



Semiconductores de SiC y GaN en aplicaciones de Electrónica de Potencia

Javier Sebastián Zúñiga

Grupo de Sistemas Electrónicos de Alimentación. Universidad de Oviedo

Ciudad Real, 03/09/2020

Contacto:
Javier Sebastián,
sebas@uniovi.es



Guía de la presentación

- ❑ **Introducción: lo mínimo imprescindible a conocer sobre semiconductores.**
- ❑ **¿Por qué dispositivos de banda prohibida ancha en electrónica de potencia?: propiedades, ventajas y limitaciones del SiC y del GaN.**
- ❑ **Diodos de SiC: Diodos Schottky, bipolares y mixtos.**
- ❑ **Dispositivos "normalmente cerrados" en SiC: JFETs.**
- ❑ **Dispositivos "normalmente abiertos" en SiC: JFETs y MOSFETs.**
- ❑ **Dispositivos de alta movilidad de electrones en GaN: el HEMT de GaN.**



Guía de la presentación

Power Supply
Systems

✓ **Introducción: lo mínimo imprescindible a conocer sobre semiconductores.**

❑ ¿Por qué dispositivos de banda prohibida ancha en electrónica de potencia?: propiedades, ventajas y limitaciones del SiC y del GaN.

❑ Diodos de SiC: Diodos Schottky, bipolares y mixtos.

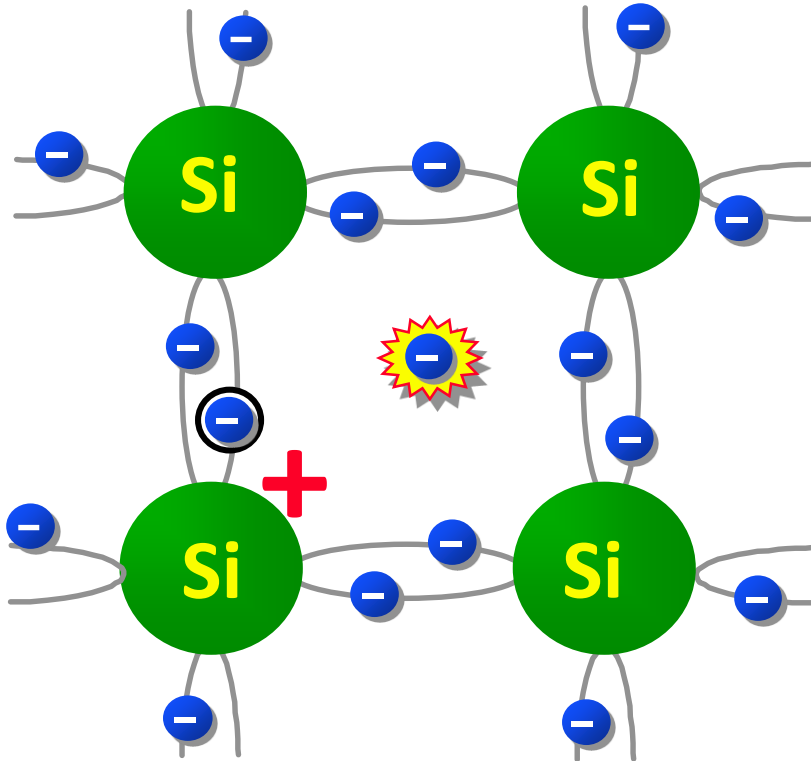
❑ Dispositivos "normalmente cerrados" en SiC: JFETs.

❑ Dispositivos "normalmente abiertos" en SiC: JFETs y MOSFETs.

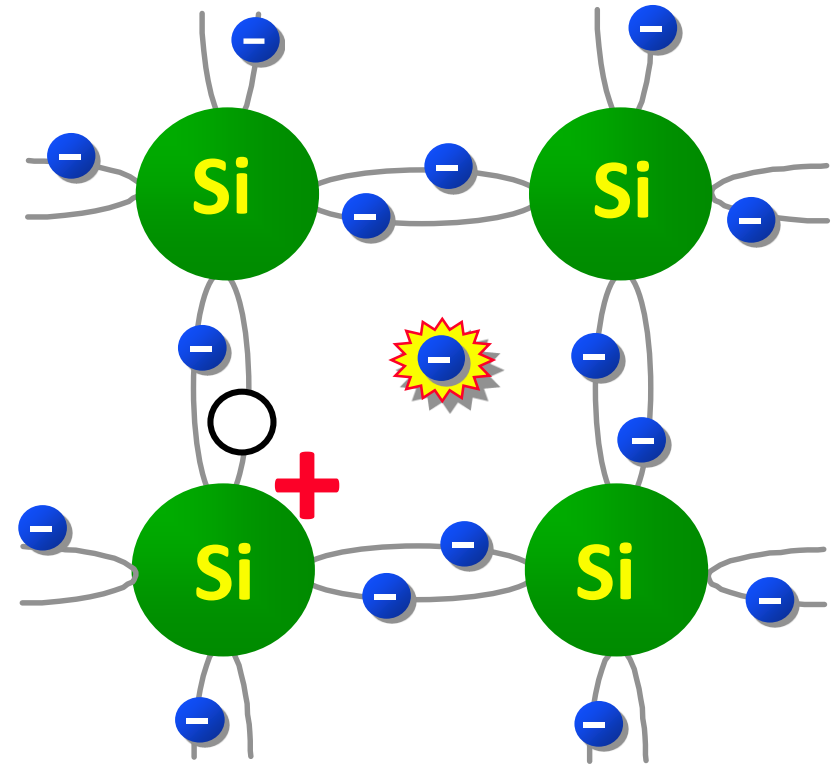
❑ Dispositivos de alta movilidad de electrones en GaN: el HEMT de GaN.



Generación de electrones “conductores” y huecos en un semiconductor



Generación

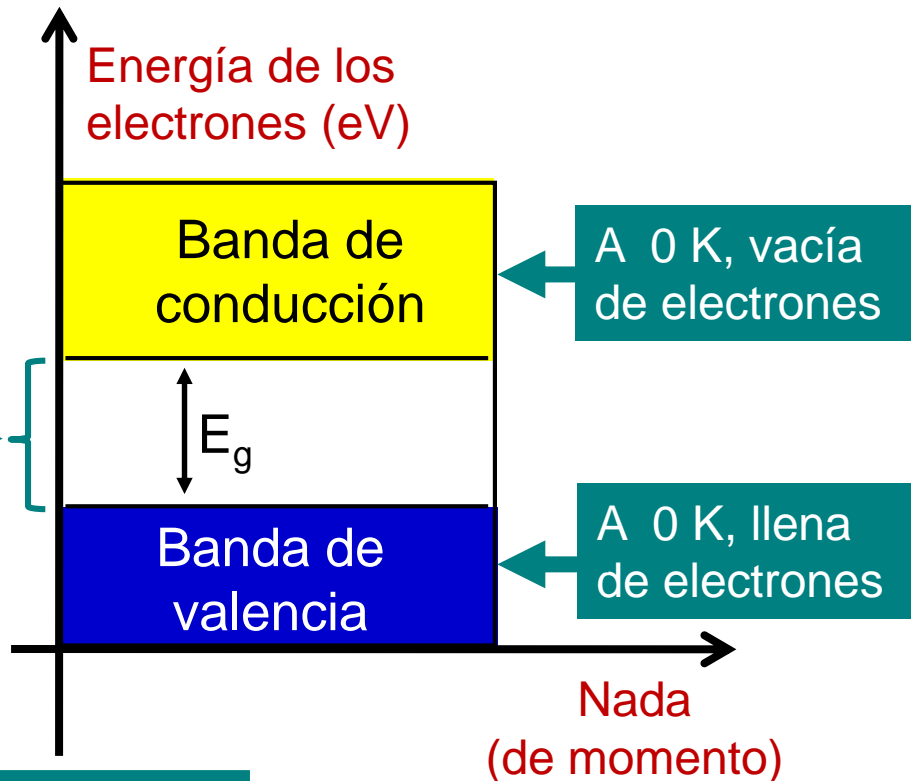


Recombinación

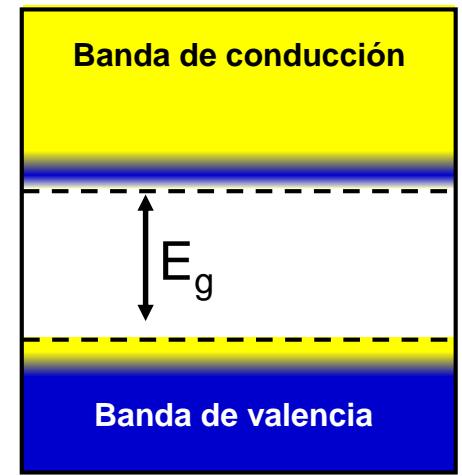


¿Qué tiene que ocurrir para que se genere un par electrón-hueco?

Que el electrón tenga “suficiente” **energía** para “liberarse” del enlace covalente



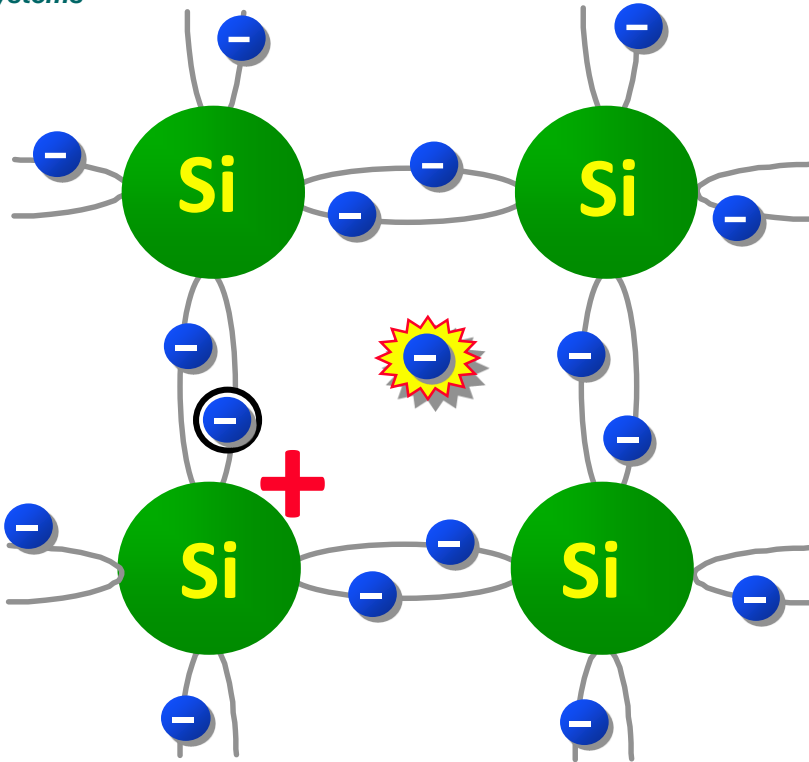
Situación a 300 K,
semiconductor
intrínseco



