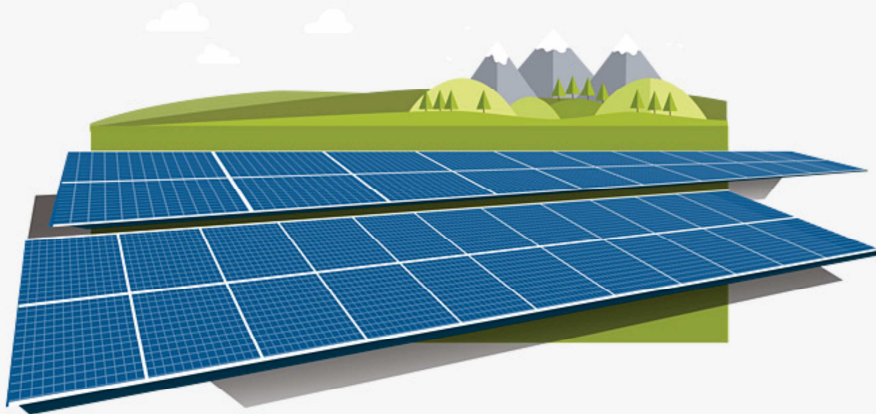


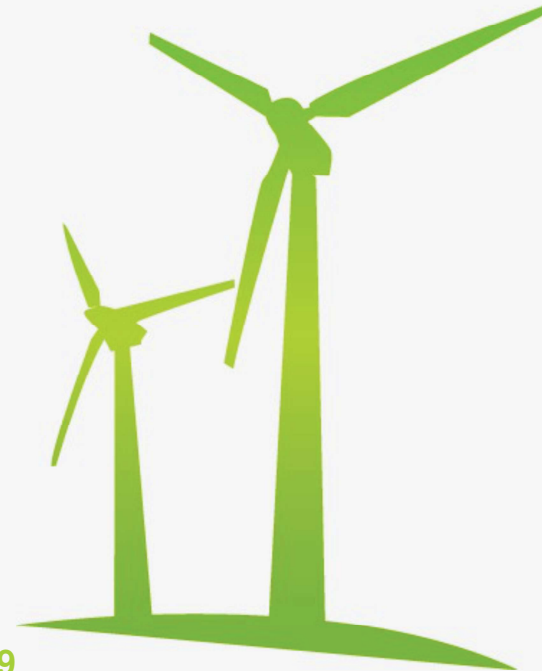
Eletrônica de Potência

Aula 04 – Transistores de potência

Parte 2 – JFET, TBJ, IGBT e SIT



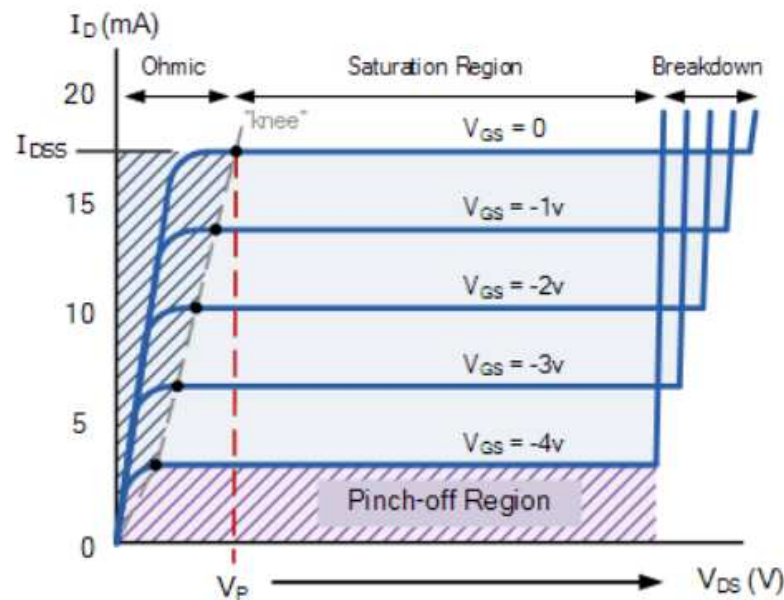
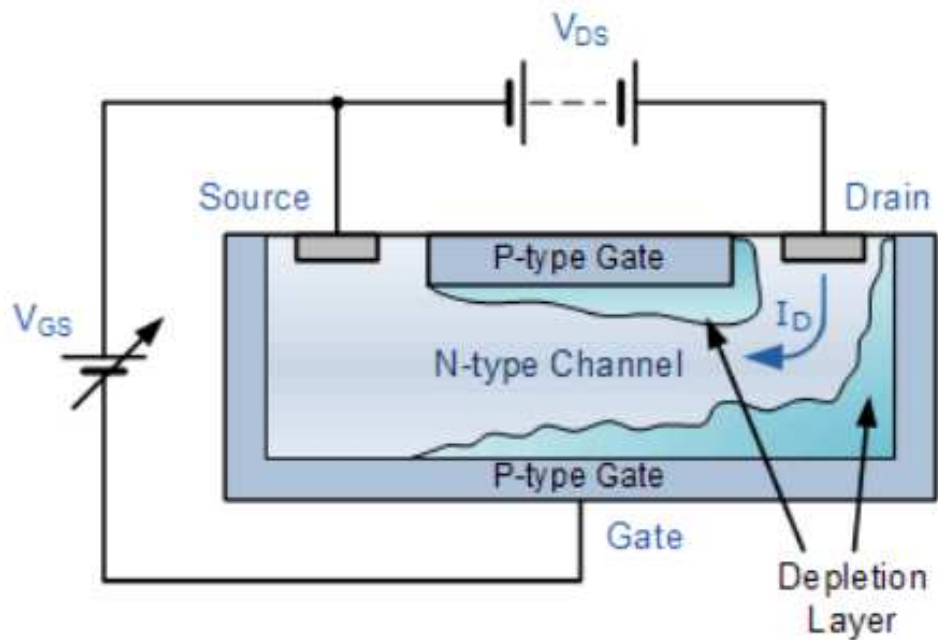
Prof. Heverton Augusto Pereira
heverton.pereira@ufv.br



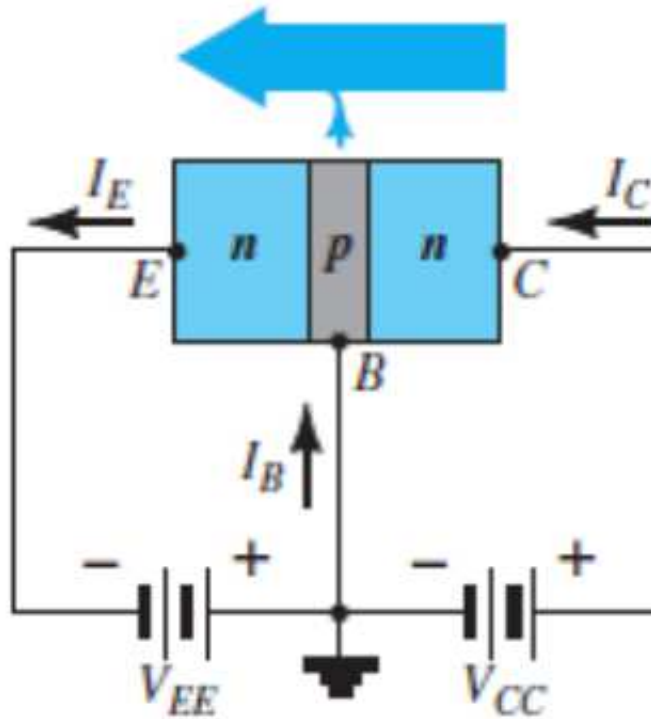
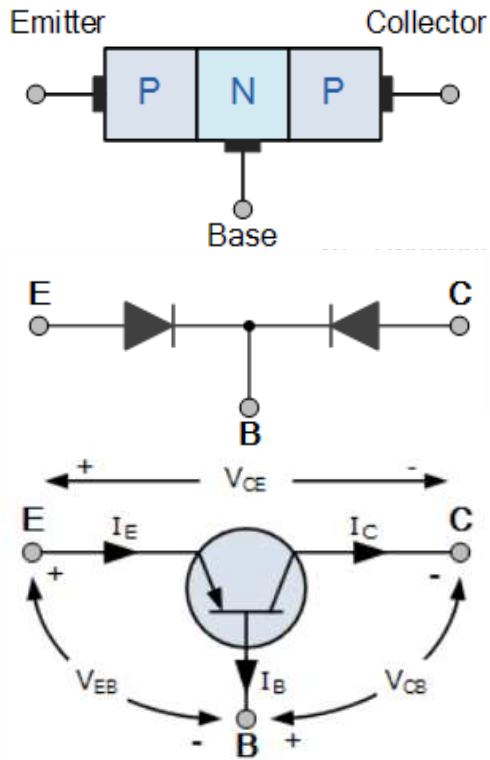
Transistores de efeito de campo de junção (JFETs)

- Os JFETs têm um canal normalmente fechado que conecta a fonte e o dreno.
- A porta é usada para controlar o fluxo de corrente através do canal e do dreno.
- De forma semelhante a dos MOSFETs, existem dois tipos de junção FET: canal n e canal p.
- Em JFETs de canal n, o canal é formado entre duas regiões de porta tipo p.

