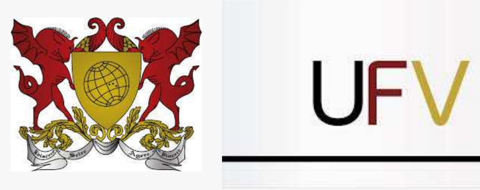
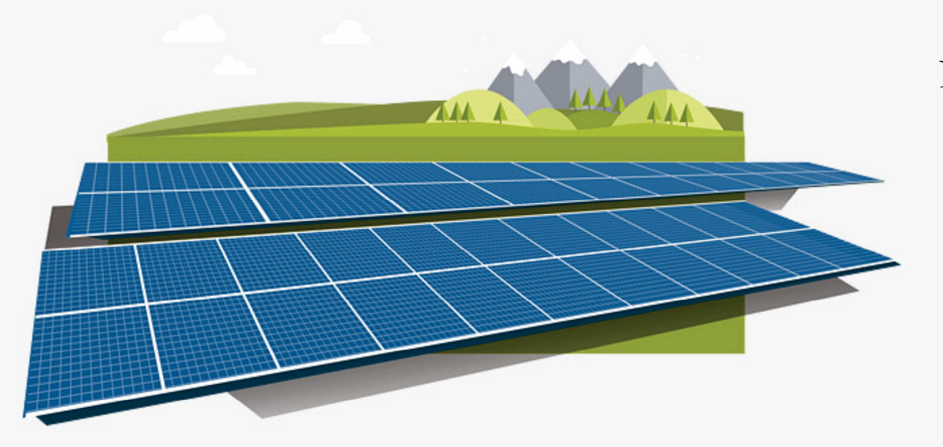


Eletrônica de Potência

Aula 04 – Transistores de potência

Prof. Heverton Augusto Pereira
heverton.pereira@ufv.br

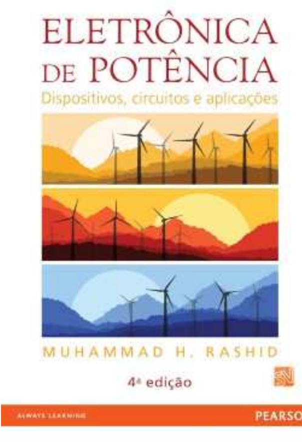


Introdução

		Tópicos
01	-	Introdução
02	-	Diodos de potência e circuitos RLC chaveados
03	-	Retificadores com diodos
04	-	Transistores de potência
05		Conversores CC-CC
06		Tiristores
07		Retificadores controlados
08	-	Conversores CC-CA
09	-	Controladores de tensão CA
10	-	Inversores de pulso ressonante

Capítulo 4 do Livro

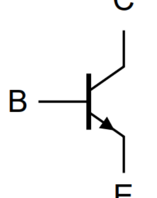
M. H. Rashid: Eletrônica de Potência: Dispositivos, circuitos e aplicações. 4ª. Edição, Pearson, 2014

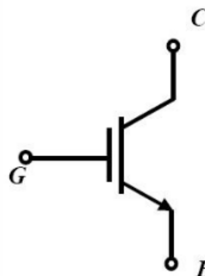


Introdução

Transistores de potência podem ser classificados em cinco categorias:

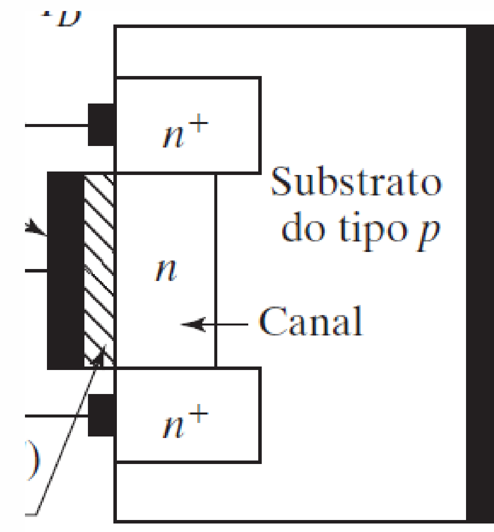
- MOSFETs — transistores de efeito de campo de óxido metálico semicondutor.
- COOLMOS.
- BJTs — transistores bipolares de junção.
- IGBTs — transistores bipolares de porta isolada.
- SITs — transistores de indução estática.





https://www.onsemi.com/pub/Collateral/TND6245-D.PDF

MOSFETs de potência



- Um MOSFET de potência é um dispositivo controlado por tensão e que requer apenas uma pequena corrente de entrada.

- Os dois tipos de MOSFET são: (1) depleção e (2) intensificação.

- Um MOSFET tipo depleção de canal n é formado sobre um substrato de silício do tipo p com duas seções de silício fortemente dopadas n+, para conexões de baixa resistência.