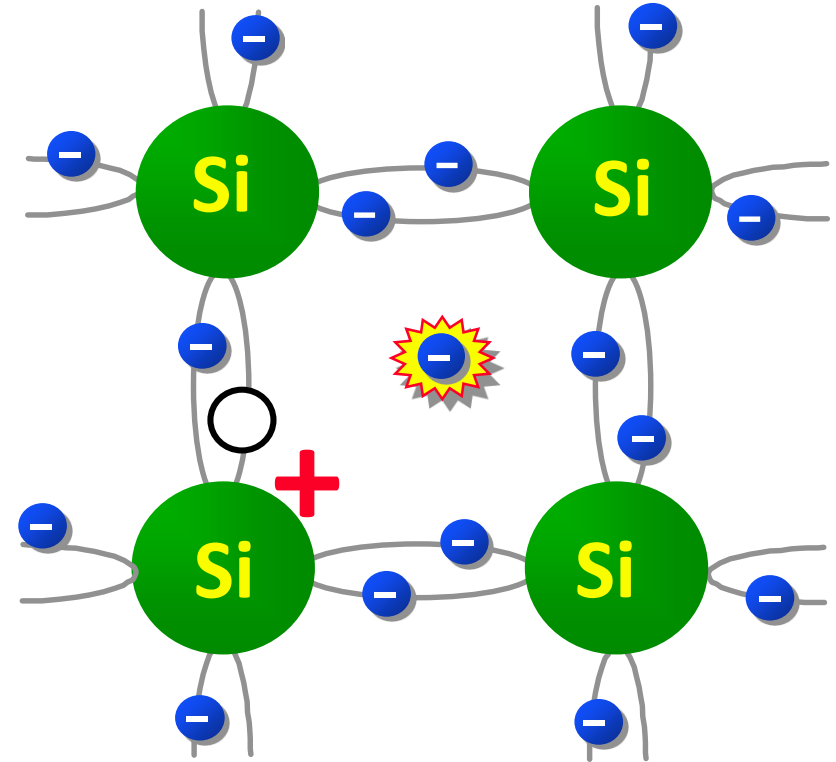


Power Supply
Systems

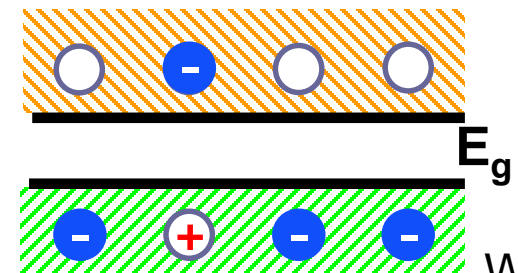
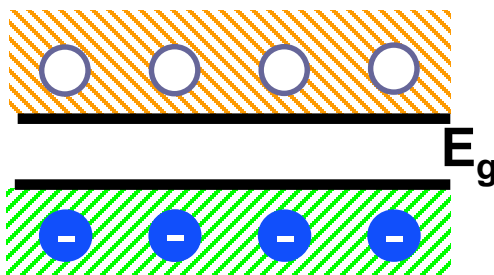
Generación y recombinación en el diagrama de bandas de energía



Generación



Recombinación

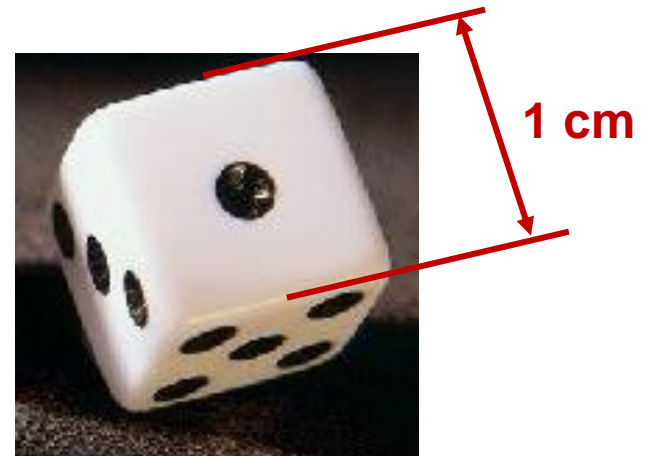




Concepto de concentración intrínseca

Mide cuántos electrones “saltan”

- Es el número de electrones que “han saltado” (y que serán capaces de conducir corriente eléctrica) que hay en el “dado” de 1 cm³ de material semiconductor puro. Se representa por n_i .
- El número de electrones en el “dado” se representa por n y el de huecos por p . En un semiconductor “puro” (intrínseco), se cumple $n = p = n_i$.



¿Cómo se relacionan n_i y E_g ?

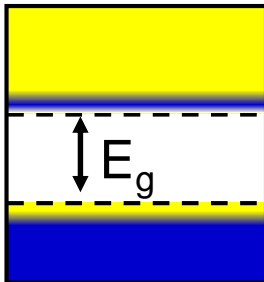


Relación entre E_g y n_i para diversos materiales

Power Supply
Systems



Dado de
semiconductor
intrínseco

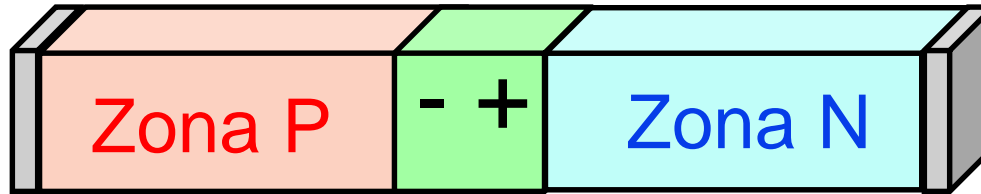


Material	Energía del gap E_g [eV]	n_i a temperatura ambiente [elect./cm ³]
Ge	0,66	$2,4 \cdot 10^{13}$
Si	1,1	$1,5 \cdot 10^{10}$
GaAs	1,4	$1,8 \cdot 10^6$
3C – SiC	2,2	6,9
6H – SiC	3,0	$2,3 \cdot 10^{-6}$
4H - SiC	3,26	$8,2 \cdot 10^{-9}$
GaN	3,39	$1,9 \cdot 10^{-10}$



¿Es bueno o es malo que n_i sea grande?

Ejemplo con un diodo de silicio @ 25°C ($n_i \approx 10^{10}$ elect./cm³):



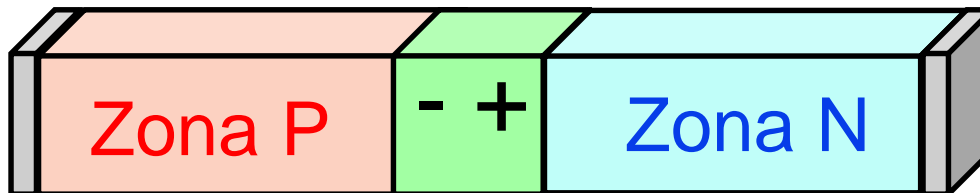
$$p_{\text{zona_P}} = 10^{15} \text{ huecos/cm}^3$$

$$n_{\text{zona_P}} = 10^5 \text{ electrones/cm}^3$$

$$n_{\text{zona_N}} = 10^{15} \text{ electrones/cm}^3$$

$$p_{\text{zona_N}} = 10^5 \text{ huecos/cm}^3$$

Mismo diodo @ 200°C ($n_i \approx 10^{14}$ elect./cm³):



$$p_{\text{zona_P}} = 10^{15} \text{ huecos/cm}^3$$

$$n_{\text{zona_P}} = 10^{13} \text{ electrones/cm}^3$$

$$n_{\text{zona_N}} = 10^{15} \text{ electrones/cm}^3$$

$$p_{\text{zona_N}} = 10^{13} \text{ huecos/cm}^3$$

!!!Demasiado parecidos!!!



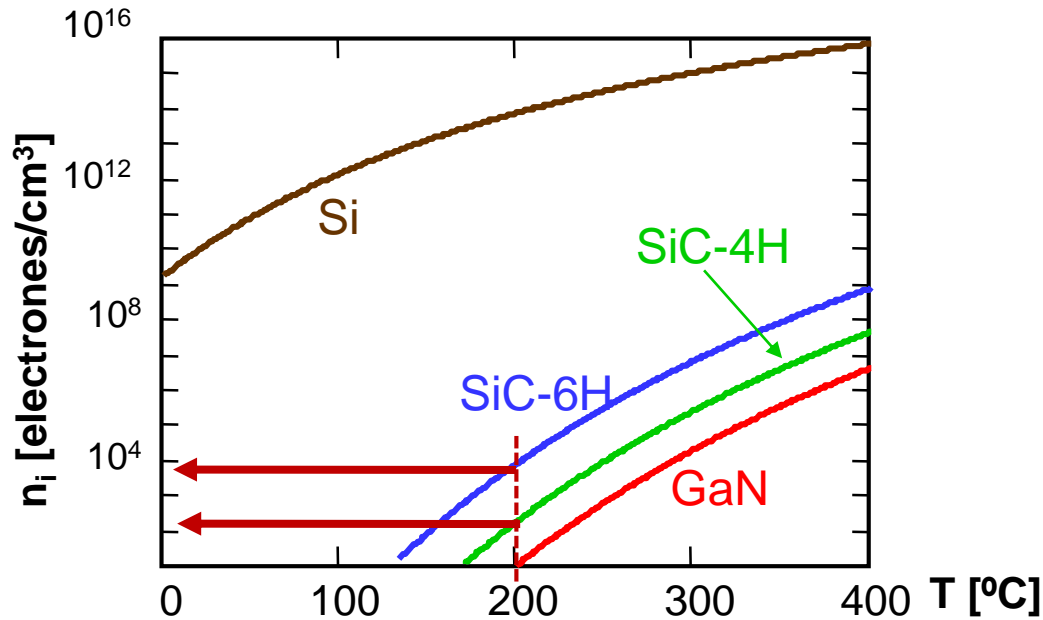
Guía de la presentación

Power Supply
Systems

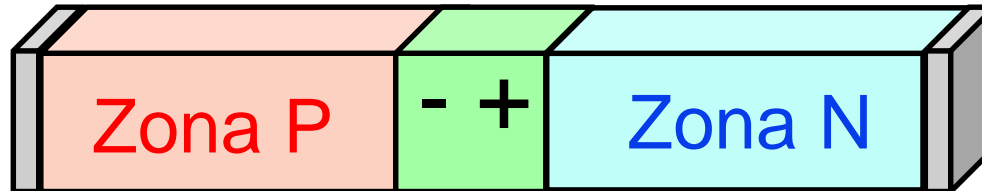
- Introducción: lo mínimo imprescindible a conocer sobre semiconductores.
- ✓ **¿Por qué dispositivos de banda prohibida ancha en electrónica de potencia?: propiedades, ventajas y limitaciones del SiC y del GaN.**
- Diodos de SiC: Diodos Schottky, bipolares y mixtos.
- Dispositivos "normalmente cerrados" en SiC: JFETs.
- Dispositivos "normalmente abiertos" en SiC: JFETs y MOSFETs.
- Dispositivos de alta movilidad de electrones en GaN: el HEMT de GaN.