Transistores de efeito de campo de junção (JFETs)



Transistores de junção bipolar (BJTs)



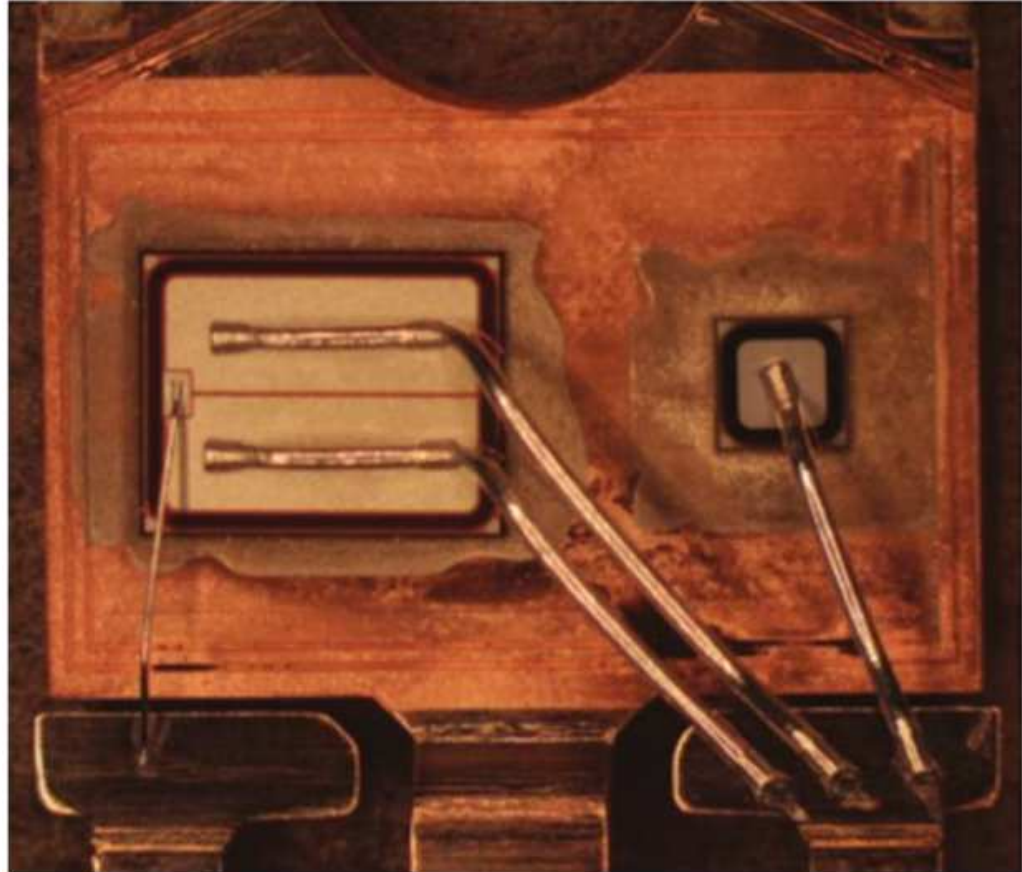
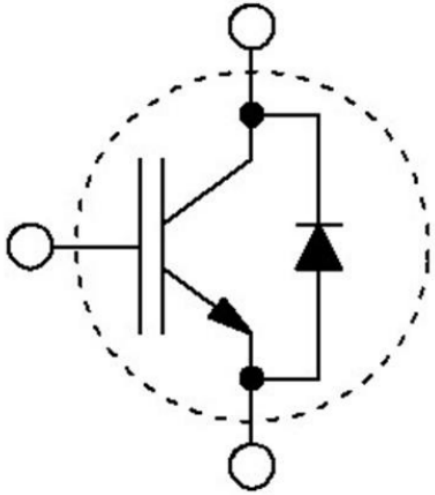
Transistores de junção bipolar (BJTs)

- Uma junção pn diretamente polarizada apresenta duas capacitâncias paralelas: uma da camada de depleção e uma de difusão.
- Por outro lado, uma junção pn reversamente polarizada tem apenas a capacitância de depleção.
- Em regime permanente, essas capacitâncias não desempenham nenhum papel.
- No entanto, em condições transitórias, elas influenciam os comportamentos de entrada em condução e bloqueio do transistor.

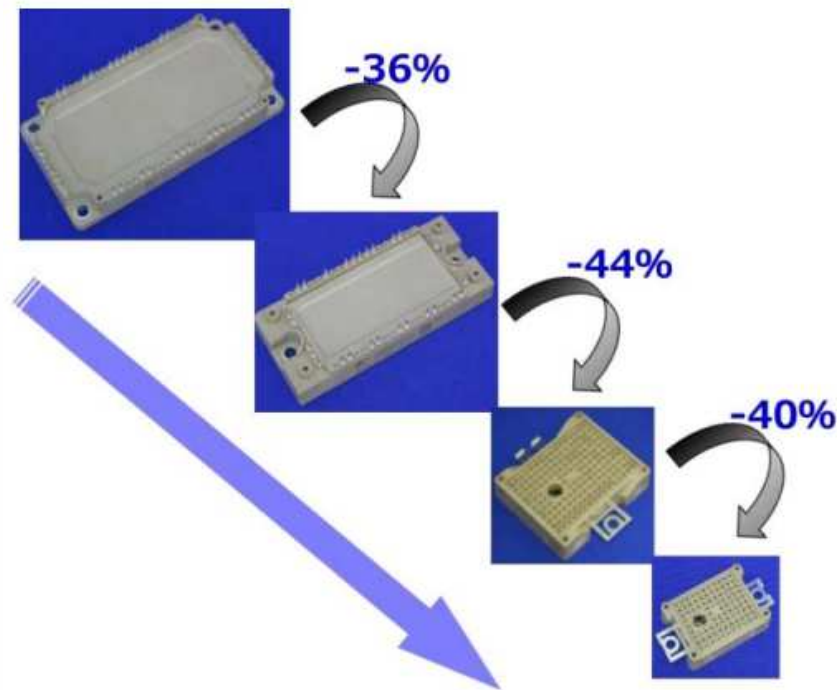
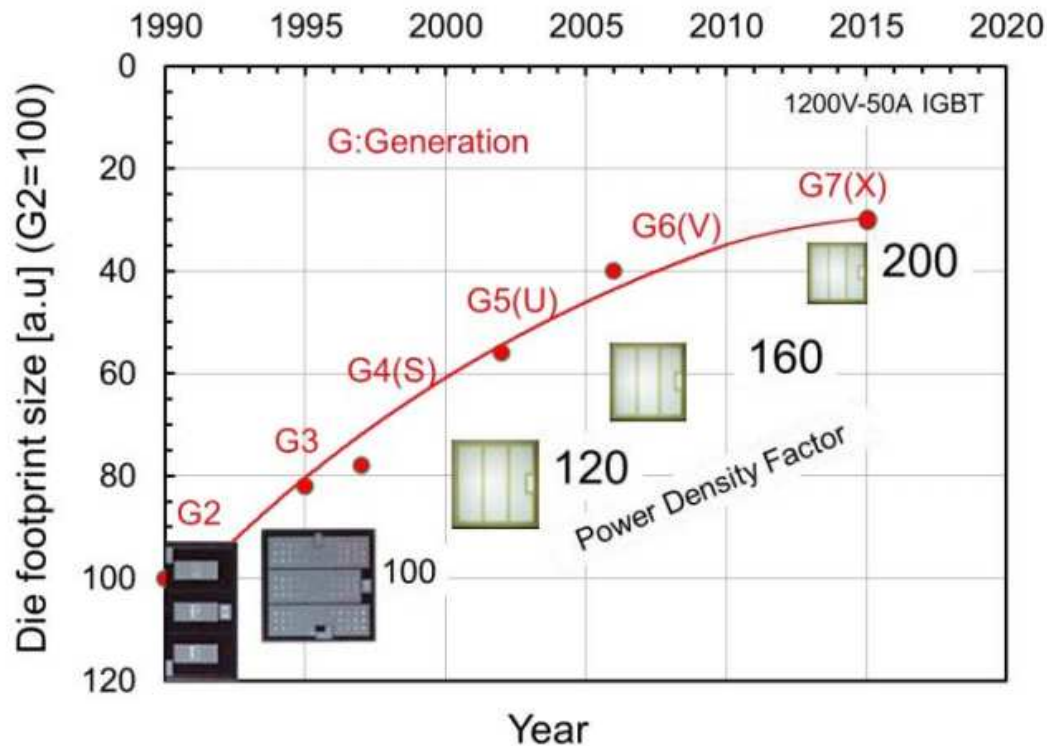
Transistores Comerciais

Código	Fabricante	C_i	VCE(sat)	I_b	I_c	Vceo	Ptot	Preço
BDP948H6327XTSA1	Infineon	40pF	0.5V	0,2A	5 A	45 V	5 W	\$0.73
BUL138	STM	-	0.7V	2 A	5 A	400V	80 W	\$1.37
KSE210STU	ON/Fairchild	120pF	1.8V	-	5 A	25 V	15 W	\$0.43
DSC7505Q0L	Panasonic	50pF	1.0V	-	5 A	20 V	1 W	\$0.95
2SC5354-1(F)	Toshiba	-	1 V	2 A	5 A	800V	100 W	\$4.77
BUJ303CD,118	WeEn	-	0.5V	2 A	5 A	400V	80 W	\$0.75
ZXTN2010ZTA	Diodes ncorp	31pF	230mV	2 A	5 A	60 V	2,1 W	\$0.85
BUJ303B,127	WeEn	-	0,25V	2 A	5 A	400V	100 W	\$0.83
PBSS5540Z,115	Nexperia	105pF	120mV	2 A	5 A	40 V	2 W	\$0.59

