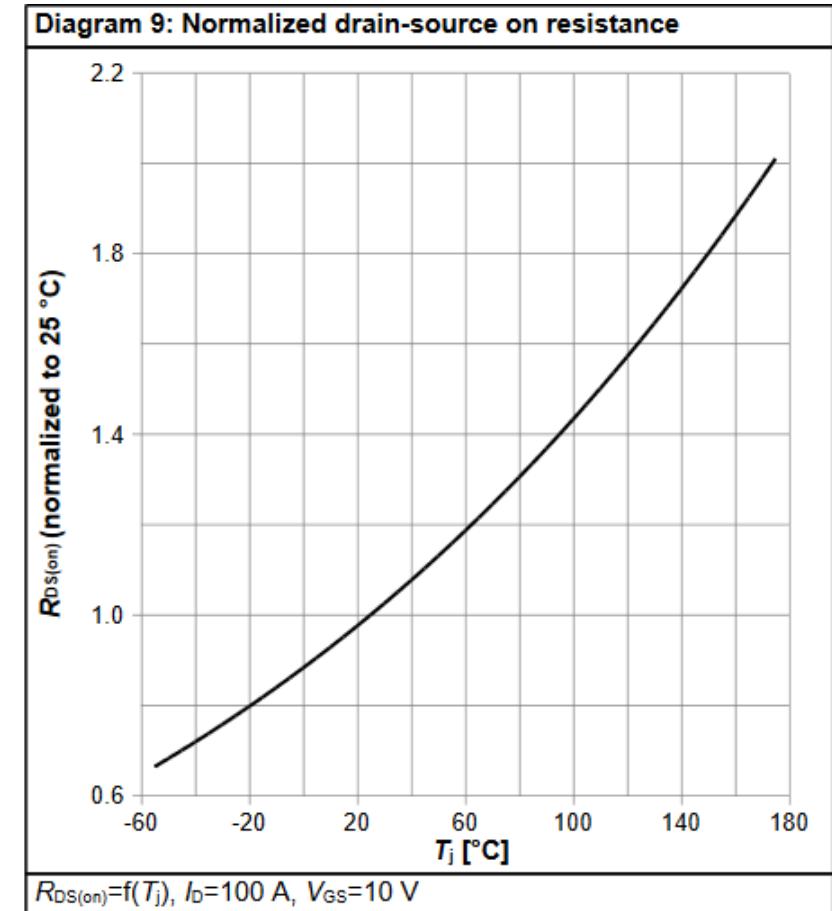
Table 1. Quick reference data

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
$V_{DS}$	drain-source voltage	$25^\circ\text{C} \leq T_j \leq 175^\circ\text{C}$	-	-	30	V
$I_D$	drain current	$V_{GS} = 10\text{V}; T_{mb} = 25^\circ\text{C}$ ; Fig. 2	[1]	-	-	A
$P_{tot}$	total power dissipation	$T_{mb} = 25^\circ\text{C}$ ; Fig. 1	-	-	106	W
$T_j$	junction temperature		-55	-	175	$^\circ\text{C}$
<b>Static characteristics</b>						
$R_{DSon}$	drain-source on-state resistance	$V_{GS} = 10\text{V}; I_D = 25\text{A}; T_j = 25^\circ\text{C}$ ; Fig. 10	-	1.6	1.9	$\text{m}\Omega$
		$V_{GS} = 4.5\text{V}; I_D = 25\text{A}; T_j = 25^\circ\text{C}$ ; Fig. 10	-	2	2.6	$\text{m}\Omega$
<b>Dynamic characteristics</b>						
$Q_{GD}$	gate-drain charge	$I_D = 25\text{A}; V_{DS} = 15\text{V}; V_{GS} = 4.5\text{V}$ ; Fig. 12; Fig. 13	1.3	7	14	nC

PSMN1R6-30MLH

## Rds(on) – Зависимост от температурата

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



# Обобщение

Научихме, че мощните MOSFET транзистори не са плоски, а са изградени от милиони паралелни вертикални клетки, за да се справят с висок ток.

Определихме  $R_{ds(on)}$  като най-важния параметър за ефективен ключ, тъй като той определя загубите във включено състояние (conduction power loss).

Научихме най-важния урок от каталожните данни: за да получим най-ниското  $R_{ds(on)}$ , трябва да управяваме гейта с напрежение ( $U_{gs}$ ) далеч над праговото  $U_{gs(th)}$ , обикновено +10V, както е показано на характеристичната крива  $R_{ds(on)}$  спрямо  $U_{gs}$ .

Днес разгледахме състоянието „включено“. Но самото прилагане на 10V към гейта не е тривиално. Гейтът действа като кондензатор. Следващия път ще разгледаме процеса на включване и изключване на MOSFET ключа – капацитета на гейта, заряда на гейта и мощните драйверни схеми, необходими за преодоляването им.