- Um MOSFET tipo intensificação de canal n não possui canal físico.

MOSFETs de potência

- MOSFET tipo depleção de canal n:

canal n

Estrutura básica

Símbolo

MOSFETs de potência

- MOSFET tipo depleção de canal *p*:

MOSFETs de potência

- MOSFET tipo intensificação de canal n:

canal n

Estrutura básica

Símbolo

MOSFETs de potência

- MOSFET tipo intensificação de canal p:

V_T V_{GS} 0 $-i_D$

canal p

I_D Substrato metálico D Metal G V_{GS} S Óxido p^+ p^+ Substrato do tipo n R_D V_{DD}

Estrutura básica

G D S V_{GS} V_{DS} R_D V_{DD}

Símbolo

Características em regime permanente

- Características de saída do MOSFET tipo intensificação:

Região de pinçamento ou de saturação

Região linear

$V_{GS4} > V_{GS3} > V_{GS2} > V_{GS1} > V_T$

I_D

$\frac{V_{DD}}{R_D}$

I_D

V_{GS4}

V_{GS3}

$V_{DS} = V_{GS} - V_T$

V_{GS2}

V_{GS1}

$V_{GS} = V_T$

0

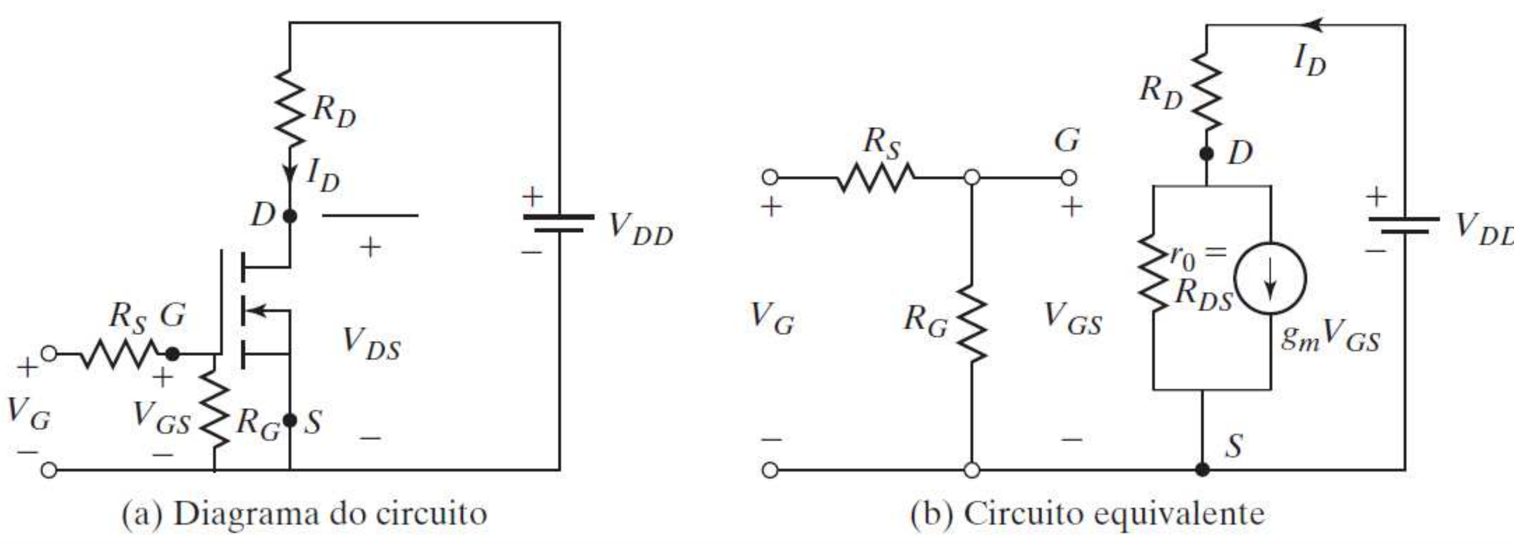
V_{DS}

V_{DD}

V_{DS}

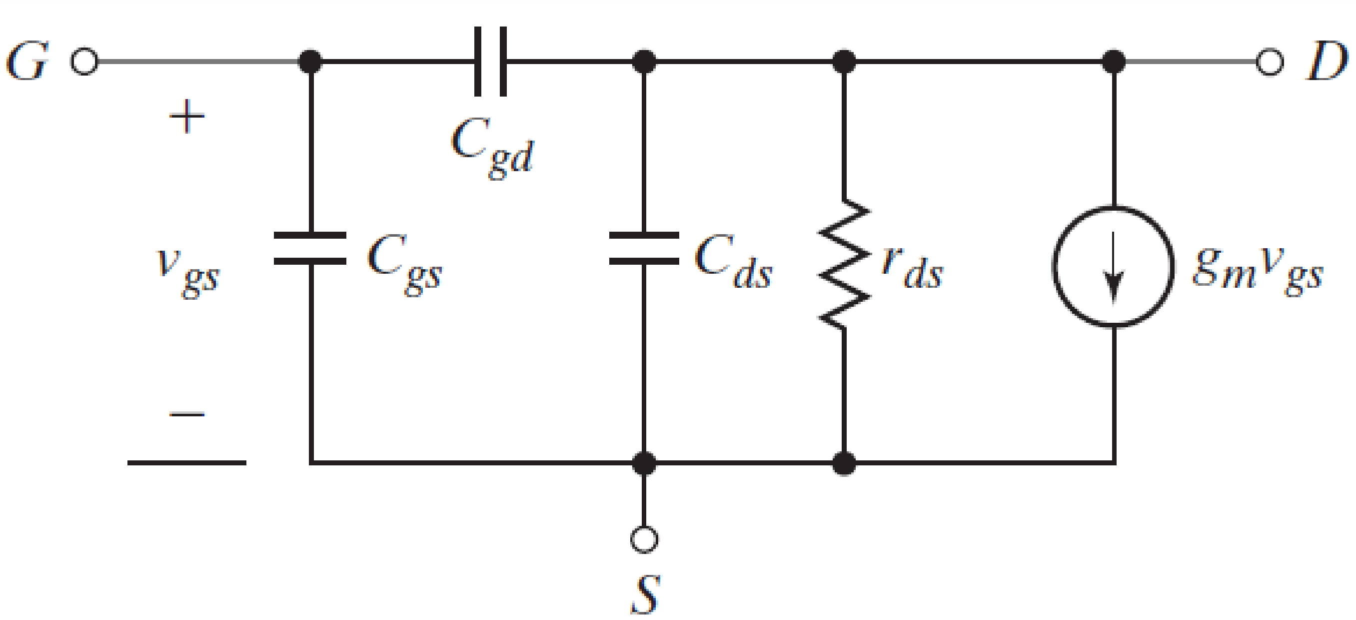