¿Cómo evitar este problema?

- La solución es un material con n_i mucho menor (E_g mayor).



Diodo de SiC -6H @ 200°C ($n_i \approx 10^4$ elect./cm³):



$$p_{\text{zona_P}} = 10^{15} \text{ huecos/cm}^3$$

$$n_{\text{zona_P}} = 10^{-7} \text{ electrones/cm}^3$$

$$n_{\text{zona_N}} = 10^{15} \text{ electrones/cm}^3$$

$$p_{\text{zona_N}} = 10^{-7} \text{ huecos/cm}^3$$



¿Pero, por qué SiC y GaN y no otros materiales de E_g grande?

Material	Energía del gap E_g [eV]	Concentración intrínseca n_i [cm ⁻³] @ 300 °K	Movilidad de los electrones μ_n [cm ² /V·s]	Velocidad de saturación v_{sat} [cm/s]	Campo eléctrico de ruptura E_{rup} [V/cm]	Conductividad térmica λ [W/cm·°K]
Ge	0,66	$2,4 \cdot 10^{13}$	3900	$0,1 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^5$	0,6
Si	1,1	$1,5 \cdot 10^6$	1350	$1 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^5$	1,5
GaAs	1,4	$1,8 \cdot 10^6$	8500	$2 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^5$	0,5
3C – SiC	2,2	6,9	900	$2 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^6$	4,5
6H – SiC	3,0	$2,3 \cdot 10^{-6}$	370	$2 \cdot 10^7$	$2,4 \cdot 10^6$	4,5
4H - SiC	3,26	$8,2 \cdot 10^{-9}$	720	$2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^6$	4,5
GaN	3,39	$1,9 \cdot 10^{-10}$	900	$2,5 \cdot 10^7$	$3,3 \cdot 10^6$	1,3

Rápido

No alta tensión
Alta tensión

Mala refrigeración

Como el Si

4H-SiC y GaN reúnen las mejores condiciones reales actualmente



¿Por qué es tan importante el campo máximo de ruptura E_{rup} ?

Porque determina la tensión máxima inversa que puede soportar una unión PN en un dispositivo de potencia

Los fenómenos que la determinan son:

- **Perforación (*punch-through*)**
 - **Ruptura por avalancha primaria**
 - Directamente relacionado con E_{rup} .
- Directamente relacionado la longitud de la zona de transición (de carga espacial) de la unión. Indirectamente relacionado con E_{rup} .

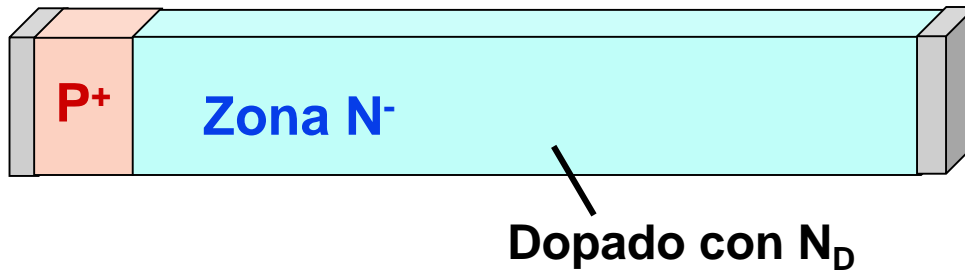


Construimos dos uniones, una de Si y otra de SiC,
que soporten la misma tensión máxima

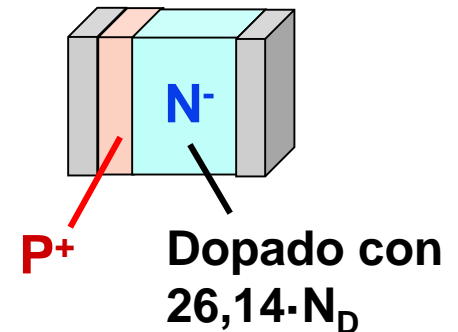
Utilizamos el desarrollo teórico del Apéndice I



Unión de Si



Unión de SiC



R_{N_Si} : resistencia de la zona N con Si.

R_{N_SiC} : resistencia de la zona N con SiC.

$$R_{N_SiC} = R_{N_Si} / 92,94$$

- Más dopada
- Más corta
- Mucha menor resistencia



Resumen de la comparación de las uniones de SiC y de Si

- Si queremos que soporten **la misma tensión**, la de SiC es **93 veces menos resistiva**.
- Si queremos que tengan **la misma resistencia**, la de SiC soporta **9,6 veces más tensión** (haciendo cálculos semejantes).





¿Son el SiC y el GaN la “panacea” de los materiales semiconductores?

Problemas

$$V_0 = V_T \cdot \ln(N_A \cdot N_D / n_i^2)$$

↑

- Mayores “tensiones de codo” (inherente a n_i muy bajo).
- Difíciles de hacer crecer sin defectos (dos átomos distintos).
- Más caros.
- Muy sensibles a los defectos en la red.
- Problemas en la activación de iones (SiC).
- Problemas con las obleas tipo P (SiC).
- Degeneración bipolar (SiC).
- Sin óxido nativo.
- Efectos piezoeléctricos (GaN).
- Colapso de drenador (HEMT de GaN).

Pero, ¡se van solucionando!

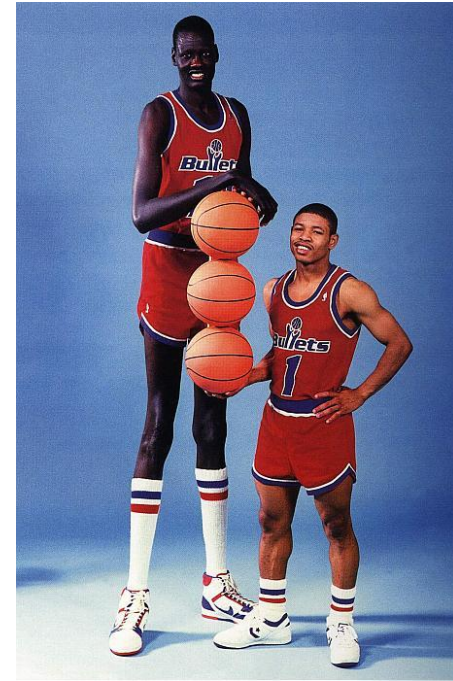


Power Supply
Systems

Comparación

¡¡Noticia!!:

- En una isla perdida en el Pacífico se ha encontrado una raza desconocida de seres humanos extraordinariamente altos (3 metros de media).
- Se espera que acaben siendo magníficos jugadores de baloncesto.
- Pero la comunicación con ellos es muy difícil y tardarán en aprender las reglas de este deporte.
- Estamos aprendiendo a enseñarles.





Guía de la presentación

Power Supply
Systems

- Introducción: lo mínimo imprescindible a conocer sobre semiconductores.
- ¿Por qué dispositivos de banda prohibida ancha en electrónica de potencia?: propiedades, ventajas y limitaciones del SiC y del GaN.
- ✓ **Diodos de SiC: Diodos Schottky, bipolares y mixtos.**
- Dispositivos "normalmente cerrados" en SiC: JFETs.
- Dispositivos "normalmente abiertos" en SiC: JFETs y MOSFETs.
- Dispositivos de alta movilidad de electrones en GaN: el HEMT de GaN.

Diodos de SiC



Power Supply
Systems

➤ Tipos:

- Diodos de Schottky (hasta $\approx 600 - 1200$ V).
- Diodos PN y PIN (varios kV).
- Diodos mixtos (tensiones intermedias).

➤ Características:

- Tecnología madura. Varias opciones comerciales.
- Cuanto más Schottky, más rápido y menor caída en conducción; sin embargo, menor tensión inversa máxima y más fugas. Cuanto más bipolar (PN), lo contrario.





Power Supply
Systems

Ejemplo de diodo Schottky de SiC que fabricaba SemiSouth



Silicon Carbide
SDA05S120

Silicon Carbide Power Schottky Diode

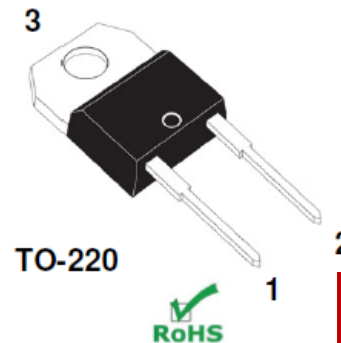
Features:

- Positive Temperature Coefficient for Ease of Paralleling
- Temperature Independent Switching Behavior
- 175 °C Maximum Operating Temperature
- Zero Reverse Recovery Current
- Zero Forward Recovery Voltage

Product Summary		
V_{DC}	1200	V
I_F	5	A
Q_c	20	nC

Applications:

- Solar Inverter
- SMPS
- Power Factor Correction
- Induction Heating
- UPS
- Motor Drive



¿Alta temperatura?



Guía de la presentación

Power Supply
Systems

- Introducción: lo mínimo imprescindible a conocer sobre semiconductores.
- ¿Por qué dispositivos de banda prohibida ancha en electrónica de potencia?: propiedades, ventajas y limitaciones del SiC y del GaN.
- Diodos de SiC: Diodos Schottky, bipolares y mixtos.
- Dispositivos "normalmente cerrados" en SiC: JFETs.**
- Dispositivos "normalmente abiertos" en SiC: JFETs y MOSFETs.
- Dispositivos de alta movilidad de electrones en GaN: el HEMT de GaN.