IGBTs



IGBTs



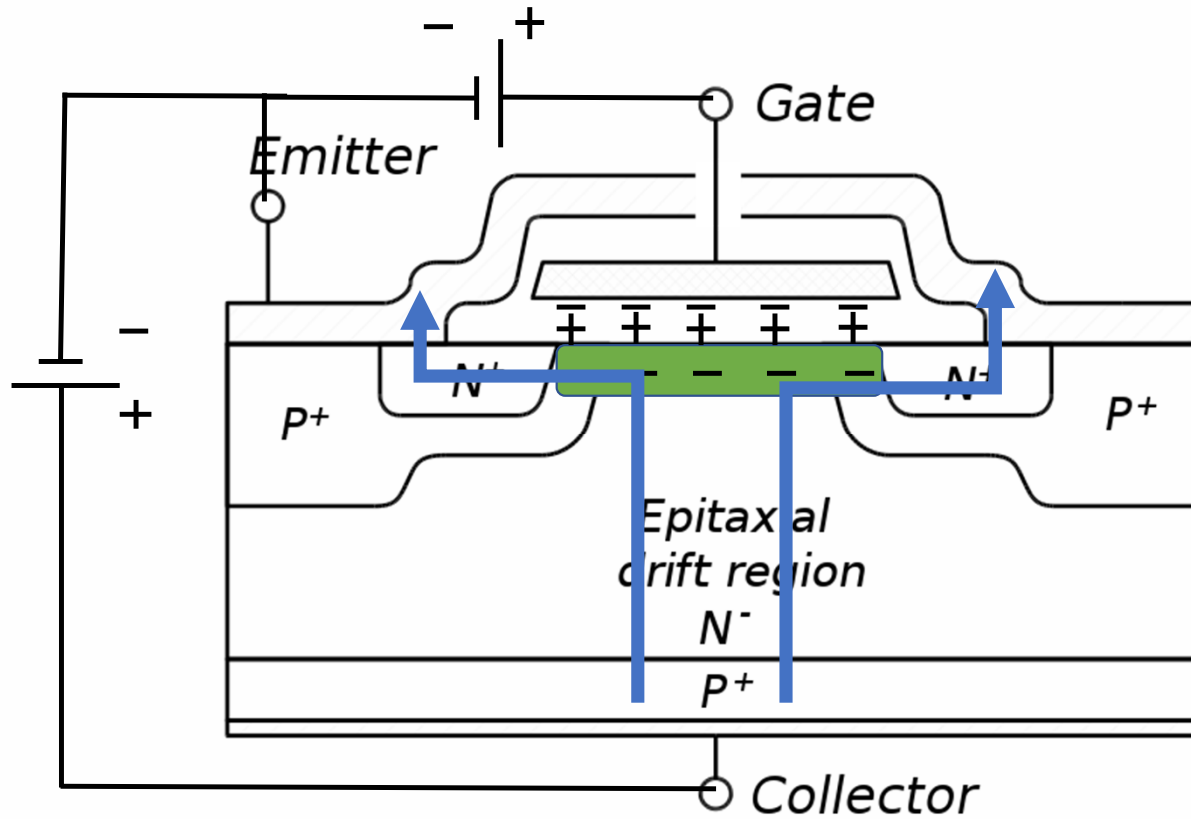
- Melhoria na densidade de potência 1200 V IGBTs

- 35 A/1200 V FS IGBT

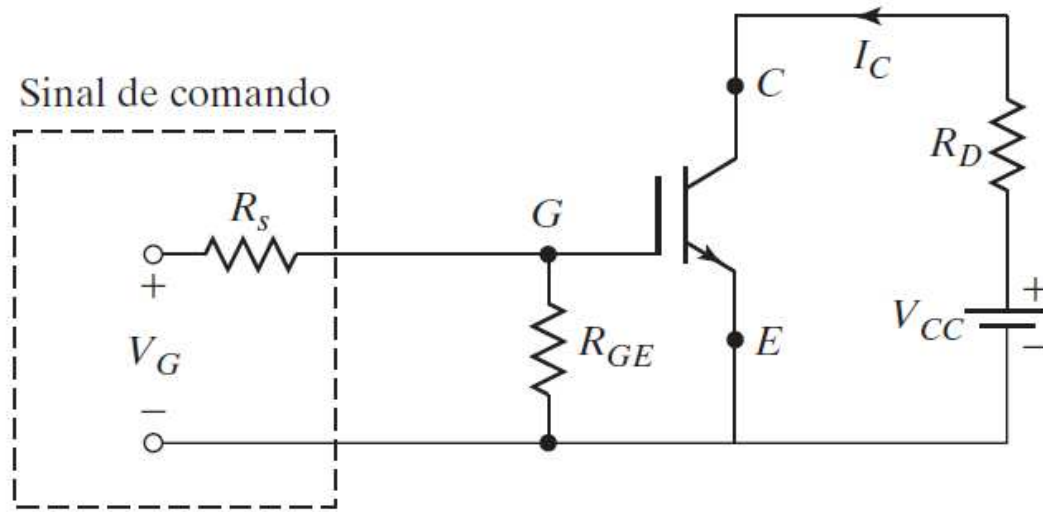
IGBTs

- Um IGBT combina as vantagens dos TBJs com as dos MOSFETs.
- Um IGBT tem uma elevada impedância de entrada, como os MOSFETs, e baixas perdas em condução, como os TBJs.
- Além disso, ele não apresenta o problema de segunda avalanche, como os TBJs.
- Por meio do projeto e da estrutura da pastilha, a resistência equivalente dreno-fonte R_{DS} é controlada para se comportar como a de um TBJ.