Características de chaveamento

- Modelo de chaveamento em regime permanente dos MOSFETs:



Características de chaveamento

- Modelo de chaveamento dos MOSFETs:



Características de chaveamento

- Formas de onda e tempos de chaveamento:

MOSFETs de carbeto de silício

- A tecnologia SiC passou por avanços significativos que agora permitem a fabricação de MOSFETs capazes de superar o IGBT Si, em especial em alta potência e altas temperaturas.

- A nova geração de MOSFETs SiC reduz a espessura da camada de arraste (drift) por cerca de um fator de 10, enquanto possibilita que o fator de dopagem aumente simultaneamente na mesma ordem de grandeza.

- O efeito global resulta em uma redução da resistência de arraste a um centésimo da resistência do MOSFET equivalente em silício.

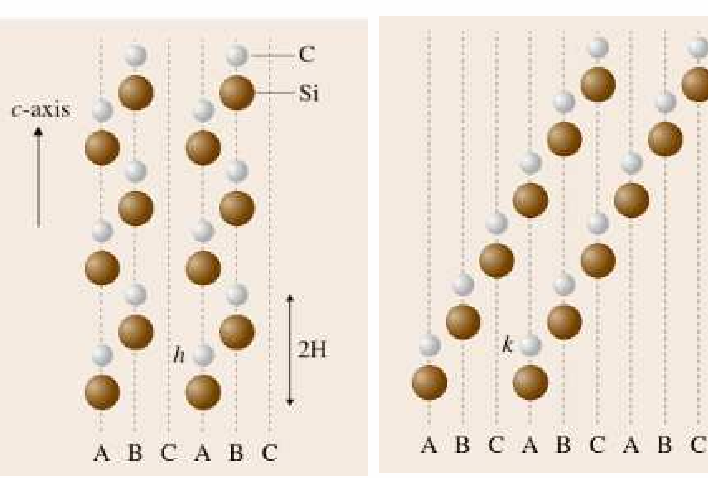
Transistores de carbeto de silício

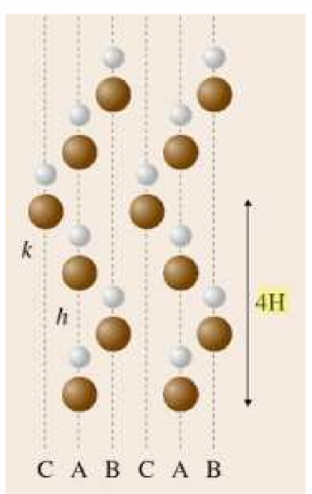
- Propriedades do silício e de materiais semicondutores WBG:

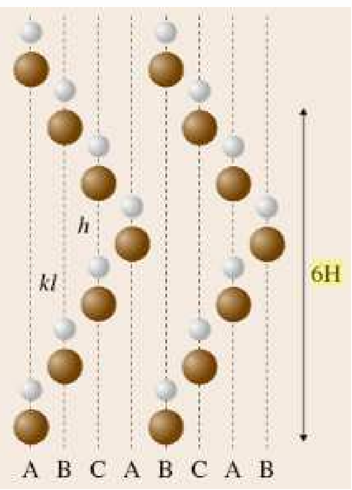
Parâmetro	Si	GaAs	4H-SiC	6H-SiC	3C-SiC	2H-GaN	Diamante
Energia de banda proibida, E_g (eV)	1,1	1,42	3,3	3,0	2,3	3,4	5,5
Campo elétrico crítico, E_c (MV/cm)	0,25	0,6	2,2	3	1,8	3	10
Velocidade de arraste dos elétrons, *vsat* (cm/s)	1×10^7	$1{,}2 \times 10^7$	2×10^7	2×10^7	$2{,}5 \times 10^7$	$2{,}2 \times 10^7$	$2{,}7 \times 10^7$
Condutividade térmica, λ (W/cm-K)	1,5	0,5	4,9	4,9	4,9	1,3	22

Transistores de carbeto de silício

Parâmetro	Si	GaAs	4H-SiC	6H-SiC	3C-SiC	2H-GaN	Diamante
Energia de banda proibida, E_g (eV)	1,1	1,42	3,3	3,0	2,3	3,4	5,5
Campo elétrico crítico, E_c (MV/cm)	0,25	0,6	2,2	3	1,8	3	10
Velocidade de arraste dos elétrons, *vsat* (cm/s)	1×10^7	$1,2 \times 10^7$	2×10^7	2×10^7	$2,5 \times 10^7$	$2,2 \times 10^7$	$2,7 \times 10^7$
Condutividade térmica, λ (W/cm-K)	1,5	0,5	4,9	4,9	4,9	1,3	22







Fonte: Springer Handbook of Crystal Growth, pag. 941

Comparação de Fabricantes

Fabricante		Tecnologia	Preço	V_{ds}	I_d
Infineon	infineon	Si	2,43 US$	800 V	11 A
IXYS	IXYS	Si	15,02 US$	800 V	44 A
Microsemi	Microsemi	Si	20,99 US$	800 V	47 A
STMicroeletronics	ST	Si	12,59 US$	800 V	46 A

Fonte: Trabalho de ELT 313 apresentado no ano de 2017 – Autores:Roberto F. F. Passos, Wesley V. Ribeiro, Camilo C. Gomes, Lucas M. Ávila, Brisa R. Pechincha

SiC x Si

Fabricante	Tecnologia	Preço	V_{ds}	I_d
SMPS MOSFET (IRFB5620) International IOR Rectifier	SiC	R$ 11,48	200 V	25 A
Infineon infineon	Si	1,43 US$	200 V	24 A
STMicroeletronics ST	Si	3,24 US$	200 V	30 A
ROHM Semicondutores ROHM SEMICONDUCTOR	Si	1,57 US$	200 V	30 A

Fonte: Trabalho de ELT 313 apresentado no ano de 2017 – Autores:Roberto F. F. Passos, Wesley V. Ribeiro, Camilo C. Gomes, Lucas M. Ávila, Brisa R. Pechincha

SiC x Si

Fabricante	Tecnologia	Preço	V_{ds}	I_d
ROHM Semicondutores	SiC	42,06 US$	650 V	93 A
STMicroeletronics	Si	19,94 US$	650 V	84 A
Microsemi	Si	21,33 US$	650 V	95 A
IXYS	Si	15,65 US$	650 V	80 A
Infineon	Si	14,04 US$	650 V	83,2 A

Fonte: Trabalho de ELT 313 apresentado no ano de 2017 – Autores:Roberto F. F. Passos, Wesley V. Ribeiro, Camilo C. Gomes, Lucas M. Ávila, Brisa R. Pechincha

SiC x Si

- SiC ROHM 650 V 93 A

Parâmetros		Valor	Unidade
V_{GS}		22	V
V_{DS}		650	V
I_D	25ºC	93	A
	100ºC	65	A
Potência Dissipada		339	W
R_{DS}		22	mΩ
Temperatura de Junção		175	ºC
Perdas na Comutação	Ligar	252	µJ
	Desligar	201	µJ