El transistor de efecto de campo de unión (JFET) de SiC

Ventajas:

- ✓ Es un dispositivo de conducción unipolar.
- ✓ No es bipolar \Rightarrow Sin degeneración bipolar.
- ✓ Es rápido.
- ✓ Se fabrica partiendo de obleas N.
- ✓ Su estructura es simple.
- ✓ Bastante maduro.

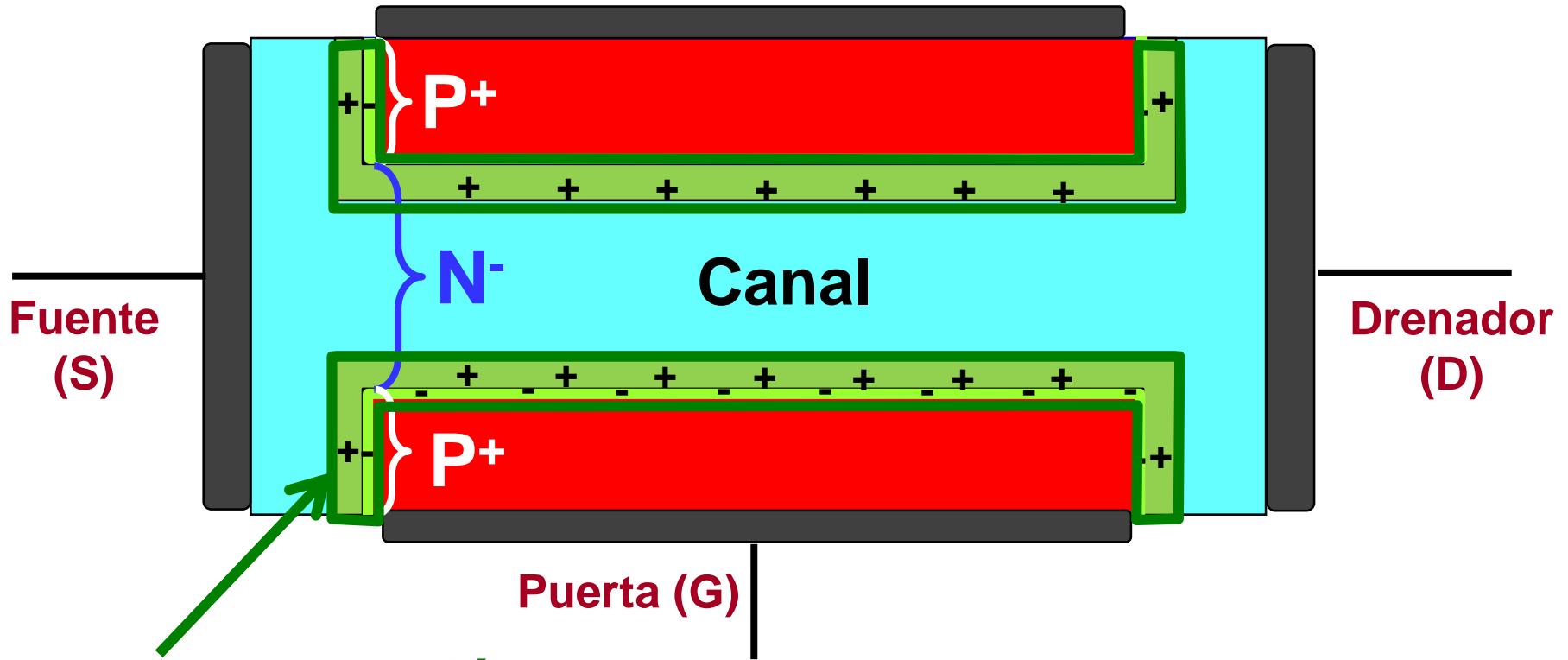
Desventajas:

- ☒ Es “normalmente cerrado” (normally-on”).
- ☒ Se controla con tensión negativa.

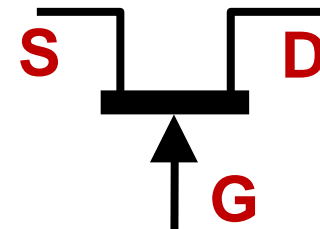


Teoría básica del JFET: estructura

Power Supply
Systems

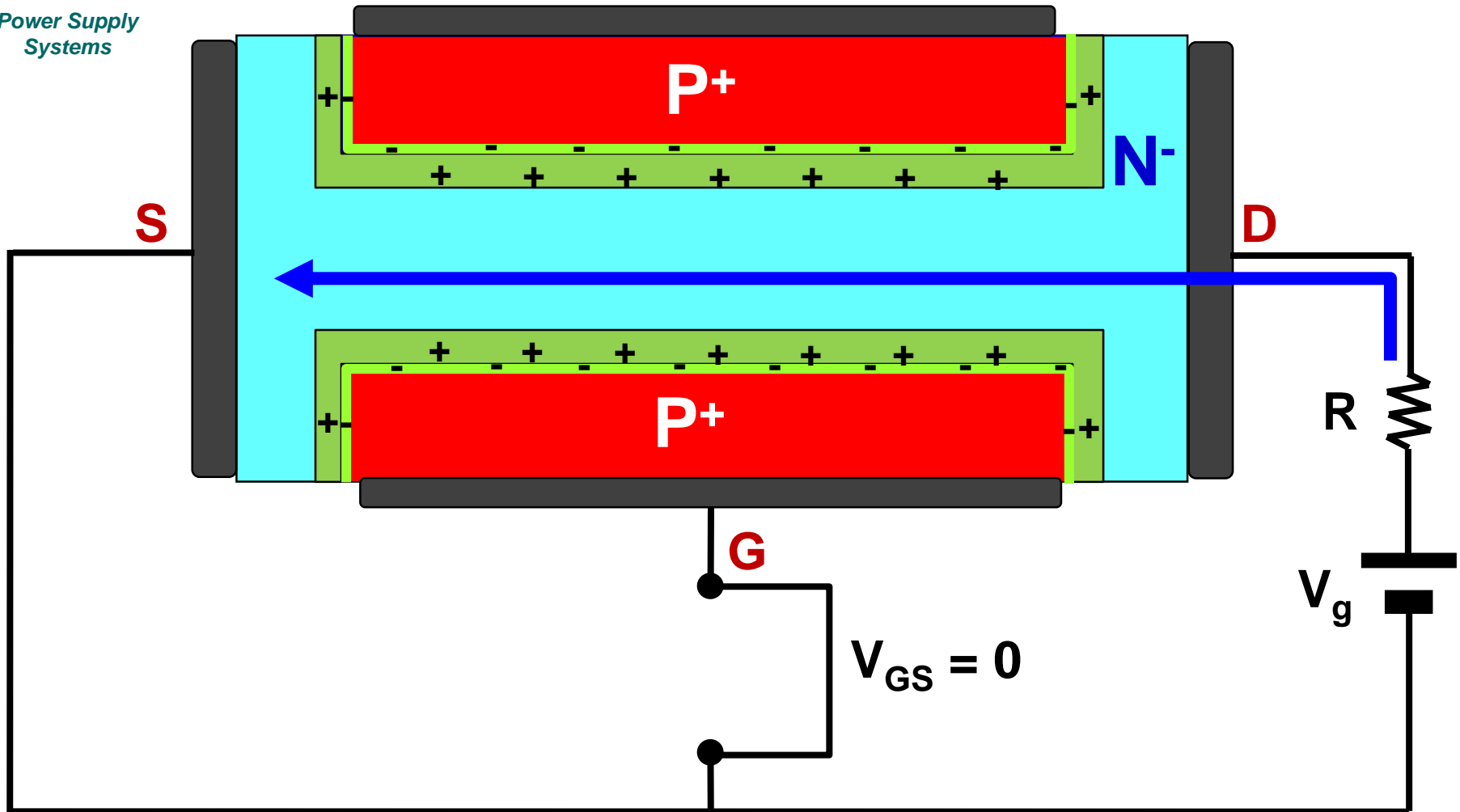


Zona de transición
(sin portadores de carga, sólo con iones)