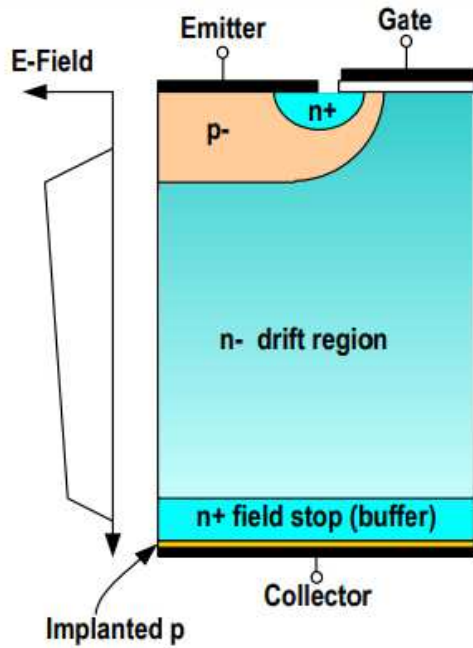
IGBTs



IGBTs

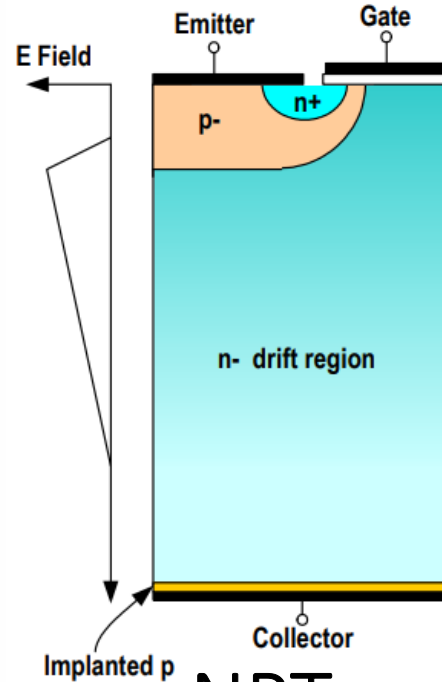


Tecnologias de IGBTs



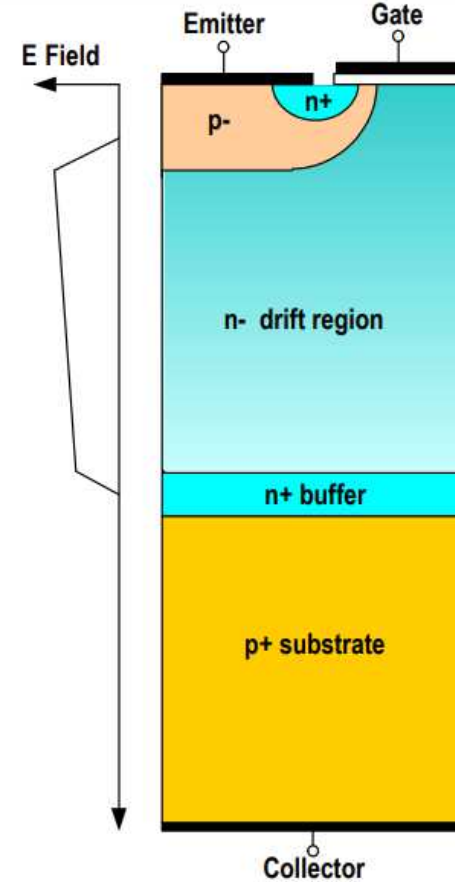
PT

Punch through



NPT

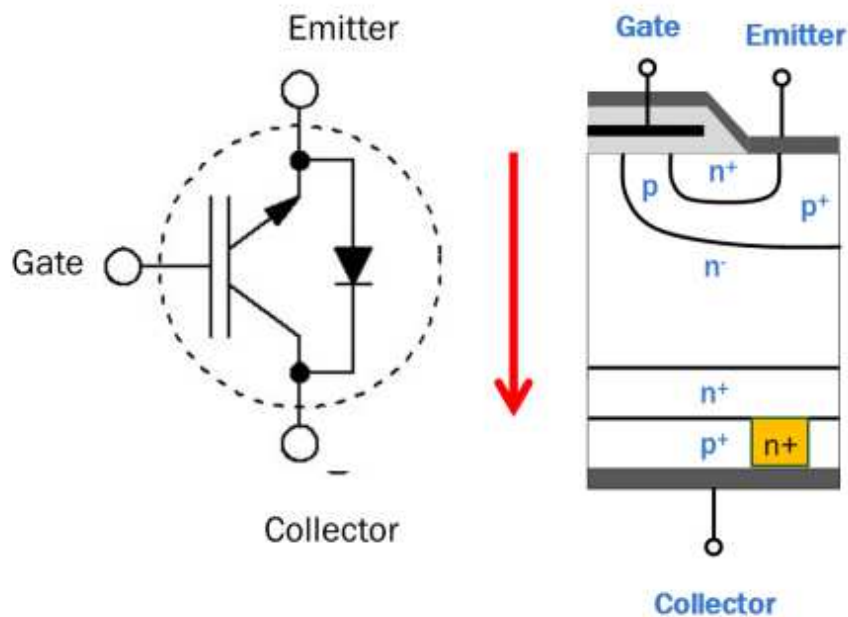
Non Punch through



FS
Field Stop

Tecnologias de IGBTs

- E a corrente reversa?
- Modificações na estrutura do IGBT
- Nomes:
 - ✓ RC-IGBT (reverse conducting)
 - ✓ AS-IGBT (shorted anode)
- Custo benefício / Compacto



IGBTs

Punch through

Non Punch through

Field stop planar

substrato p+ com crescimento epitaxial

substrato n- com um layer p implantado Combina as características do PT e NPT

IGBTs

Punch through

Non Punch through

Field stop planar

substrato p+ com crescimento epitaxial

substrato n- com um layer p implantado

Combina as características do PT e NPT

Difícil para paralelismo

Longa calda na corrente para desligar a chave

Reduzindo a calda da corrente quando a chave desliga

IGBTs

Punch through

Non Punch through

Field stop planar

substrato p+ com crescimento epitaxial

substrato n- com um layer p implantado

Combina as características do PT e NPT

Difícil para paralelismo

Longa calda na corrente para desligar a chave

Reduzindo a calda da corrente quando a chave desliga

Aumento das perdas para desligar afetadas pela temperatura

Baixa dependência da temperatura

Baixa dependência da temperatura

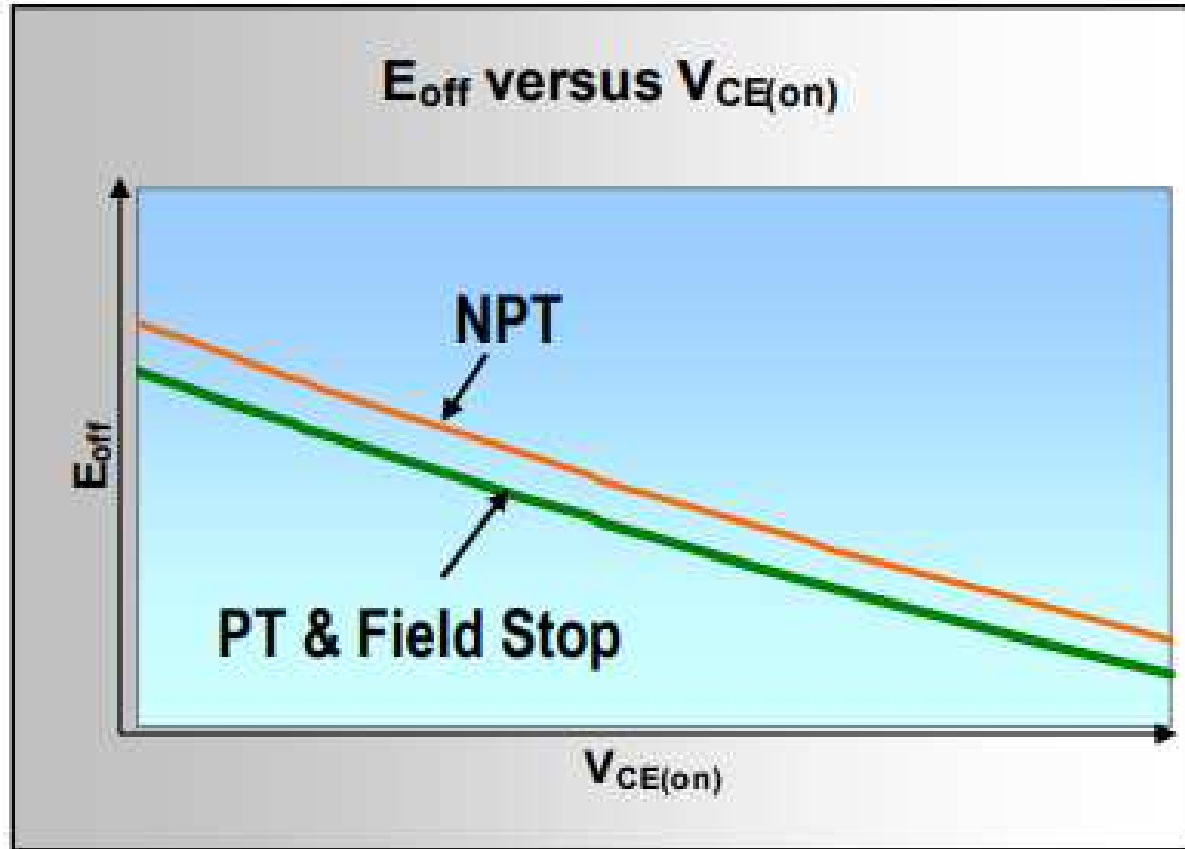
IGBTs

Punch through	Non Punch through	Field stop planar
substrato p+ com crescimento epitaxial	substrato n- com um layer p implantado	Combina as características do PT e NPT
Difícil para paralelismo	Longa calda na corrente para desligar a chave	Reduzindo a calda da corrente quando a chave desliga
Aumento das perdas para desligar afetadas pela temperatura	Baixa dependência da temperatura	Baixa dependência da temperatura
Requer controle do tempo de vida das cargas minoritárias Esse controle impacta no tempo de desligar da chave	Geralmente sem controle do tempo de vida	Baixa perda de chaveamento Baixa corrente residual