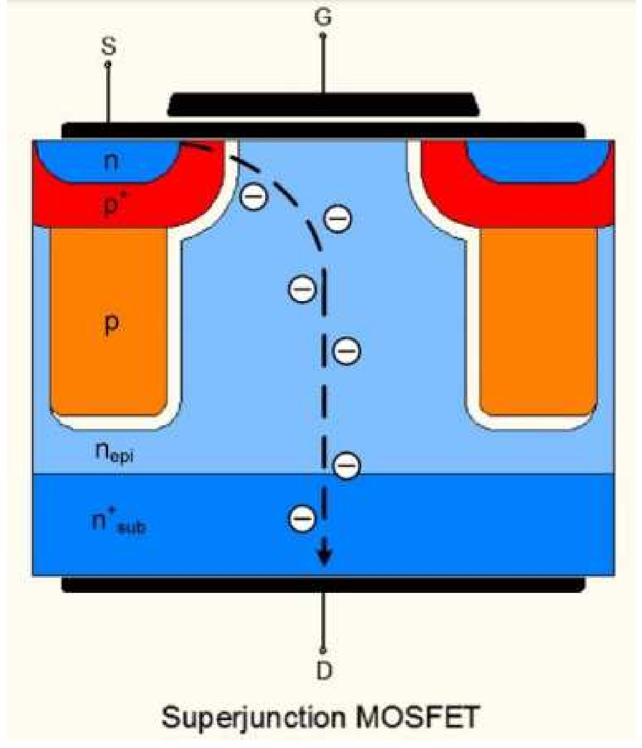
- Si Microsemi 650 V 95 A

Parâmetros		Valor	Unidade
V_{GS}		20	V
V_{DS}		650	V
I_D	25ºC	95	A
	100ºC	61	A
Potência Dissipada		833	W
R_{DS}		35	mΩ
Temperatura de Junção		150	ºC
Perdas na Comutação	Ligar	2916	µJ
	Desligar	3257	µJ

Fonte: Trabalho de ELT 313 apresentado no ano de 2017 – Autores:Roberto F. F. Passos, Wesley V. Ribeiro, Camilo C. Gomes, Lucas M. Ávila, Brisa R. Pechincha

COOLMOS

- O COOLMOS, que é uma nova tecnologia para MOSFETs de alta tensão.
- Estrutura de compensação na região vertical de arraste do MOSFET para melhorar a resistência em condução.



Fonte:https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_500V_CoolMOS_CE-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=db3a304336ca04c90136ea3a92e736f6