Teoría básica del JFET: operación en conducción

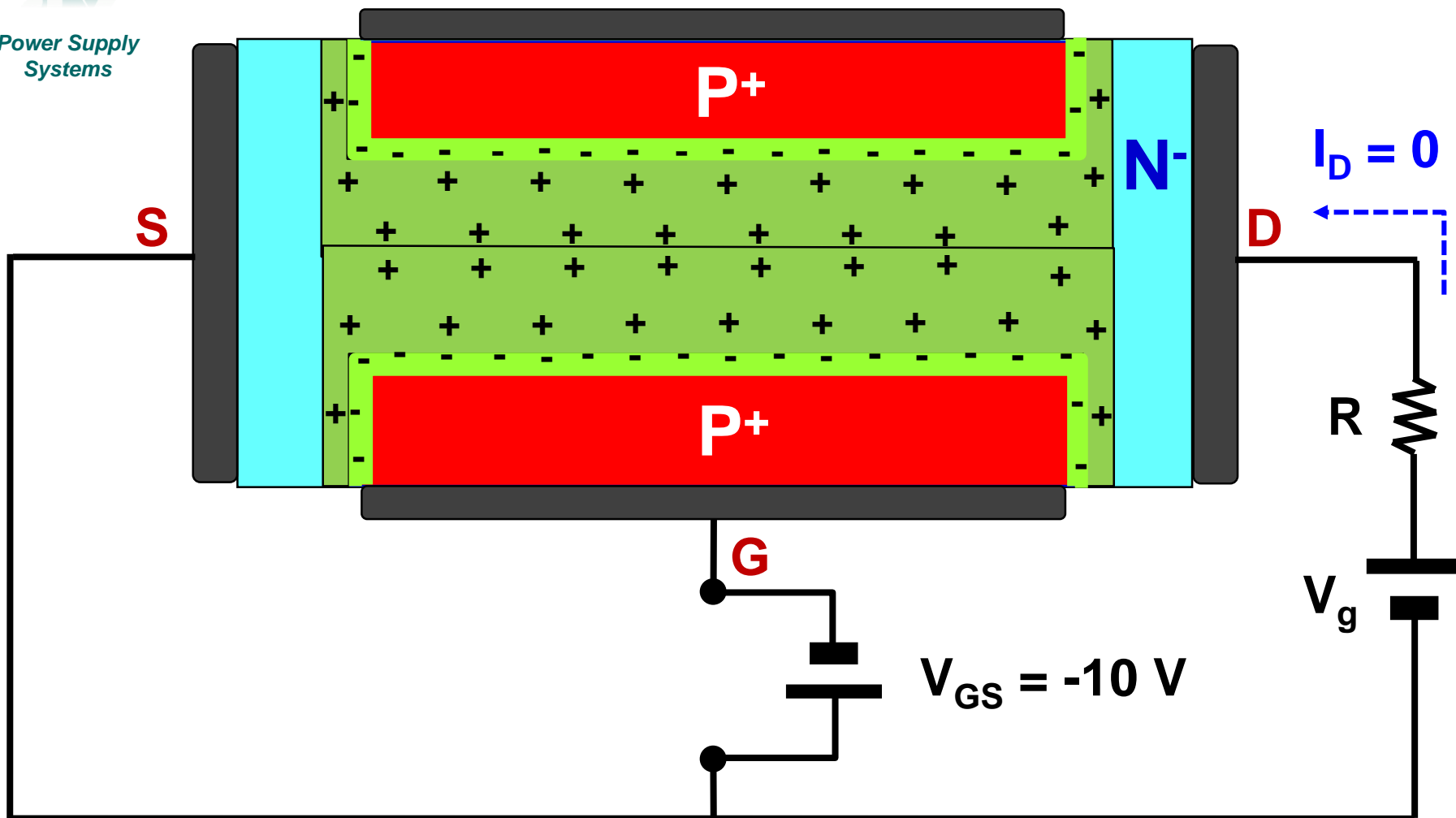


Con $V_{GS} = 0$ V hay corriente fuerte por drenador (interruptor cerrado)



Teoría básica del JFET: operación en bloqueo

Power Supply
Systems



Con $V_{GS} = -10\text{ V}$ no hay corriente de drenador (interruptor cerrado)



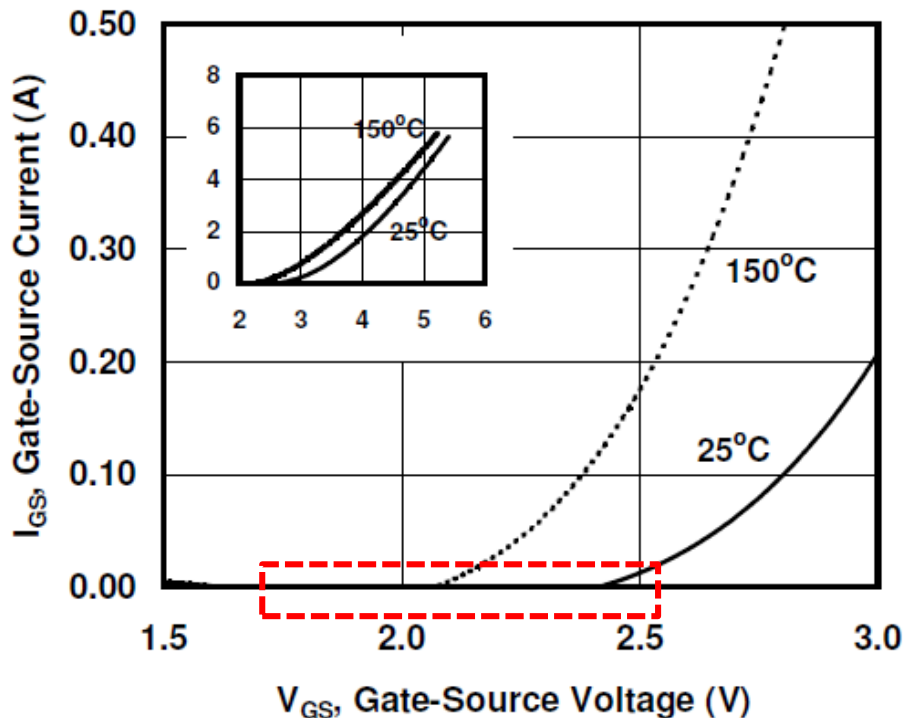
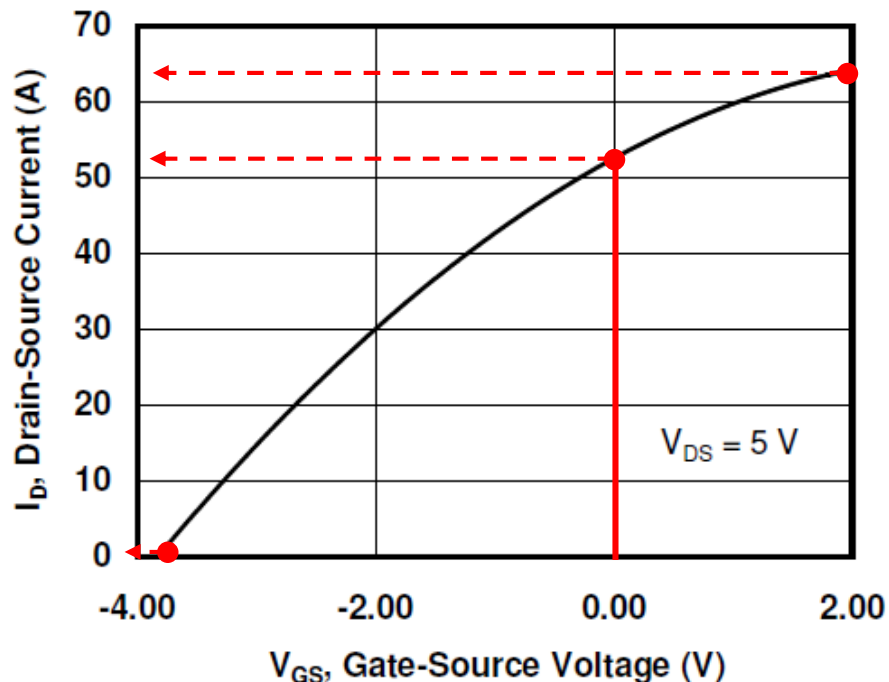
Power Supply
Systems

Ejemplo de curvas de transferencia y de entrada

SemiSouth

PRELIMINARY

Silicon Carbide
SJDP120R085



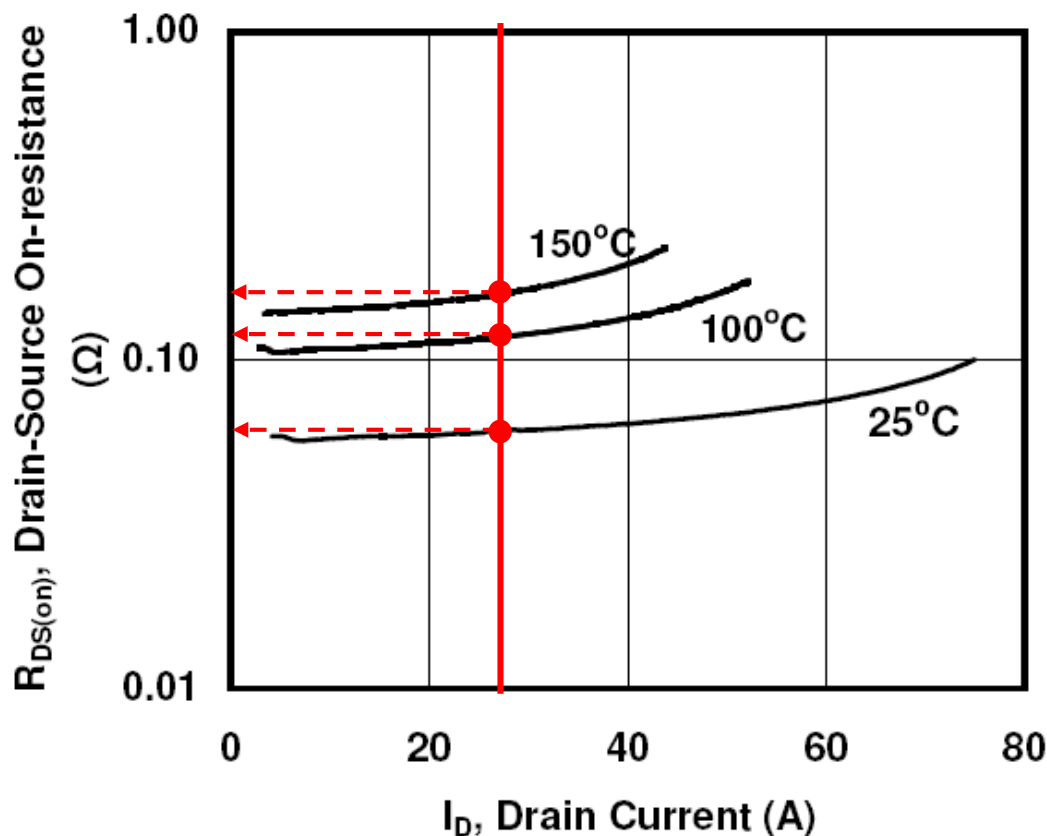
- Fuerte conducción con $V_{GS} = 0\text{ V}$.
- Bloqueo con $V_{GS} = -4\text{ V}$.
- Mejora la conducción con $V_{GS} = 2\text{ V}$.
- Tensión de codo en la unión puerta-fuente de 2,1-2,4 V.