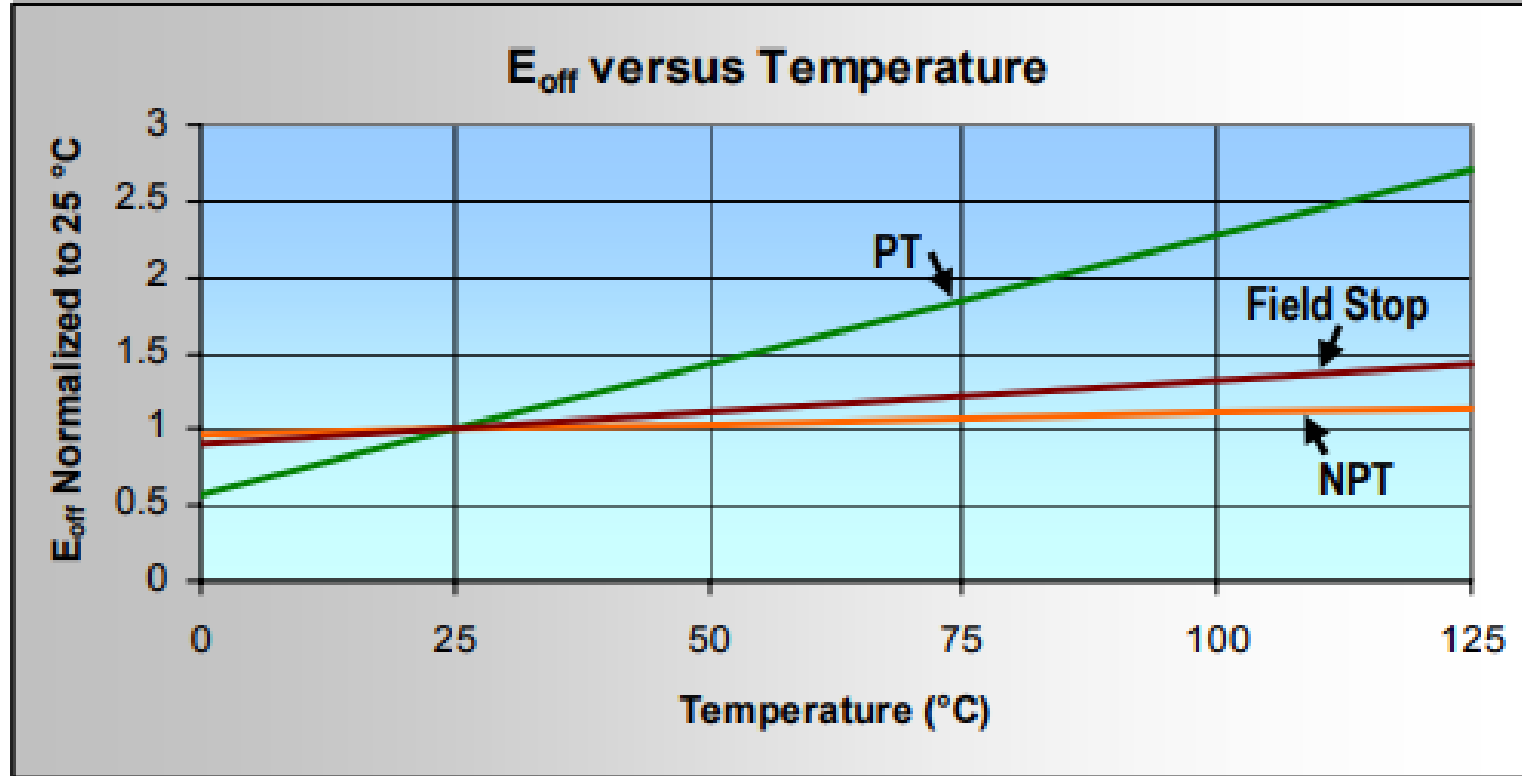
IGBTs

Punch through	Non Punch through	Field stop planar
substrato p+ com crescimento epitaxial	substrato n- com um layer p implantado	Combina as características do PT e NPT
Difícil para paralelismo	Longa calda na corrente para desligar a chave	Reduzindo a calda da corrente quando a chave desliga
Aumento das perdas para desligar afetadas pela temperatura	Baixa dependência da temperatura	Baixa dependência da temperatura
Requer controle do tempo de vida das cargas minoritárias Esse controle impacta no tempo de desligar da chave	Geralmente sem controle do tempo de vida	Baixa perda de chaveamento Baixa corrente residual
Campo elétrico se estende para toda a região de drift	Campo elétrico termina na região de drift	Campo elétrico se estende para toda a região de drift