Comparação MOSFET x COOLMOS

S G D n p^+ n_{epi} n^+_{sub}

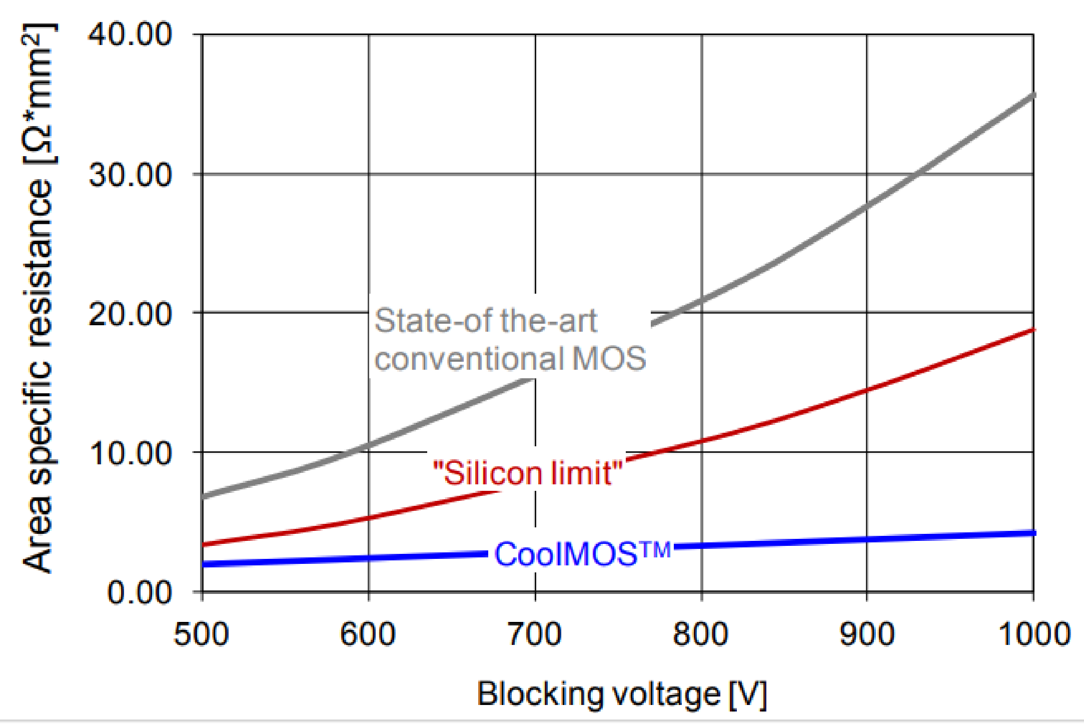
Standard MOSFET

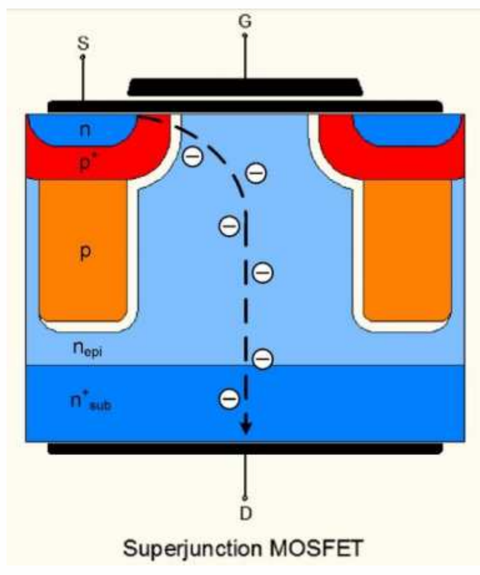
S G D n p^+ p n_{epi} n^+_{sub}

Superjunction MOSFET

Fonte:https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_500V_CoolMOS_CE-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=db3a304336ca04c90136ea3a92e736f6

COOLMOS

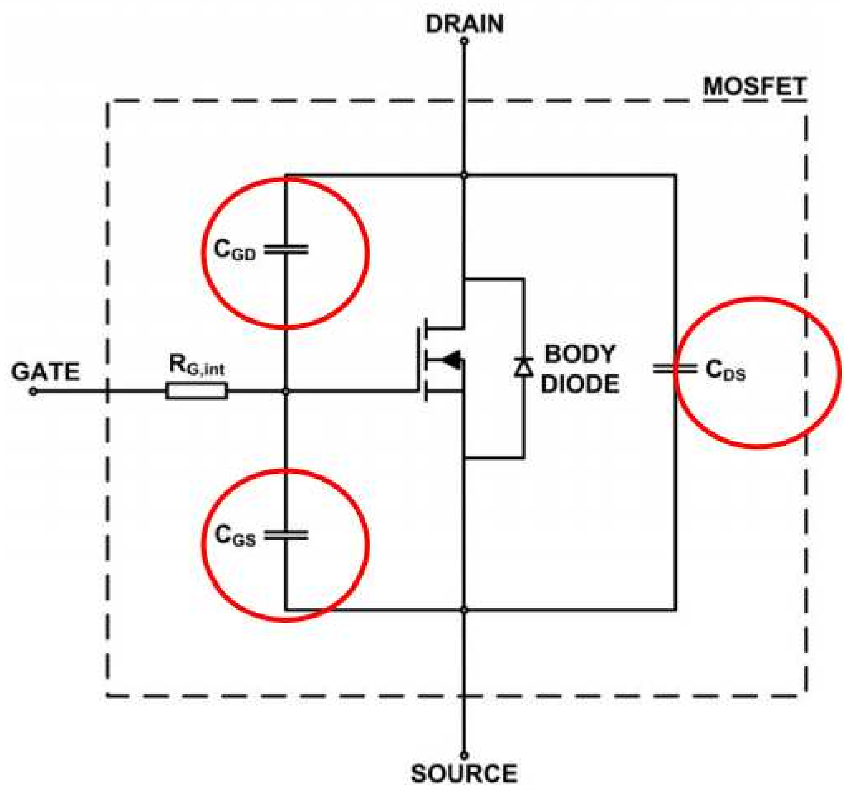


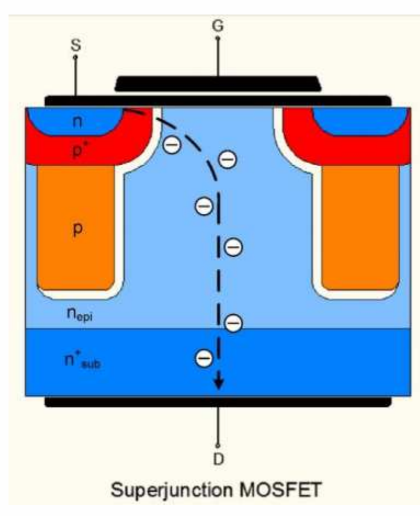


Superjunction MOSFET

Fonte:https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_500V_CoolMOS_CE-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=db3a304336ca04c90136ea3a92e736f6