Ejemplo de curvas de resistencia de drenador

Figure 6. Drain-Source On-resistance

$$R_{DS(on)} = f(I_D); V_{GS} = 2.0; \text{parameter: } T_j$$

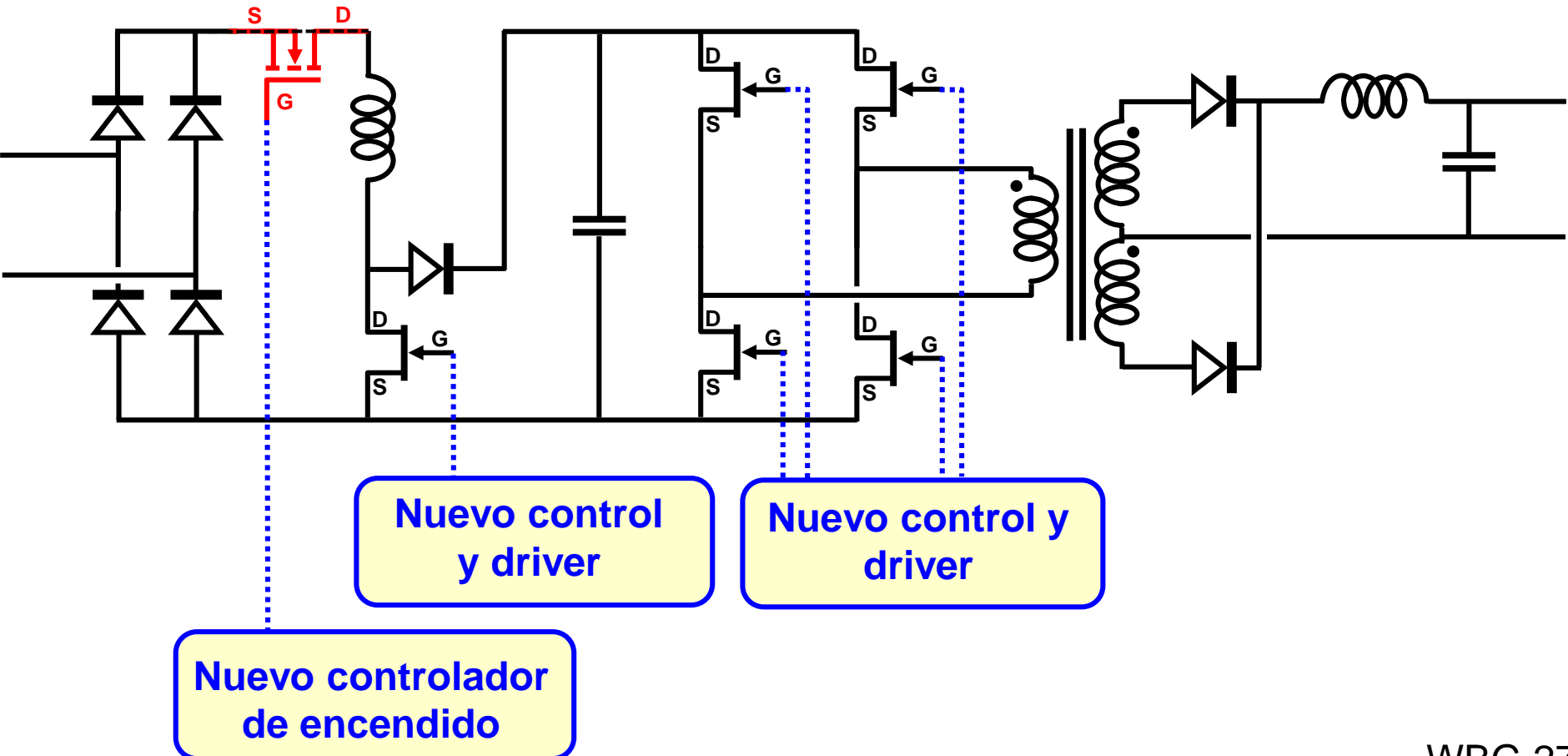


- Peligro de embalamiento térmico.
- Aunque potencial buen paralelizado.



Influencia del hecho de ser “normalmente cerrado” en las topologías

Ejemplo: Fuente de alimentación con JFETs de SiC “normalmente cerrados”

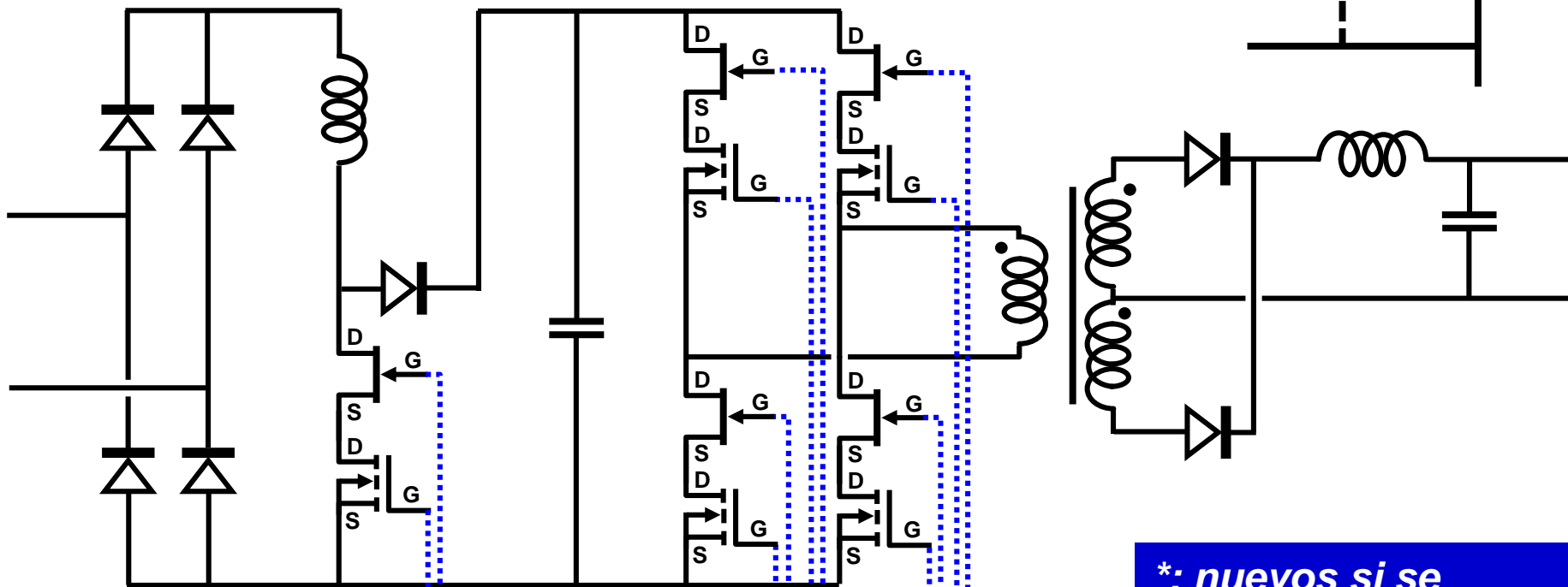




Una alternativa: el cascode JFET-SiC + MOSFET-Si

¡Se pierden las ventajas en temperatura!
(no es problema, ya que no existen de momento)

Ejemplo: Fuente de alimentación con cascodos



Control y
driver*

Control y driver*

*: nuevos si se
controla la puerta
del JFET; estándar
en caso contrario

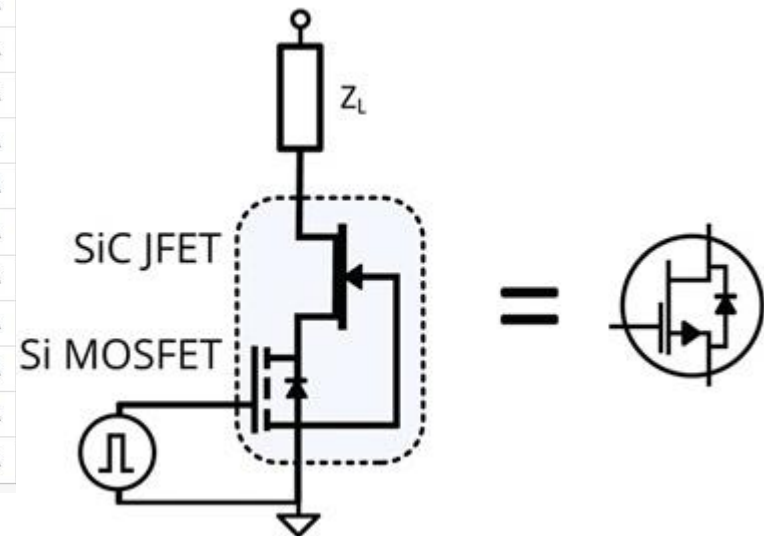


Power Supply
Systems

Cascodos JFET-SiC + MOSFET-Si "integrados"