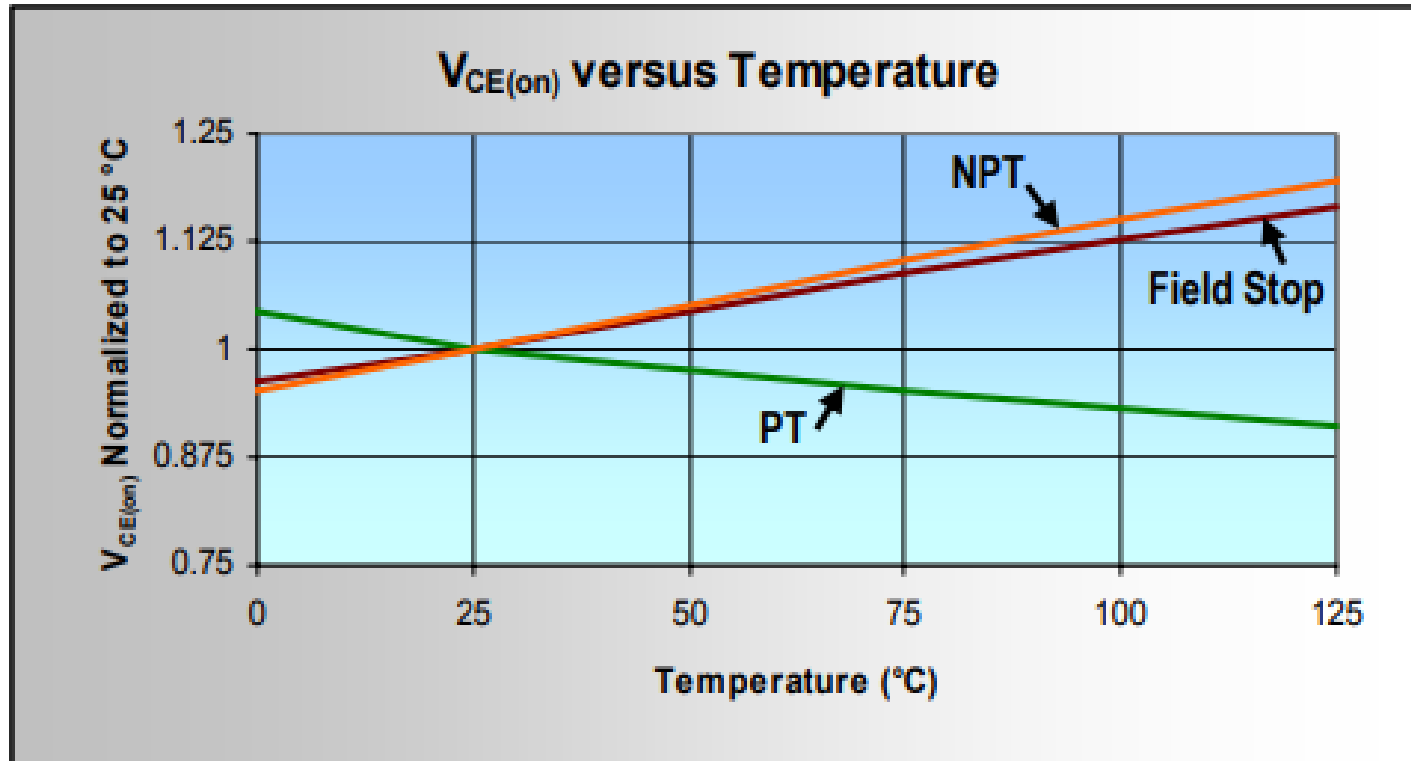
IGBTs



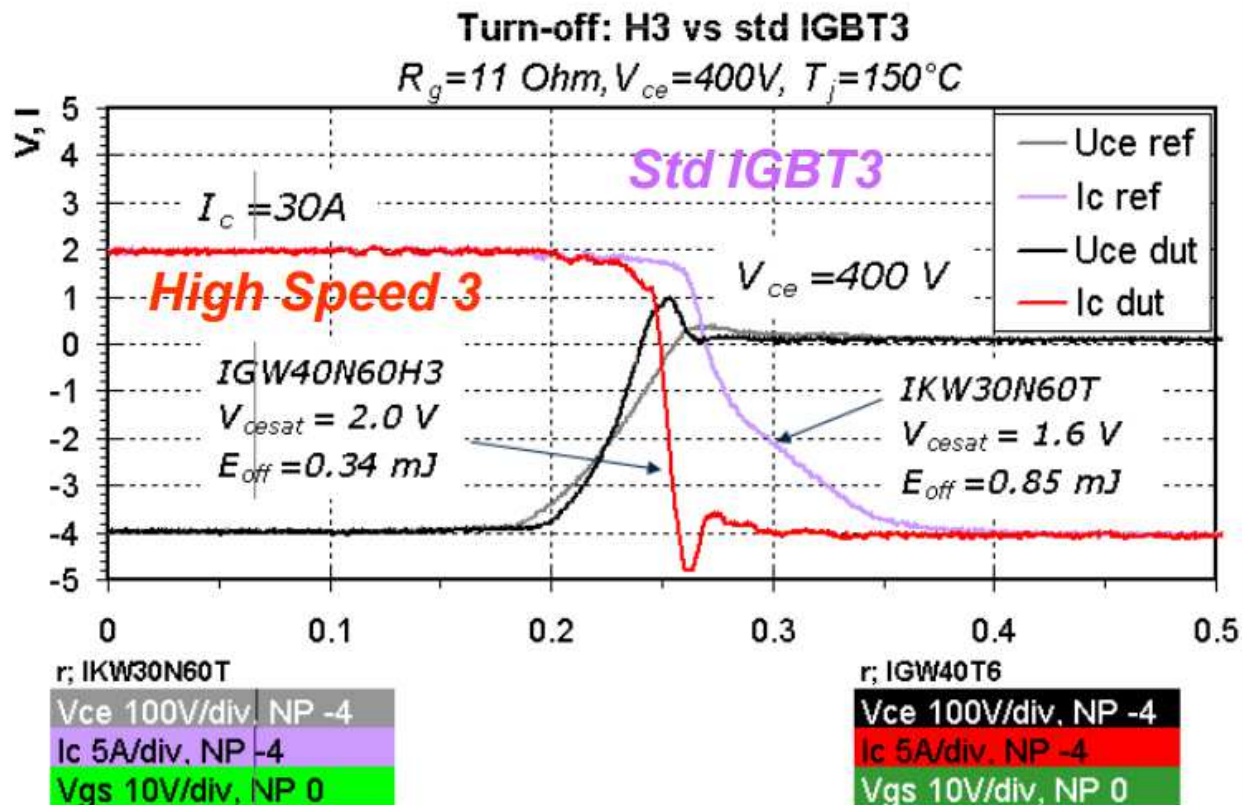
IGBTs



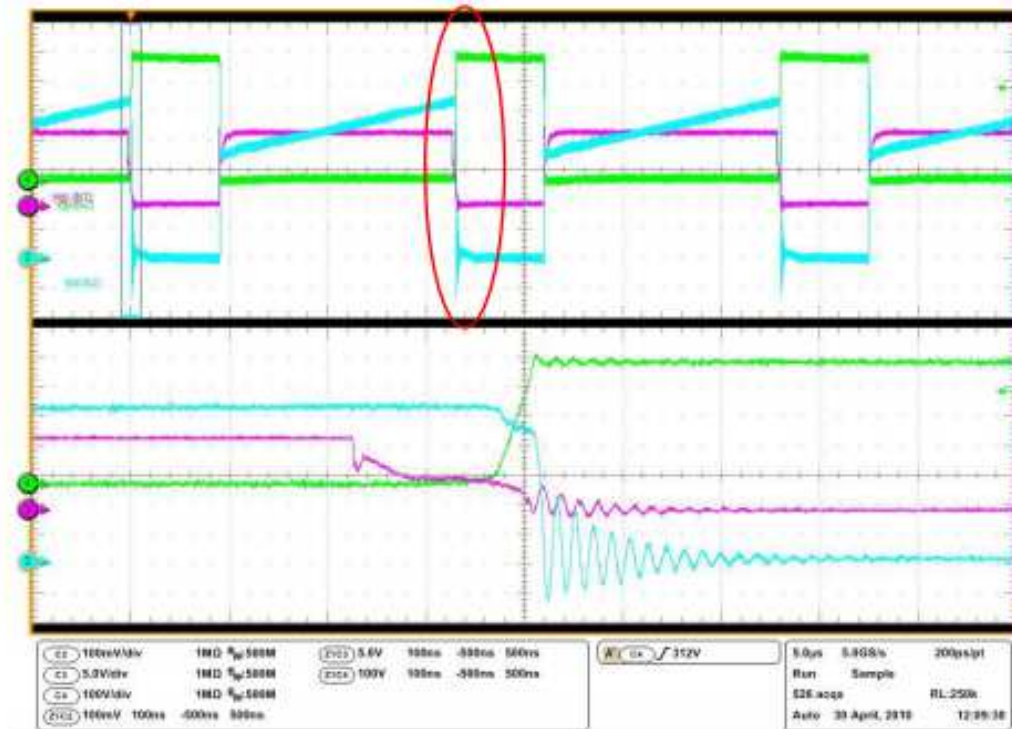
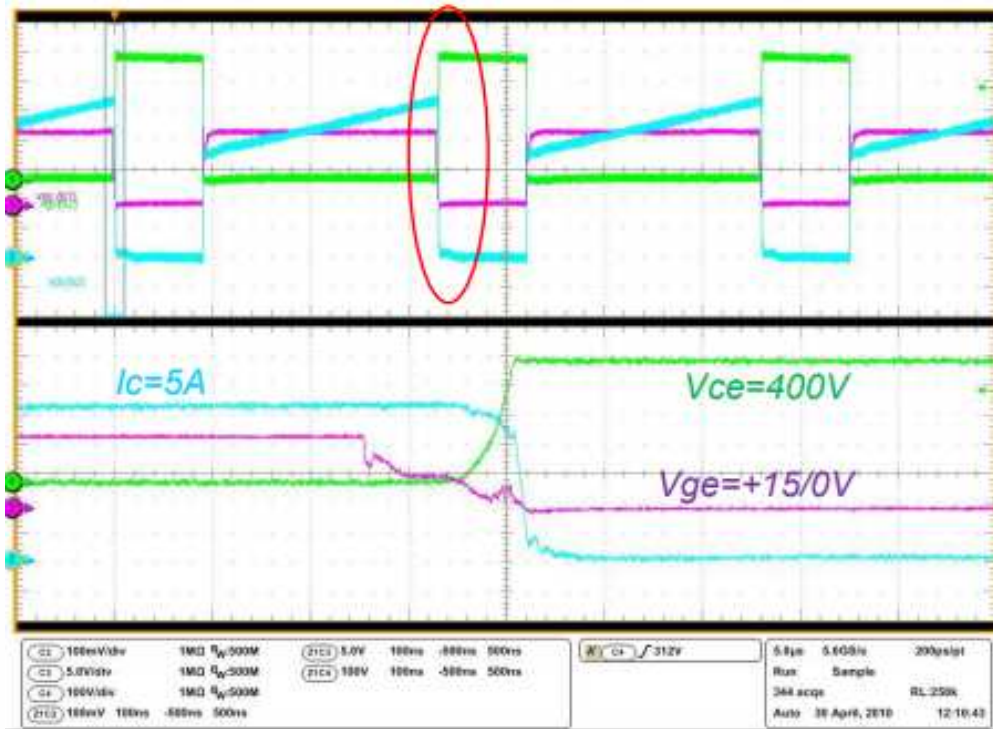
IGBTs



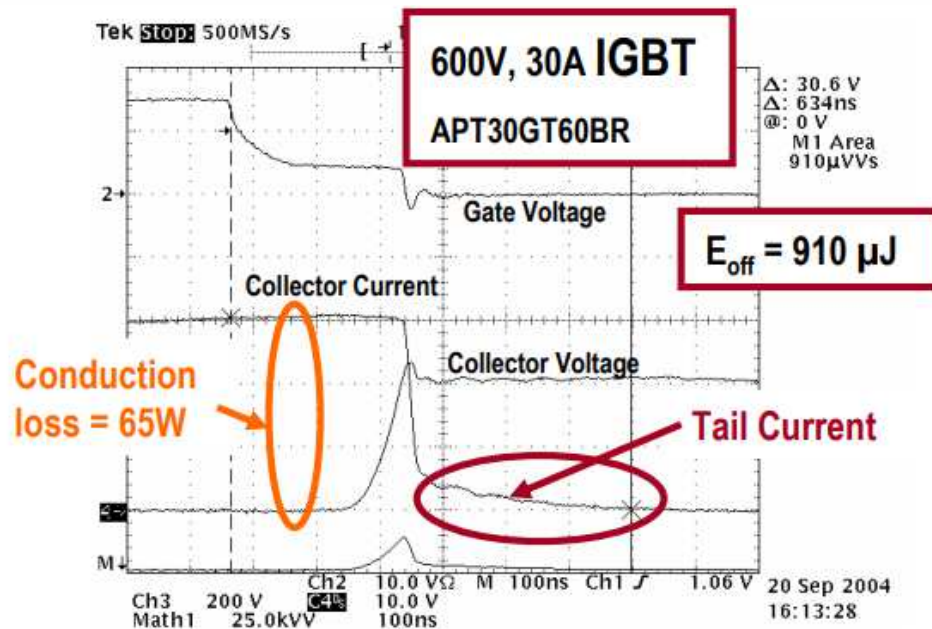
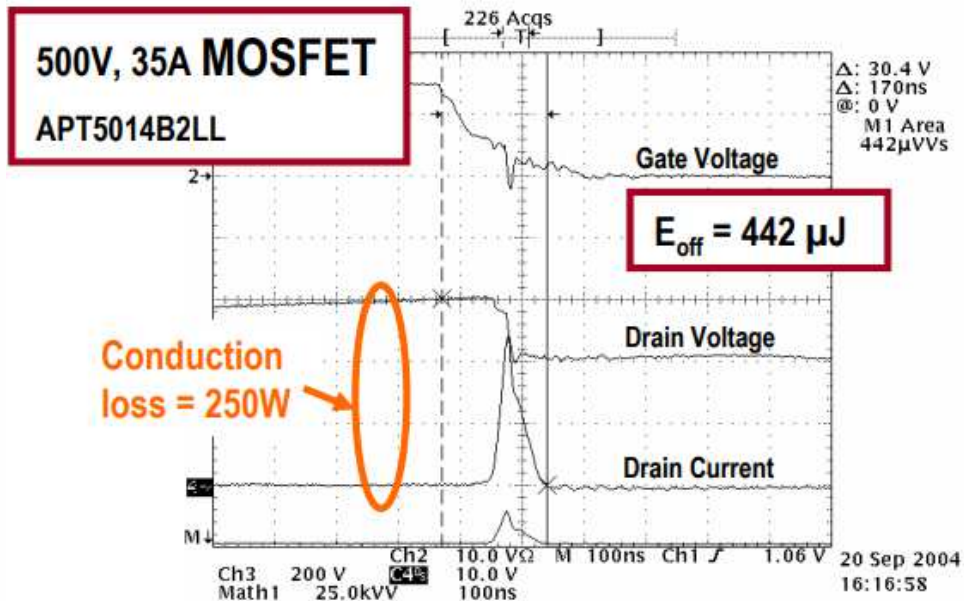
Tecnologias de IGBTs



Tecnologias de IGBTs



IGBTs vs MOSFET



Test conditions: 400V, 30A, 125°C,
 $R_G = 10\Omega$, $V_{GG} = 15V$
 hard switched,
 no snubber

IGBTs vs MOSFET

- IGBT tem baixa perda de condução devido a corrente bipolar
- IGBT tem maiores perdas de chaveamento devido a corrente de calda ao desligar
- No IGBT o controle no tempo de vida útil das portadoras minoritárias pode ser usado para acelerar a recombinação interna

IGBT: Si x SiC

IXYS

Preliminary Technical Information

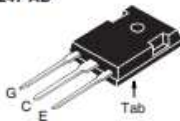
**XPT™ 600V IGBT
GenX3™ w/ Diode**

IXXH50N60C3D1

$V_{CES} = 600V$
 $I_{C110} = 50A$
 $V_{CE(sat)} \leq 2.30V$
 $t_{fl(typ)} = 42ns$



TO-247 AD



G = Gate C = Collector
E = Emitter Tab = Collector

Features

- Optimized for 20-60kHz Switching
- Square RBSOA
- Anti-Parallel Ultra Fast Diode
- Avalanche Capability
- Short Circuit Capability
- International Standard Package