COOLMOS

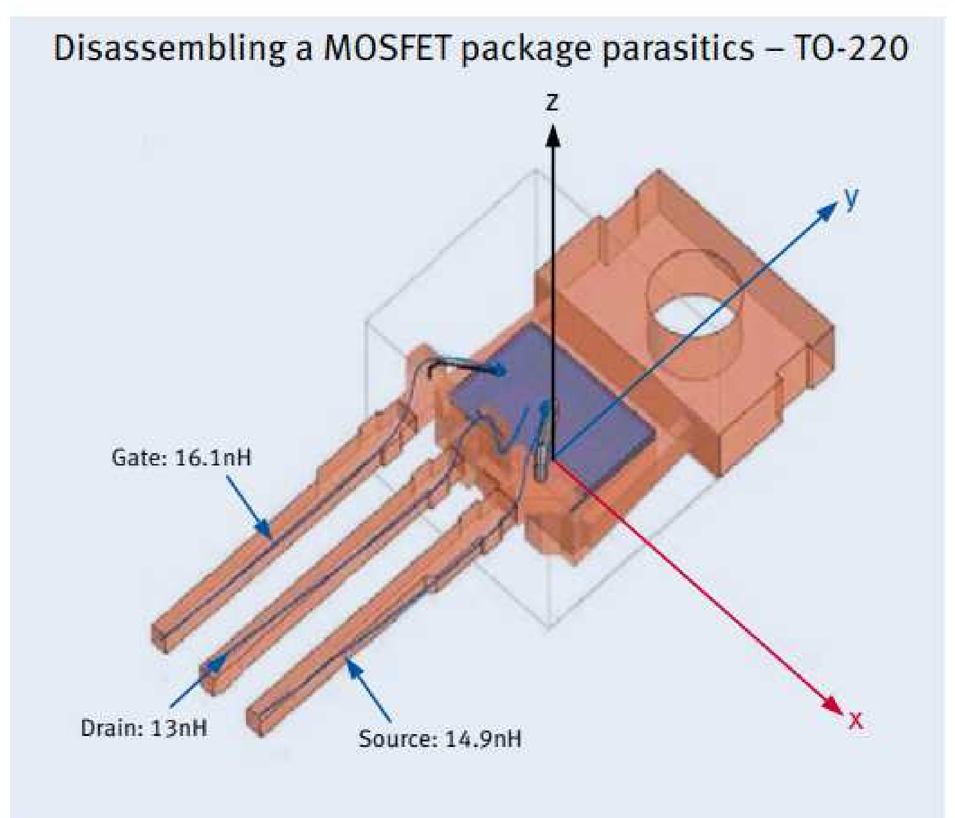


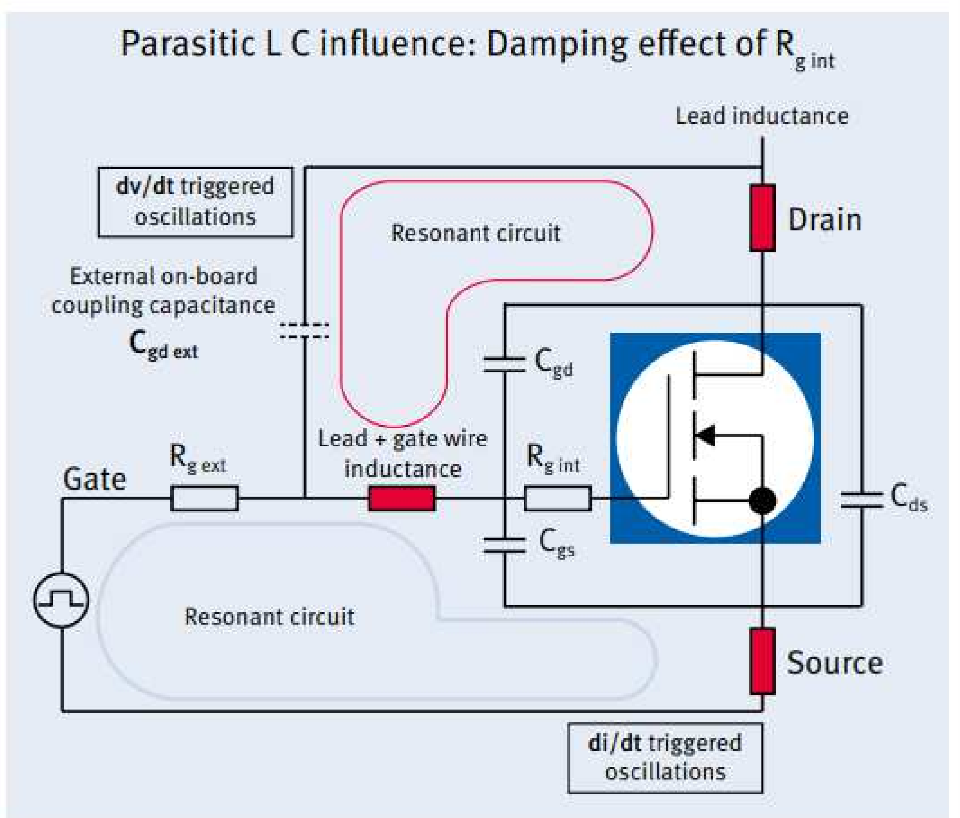


Superjunction MOSFET

Fonte:https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_500V_CoolMOS_CE-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=db3a304336ca04c90136ea3a92e736f6