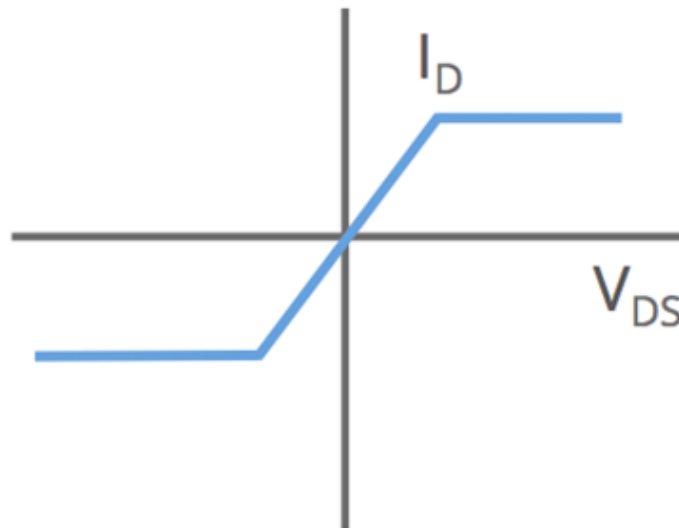
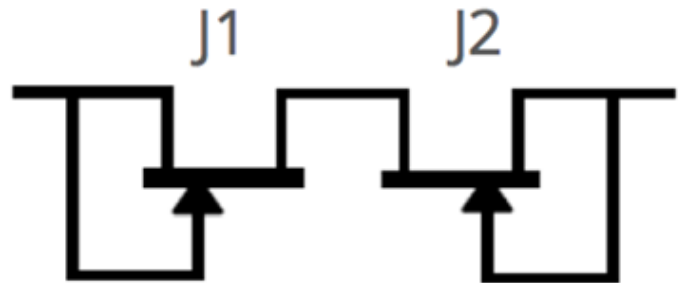
New	Part Number ▲	Package ▲	V ▲	RDS(on) typ ▲	Id max ▲	Data Sheet ▲	SPICE Model ▲	Buy Now ▲	Samples
	Part Number								
✓	UJ3C065080K3S	TO-247-3L	650 V	80 mΩ	31.0 A	Data Sheet	<input type="text" value="SPICE"/>	Order Online	
✓	UJ3C065030K3S	TO-247-3L	650 V	30 mΩ	85.0 A	Data Sheet	<input type="text" value="SPICE"/>	Order Online	
✓	UJ3C065080B3	D*PAK-3L	650 V	80 mΩ	25.0 A	Data Sheet	<input type="text" value="SPICE"/>	Order Online	
✓	UJ3C065030B3	D*PAK-3L	650 V	27 mΩ	66.0 A	Data Sheet	<input type="text" value="SPICE"/>	Order Online	
✓	UJ3C065080T3S	TO-220-3L	650 V	80 mΩ	31.0 A	Data Sheet	<input type="text" value="SPICE"/>	Order Online	
✓	UJ3C065030T3S	TO-220-3L	650 V	27 mΩ	85.0 A	Data Sheet	<input type="text" value="SPICE"/>	Order Online	
✓	UF3C065030K4S	TO-247-4L	650 V	30 mΩ	85.0 A	Data Sheet	<input type="text" value="SPICE"/>	Order Online	
✓	UF3C065080K4S	TO-247-4L	650 V	80 mΩ	31.0 A	Data Sheet	<input type="text" value="SPICE"/>	Order Online	
✓	UF3C065040K3S	TO-247-3L	650 V	42 mΩ	54.0 A	Data Sheet	<input type="text" value="SPICE"/>	Order Online	
✓	UF3C065030K3S	TO-247-3L	650 V	30 mΩ	85.0 A	Data Sheet	<input type="text" value="SPICE"/>	Order Online	
✓	UF3C065040T3S	TO-220-3L	650 V	42 mΩ	54.0 A	Data Sheet	<input type="text" value="SPICE"/>	Order Online	
✓	UF3C065040K4S	TO-247-4L	650 V	42 mΩ	54.0 A	Data Sheet	<input type="text" value="SPICE"/>	Order Online	
✓	UF3C065040B3	D*PAK-3L	650 V	42 mΩ	41.0 A	Data Sheet	<input type="text" value="SPICE"/>	Order Online	
✓	UF3C065030T3S	TO-220-3L	650 V	27 mΩ	85.0 A	Data Sheet	<input type="text" value="SPICE"/>	Order Online	
✓	UJ3C120080K3S	TO-247-3L	1200 V	80 mΩ	33.0 A	Data Sheet	<input type="text" value="SPICE"/>	Order Online	
✓	UJ3C120040K3S	TO-247-3L	1200 V	35 mΩ	65.0 A	Data Sheet	<input type="text" value="SPICE"/>	Order Online	
✓	UF3C120040K3S	TO-247-3L	1200 V	35 mΩ	65.0 A	Data Sheet	<input type="text" value="SPICE"/>	Order Online	
✓	UF3C120040K4S	TO-247-4L	1200 V	35 mΩ	65.0 A	Data Sheet	<input type="text" value="SPICE"/>	Order Online	
✓	UF3C120080K4S	TO-247-4L	1200 V	80 mΩ	33.0 A	Data Sheet	<input type="text" value="SPICE"/>	Order Online	
✓	UJ3C120150K3S	TO-247-3L	1200 V	150 mΩ	18.4 A	Data Sheet	<input type="text" value="SPICE"/>	Order Online	





USiC: Inventando usos para los JFETs (I)

Back-to-back normally-on JFETs support bidirectional current limiting

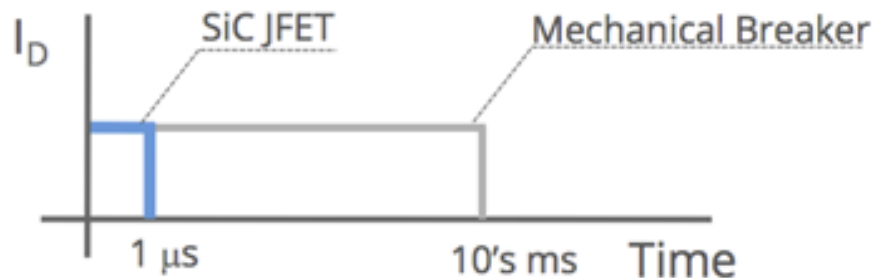
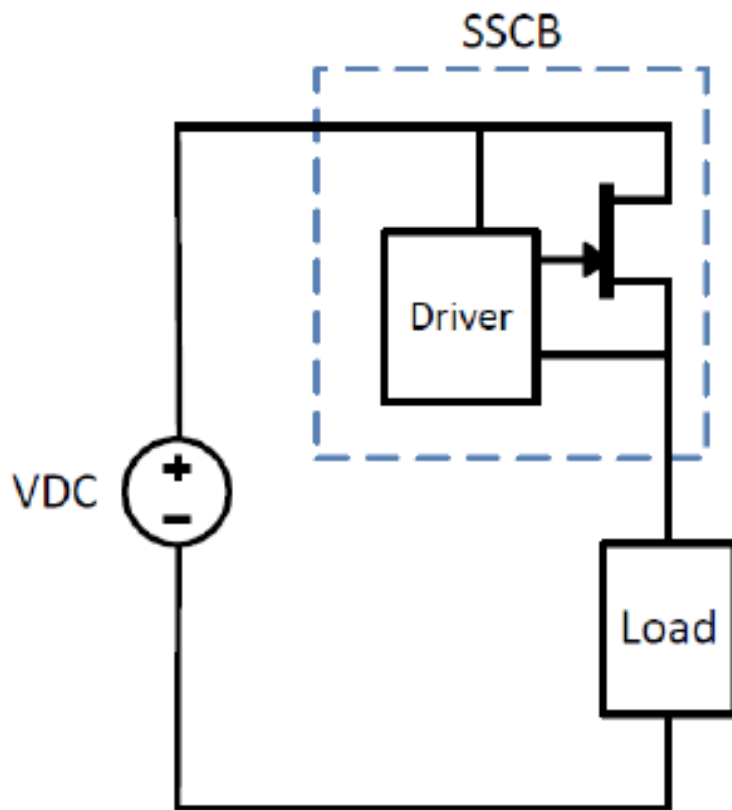


Low series resistance, excellent current limiting behavior



USiC: Inventando usos para los JFETs (II)

Normally-on JFETs create self-powered two-terminal fast acting circuit breakers



High Side Switch (DC Breaker)



Power Supply
Systems





Guía de la presentación

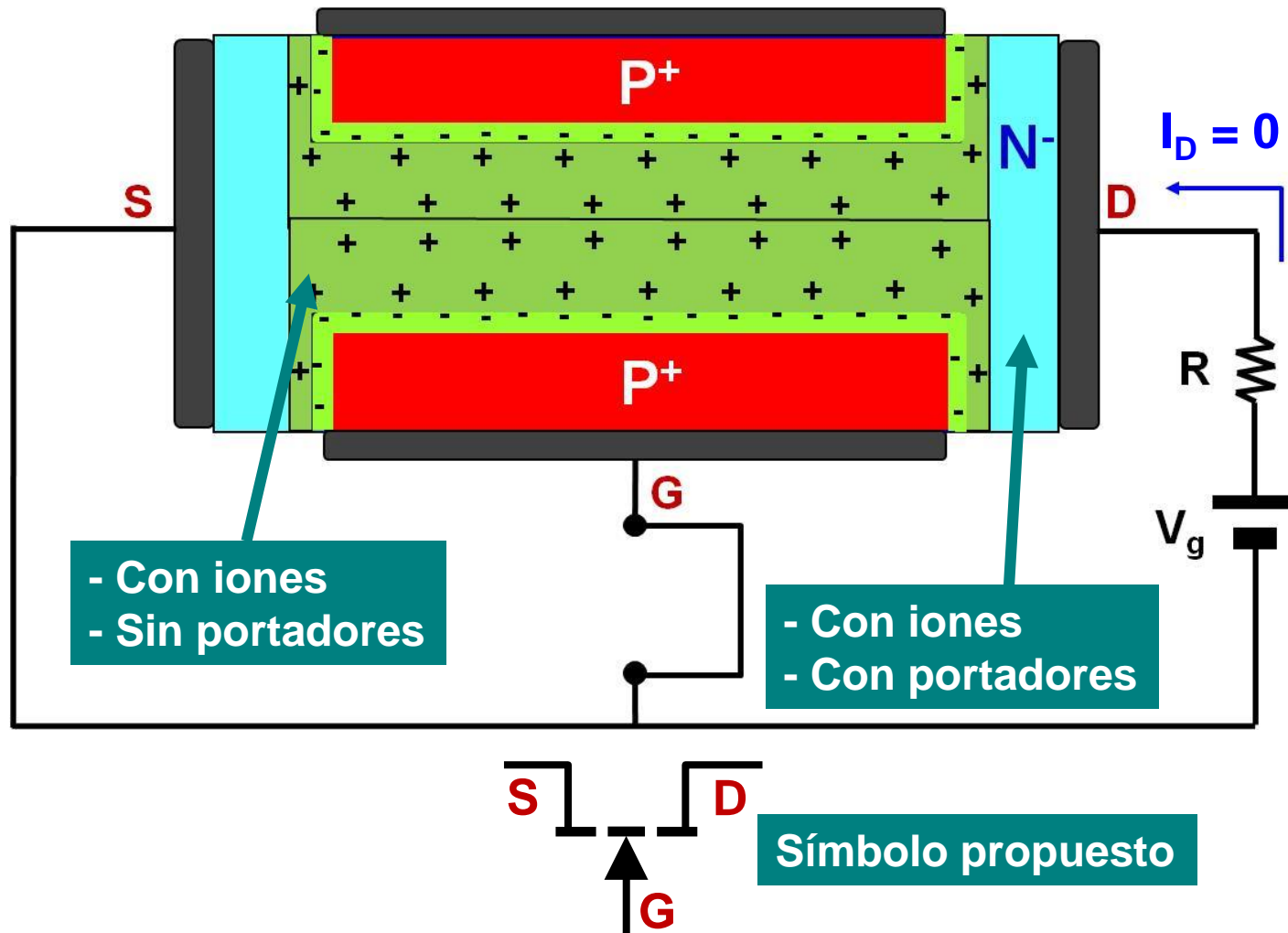
Power Supply
Systems

- Introducción: lo mínimo imprescindible a conocer sobre semiconductores.
- ¿Por qué dispositivos de banda prohibida ancha en electrónica de potencia?: propiedades, ventajas y limitaciones del SiC y del GaN.
- Diodos de SiC: Diodos Schottky, bipolares y mixtos.
- Dispositivos "normalmente cerrados" en SiC: JFETs.
- Dispositivos "normalmente abiertos" en SiC: JFETs y MOSFETs.**
- Dispositivos de alta movilidad de electrones en GaN: el HEMT de GaN.



¿Se puede hacer un JFET “normalmente abierto”?