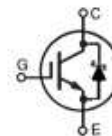
Symbol	Test Conditions	Maximum Ratings
V_{CES}	$T_J = 25^\circ C$ to $175^\circ C$	600 V
V_{CEM}	$T_J = 25^\circ C$ to $175^\circ C$, $R_{\theta CE} = 1M\Omega$	600 V
V_{CES}	Continuous	± 20 V
V_{CEM}	Transient	± 30 V
I_{CS}	$T_C = 25^\circ C$ (Chip Capability)	100 A
I_{C110}	$T_C = 110^\circ C$	50 A
I_{F110}	$T_C = 110^\circ C$	30 A
I_{CM}	$T_C = 25^\circ C$, 1ms	200 A
I_A	$T_C = 25^\circ C$	25 A
E_{AS}	$T_C = 25^\circ C$	200 mJ
SSOA (RBSOA)	$V_{GE} = 15V$, $T_{VI} = 150^\circ C$, $R_{\theta G} = 5\Omega$ Clamped Inductive Load	$I_{CM} = 100$ @ $\leq V_{CES}$ A
t_{SC} (SCSOA)	$V_{GE} = 15V$, $V_{CE} = 360V$, $T_J = 150^\circ C$ $R_{\theta G} = 22\Omega$, Non Repetitive	10 μs
P_C	$T_C = 25^\circ C$	600 W
T_J		-55 ... +175 $^\circ C$
T_{JM}		175 $^\circ C$

IXYS

**GenX3™ 600V IGBTs
w/ SiC Anti-Parallel
Diode**

**IXGA30N60C3C1
IXGP30N60C3C
IXGH30N60C3C**

$V_{CES} = 600V$
 $I_{C110} = 30A$
 $V_{CE(sat)} \leq 3.0V$
 $t_{fl(typ)} = 47ns$

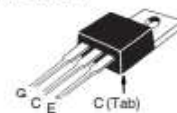


High-Speed PT IGBTs for
40 - 100kHz Switching

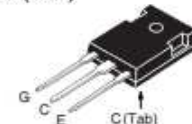
TO-220AB (IXGA)



TO-220AB (IXGP)



TO-247 (IXGH)



G = Gate D = Collector
S = Emitter Tab = Collector

Features

Symbol	Test Conditions	Maximum Ratings
V_{CES}	$T_C = 25^\circ C$ to $150^\circ C$	600 V
V_{CEM}	$T_J = 25^\circ C$ to $150^\circ C$, $R_{\theta CE} = 1M\Omega$	600 V
V_{CES}	Continuous	± 20 V
V_{CEM}	Transient	± 30 V
I_{CS}	$T_C = 25^\circ C$	60 A
I_{C110}	$T_C = 110^\circ C$	30 A
I_{F110}	$T_C = 110^\circ C$	13 A
I_{CM}	$T_C = 25^\circ C$, 1ms	150 A
SSOA (RBSOA)	$V_{GE} = 15V$, $T_{VI} = 125^\circ C$, $R_{\theta G} = 5\Omega$ Clamped Inductive Load	$I_{CM} = 60$ @ $\leq V_{CES}$ A
P_C	$T_C = 25^\circ C$	220 W
T_J		-55 ... +150 $^\circ C$
T_{JM}		150 $^\circ C$
T_{flj}		-55 ... +150 $^\circ C$
T_L	1.6mm (0.062 in.) from Case for 10s	300 $^\circ C$

IGBT: Si x SiC

Symbol Test Conditions ($T_J = 25^\circ\text{C}$ Unless Otherwise Specified)		Characteristic Values		
		Min.	Typ.	Max.
g_{fs}	$I_C = 36\text{A}, V_{CE} = 10\text{V}, \text{Note 1}$	11	18	S
C_{ies}	$V_{CE} = 25\text{V}, V_{GE} = 0\text{V}, f = 1\text{MHz}$		2320	pF
C_{oes}			138	pF
C_{res}			42	pF
Q_g	$I_C = 36\text{A}, V_{GE} = 15\text{V}, V_{CE} = 0.5 \cdot V_{CES}$		64	nC
Q_{ge}			18	nC
Q_{gc}			25	nC
$t_{d(on)}$	Inductive load, $T_J = 25^\circ\text{C}$		24	ns
t_{ri}			40	ns
E_{on}	$I_C = 36\text{A}, V_{GE} = 15\text{V}$		0.72	mJ
$t_{d(off)}$	$V_{CE} = 360\text{V}, R_G = 5\Omega$		62	100 ns
t_{fi}	Note 2		42	ns
E_{off}			0.33	0.55 mJ
$t_{d(on)}$	Inductive load, $T_J = 150^\circ\text{C}$		25	ns
t_{ri}			44	ns
E_{on}	$I_C = 36\text{A}, V_{GE} = 15\text{V}$		1.46	mJ
$t_{d(off)}$	$V_{CE} = 360\text{V}, R_G = 5\Omega$		80	ns
t_{fi}	Note 2		90	ns
E_{off}			0.48	mJ

Symbol Test Conditions ($T_J = 25^\circ\text{C}$ Unless Otherwise Specified)		Characteristic Values		
		Min.	Typ.	Max.
g_{fs}	$I_C = 20\text{A}, V_{CE} = 10\text{V}, \text{Note 1}$	9	16	S
C_{ies}	$V_{CE} = 25\text{V}, V_{GE} = 0\text{V}, f = 1\text{MHz}$		1075	pF
C_{oes}			196	pF
C_{res}			29	pF
Q_g	$I_C = 20\text{A}, V_{GE} = 15\text{V}, V_{CE} = 0.5 \cdot V_{CES}$		38	nC
Q_{ge}			8	nC
Q_{gc}			17	nC
$t_{d(on)}$	Inductive Load, $T_J = 25^\circ\text{C}$		17	ns
t_{ri}			20	ns
E_{on}	$I_C = 20\text{A}, V_{GE} = 15\text{V}$		0.12	mJ
$t_{d(off)}$	$V_{CE} = 300\text{V}, R_G = 5\Omega$		42	75 ns
t_{fi}	Note 2		47	ns
E_{off}			0.09	0.18 mJ
$t_{d(on)}$	Inductive Load, $T_J = 125^\circ\text{C}$		16	ns
t_{ri}			21	ns
E_{on}	$I_C = 20\text{A}, V_{GE} = 15\text{V}$		0.16	mJ
$t_{d(off)}$	$V_{CE} = 300\text{V}, R_G = 5\Omega$		70	ns
t_{fi}	Note 2		90	ns
E_{off}			0.33	mJ

IGBT: Si x SiC

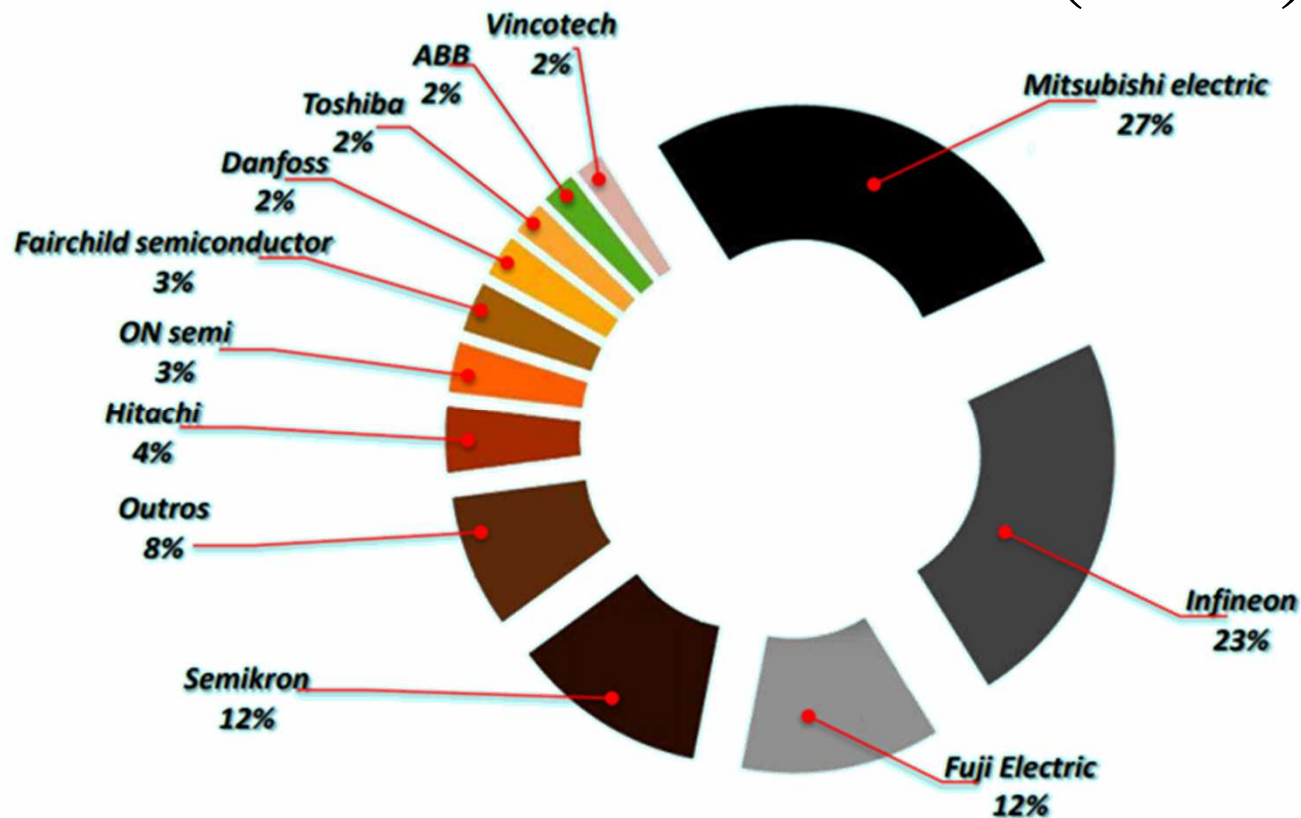
Symbol Test Conditions ($T_j = 25^\circ\text{C}$ Unless Otherwise Specified)		Characteristic Values		
		Min.	Typ.	Max.
$t_{d(on)}$	Inductive load, $T_j = 25^\circ\text{C}$ $I_C = 36\text{A}$, $V_{GE} = 15\text{V}$ $V_{CE} = 360\text{V}$, $R_G = 5\Omega$ Note 2		24	ns
t_r			40	ns
E_{on}			0.72	mJ
$t_{d(off)}$			62	100 ns
t_f			42	ns
E_{off}		0.33	0.55 mJ	