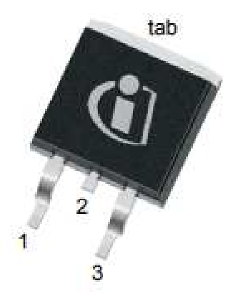
COOLMOS

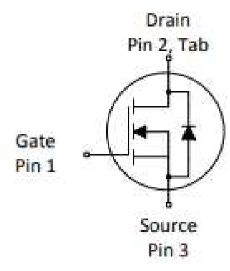


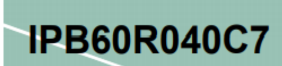


Fonte: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ProductBrochure_CrossReference_CoolMOS_600V_650V_C6E6_Replacements_for_C3-BC-v02_00-EN.pdf?fileId=5546d46255dd933d0155e31b092202ac

COOLMOS







MOSFET

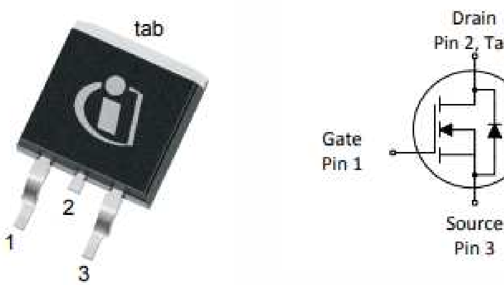
600V CoolMOS™ C7 Power Transistor

Table 1 Key Performance Parameters

Parameter	Value	Unit
V_{DS} @ $T_{j,max}$	650	V
$R_{DS(on),max}$	40	mΩ
$Q_{g.typ}$	107	nC
$I_{D,pulse}$	211	A
$I_{D,continuous}$ @ T_j<150°C	73	A
E_{oss}@400V	12.6	µJ
Body diode di/dt	450	A/µs

Fontehttps://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPB60R040C7-DS-v02_00-EN.pdf?fileId=5546d46258fc0bc101591799c3465e8a

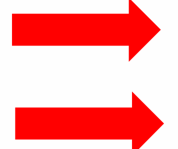
COOLMOS



MOSFET

600V CoolMOS™ C7 Power Transistor

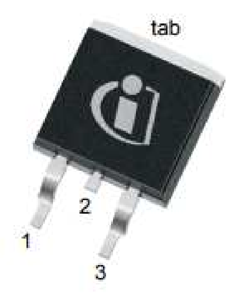
Table 4 Static characteristics

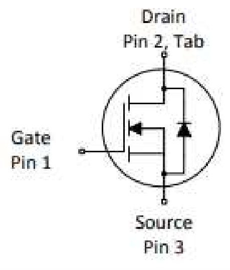


Parameter	Symbol	Values			Unit
		Min.	Typ.	Max.	
Drain-source breakdown voltage	$V_{(BR)DSS}$	600	-	-	V
Gate threshold voltage	$V_{(GS)th}$	3	3.5	4	V
Zero gate voltage drain current	I_{DSS}	- -	- 10	1 -	µA
Gate-source leakage current	I_{GSS}	-	-	100	nA
Drain-source on-state resistance	$R_{DS(on)}$	- -	0.034 0.077	0.040 -	Ω
Gate resistance	R_G	-	0.77	-	Ω

Fontehttps://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPB60R040C7-DS-v02_00-EN.pdf?fileId=5546d46258fc0bc101591799c3465e8a

COOLMOS





MOSFET

600V CoolMOS™ C7 Power Transistor

Table 5 Dynamic characteristics

Parameter	Symbol	Values			Unit
		Min.	Typ.	Max.	
Input capacitance	C_{iss}	-	4340	-	pF
Output capacitance	C_{oss}	-	85	-	pF
Effective output capacitance, energy related[1)]	$C_{o(er)}$	-	158	-	pF
Effective output capacitance, time related[2)]	$C_{o(tr)}$	-	1640	-	pF

Fontehttps://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPB60R040C7-DS-v02_00-EN.pdf?fileId=5546d46258fc0bc101591799c3465e8a

Abraço!

Heverton Augusto Pereira

Prof. Departamento de Engenheira Eletrica | UFV

Coordenador da Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência |Gesep

Membro do Programa de Pós-Graduaçao em Engenharia Elétrica | PPGEL/CEFET-MG

E-mail: heverton.pereira@ufv.br