Symbol Test Conditions ($T_j = 25^\circ\text{C}$ Unless Otherwise Specified)		Characteristic Values		
		Min.	Typ.	Max.
$t_{d(on)}$	Inductive Load, $T_j = 25^\circ\text{C}$ $I_C = 20\text{A}$, $V_{GE} = 15\text{V}$ $V_{CE} = 300\text{V}$, $R_G = 5\Omega$ Note 2		17	ns
t_r			20	ns
E_{on}			0.12	mJ
$t_{d(off)}$			42	75 ns
t_f			47	ns
E_{off}		0.09	0.18 mJ	

Preço: IGBTs em módulos de potência

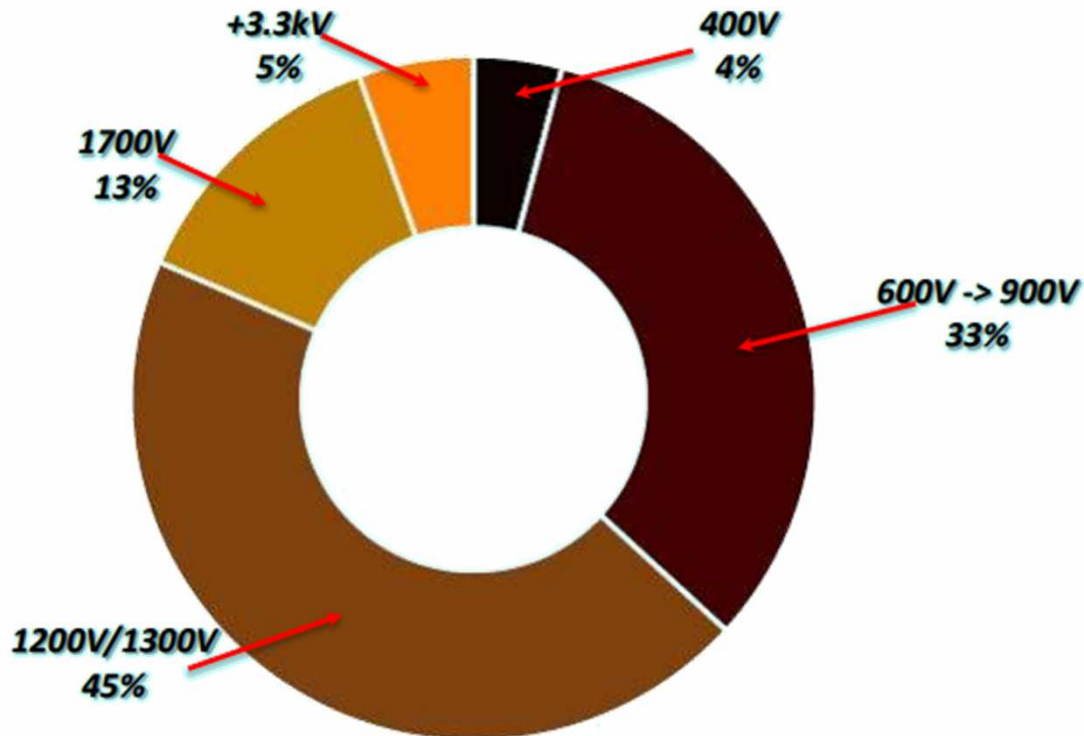
FABRICANTE	MODELO	Vce max (V)	Tensão de saturação coletor-emissor (V)	Corrente contínua do coletor (25° C) (A)	Dissipação de potência (W)	Temperatura operacional máxima (°C)	Preço USD (\$)
Microsemi	APTGT50TL601G	600	1,5	80	176	100	55.51
Infineon	IFCM30U65GDXX MA1	650	1,75	30	60,4	100	17.04
Vishay	VS-ETF150Y65N	650	1,7	201	600	175	70.71
On Semiconductor	FPF2G120BF07AS	650	1,55	40	98	150	108.80
STMicroelectronics	STGIPL14K60-S	600	2,1	15	44	150	39.37
IXYS	IXXN110N65C4H 1	650	1,98	210	750	175	21.97

FABRICANTES (2012)



Fabricantes de IGBT's e quota de mercado (INFINEON YOLE DÉVELOPPMENT, 2013)

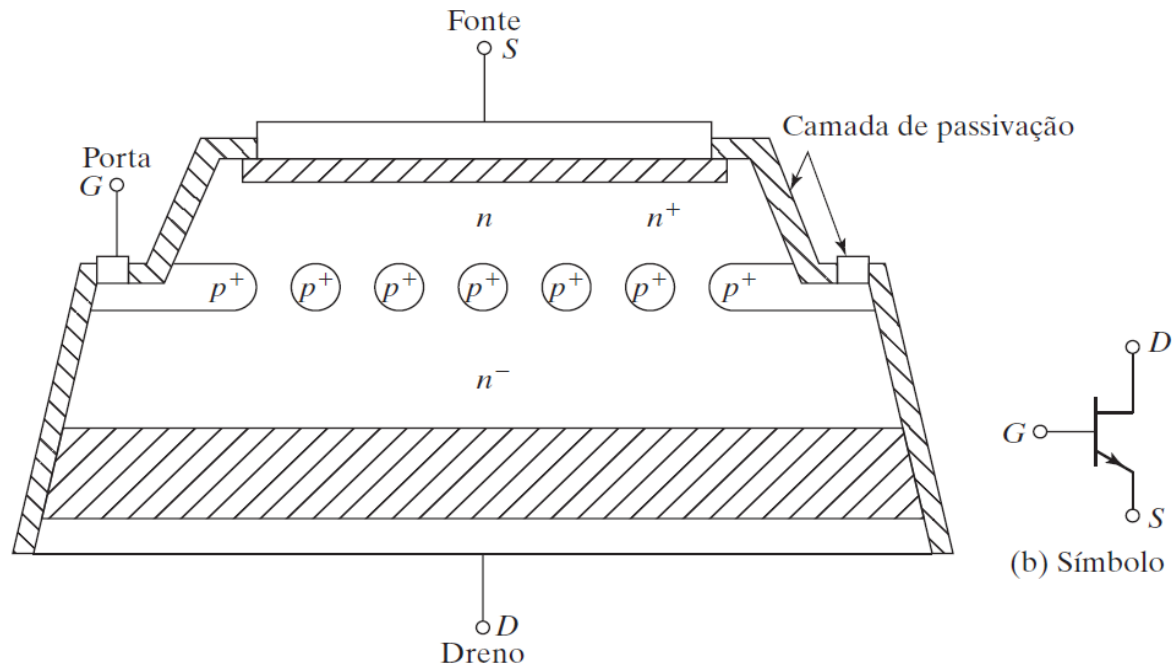
DIVISÃO DO MERCADO POR TENSÃO (2013)



Divisão do mercado de IGBT's por tensão (INFINEON YOLE DÉVELOPPMENT, 2013)

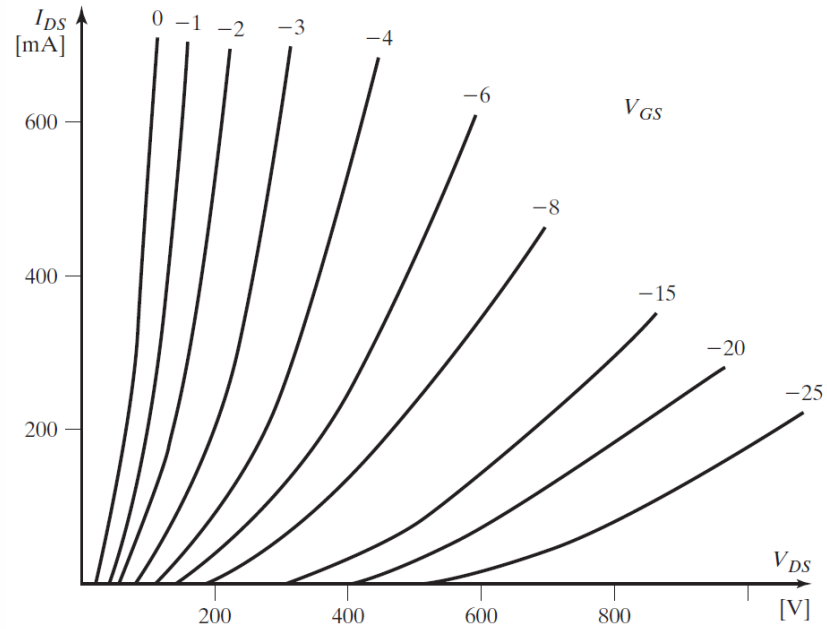
SITs

- Um SIT é um dispositivo para altas potências e frequência.
- Seção transversal e símbolo dos SITs:



SITs

- Características típicas de SITs:



Capítulo 4 do Livro

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



Heverton Augusto Pereira

Prof. Departamento de Engenharia Eletrica | UFV

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

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

E-mail: heverton.pereira@ufv.br