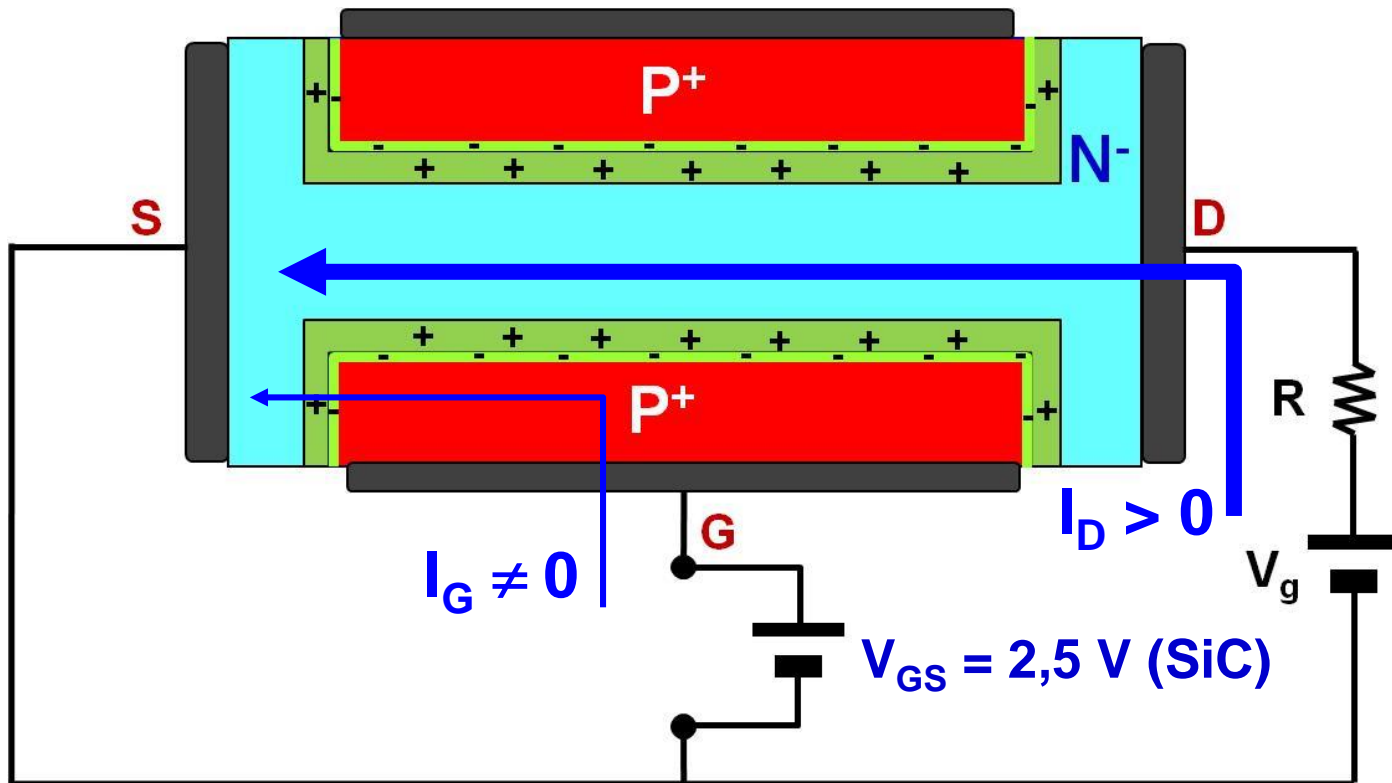
- Sí, si se diseña de tal forma que con tensión nula en la puerta no exista canal, porque las zonas de transición “se toquen”.





¿Cómo se consigue que un JFET “normalmente abierto” conduzca?

- Hay que polarizar directamente la unión puerta fuente para que la zona de transición se haga estrecha.



- ¡¡¡Ojo, puede entrar corriente por la puerta!!!
- Se necesitan “drivers” especiales



Power Supply
Systems

Ejemplo de JFET “normalmente abiertos” que fabricaba SemiSouth



PRELIMINARY

Silicon Carbide

SJEP120R063

Normally-OFF Trench Silicon Carbide Power JFET

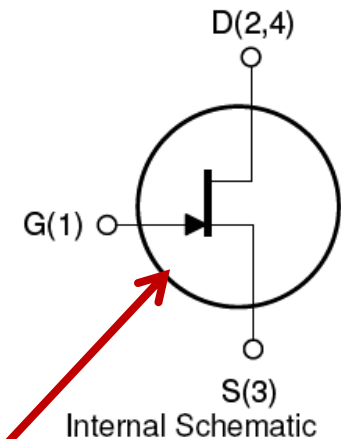
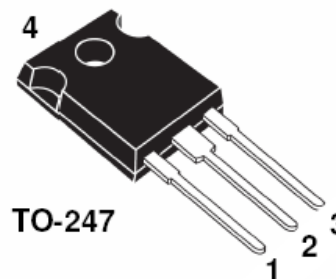
Features:

- Compatible with Standard Gate Driver ICs
- Positive Temperature Coefficient for Ease of Paralleling
- Temperature Independent Switching Behavior
- 175 °C Maximum Operating Temperature
- $R_{DS(on)max}$ of 0.063 Ω
- Voltage Controlled
- Low Gate Charge
- Low Intrinsic Capacitance

Applications:

- Solar Inverter
- SMPS
- Power Factor Correction
- Induction Heating
- UPS
- Motor Drive

Product Summary		
BV_{DS}	1200	V
$R_{DS(on)max}$	0.063	Ω
$E_{TS,typ}$	440	μJ



Este símbolo es equívoco



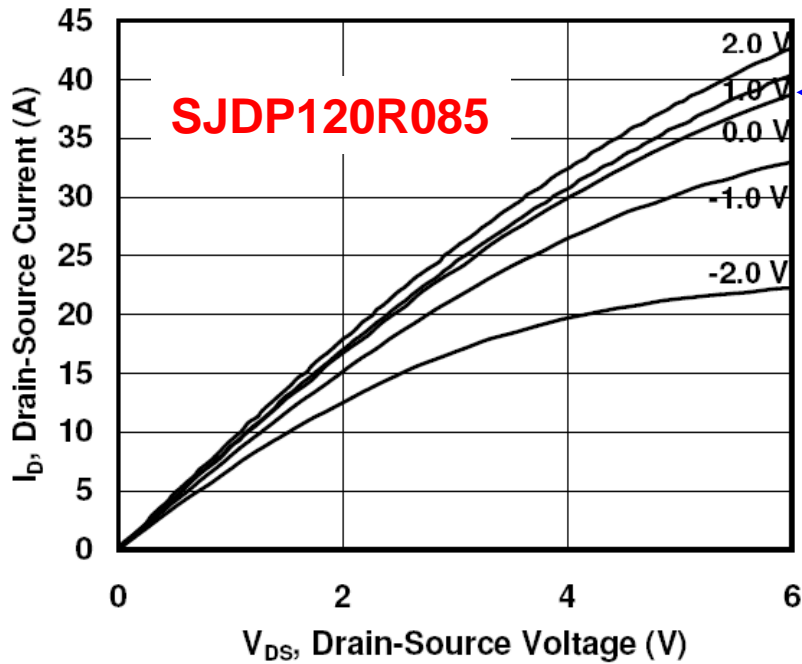
Power Supply
Systems

Comparación de curvas características de JFETs de SiC que fabricaba SemiSouth



Figure 2. Typical Output Characteristics

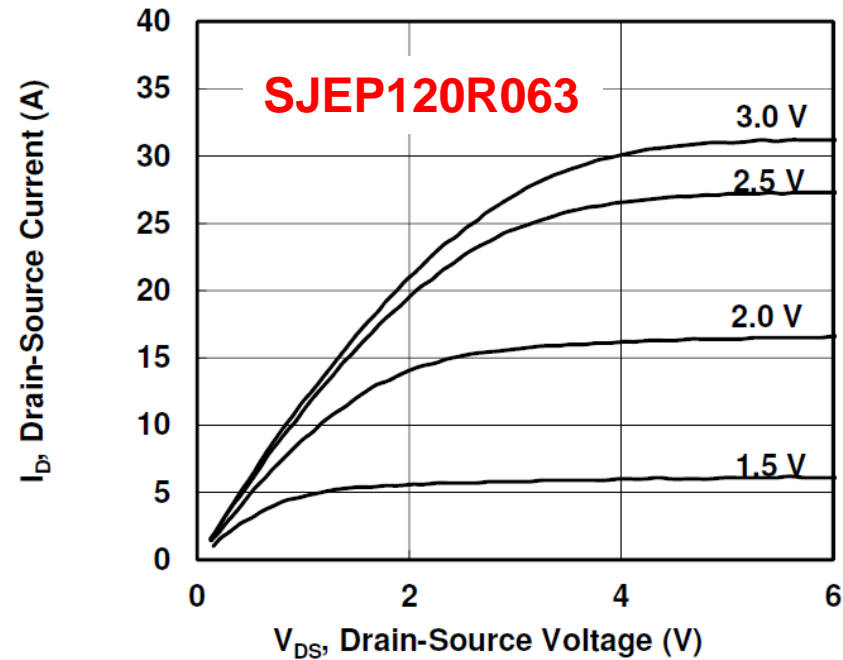
$I_D = f(V_{DS}); T_j = 100\text{ }^\circ\text{C}; \text{parameter: } V_{GS}$



JFET “normalmente cerrado”

Figure 2. Typical Output Characteristics

$I_D = f(V_{DS}); T_j = 100\text{ }^\circ\text{C}; \text{parameter: } V_{GS}$



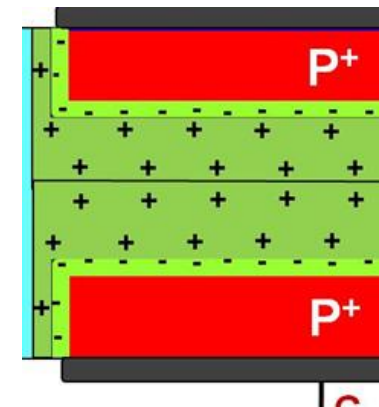
JFET “normalmente abierto”



La extinción de los JFETs “normalmente abiertos”



- SemiSouth desapareció.
- GeneSiC reniega de ellos.
- Infineon (Wolfspeed) ni quiere oír hablar de ellos.
- El problema era “acertar”, en el proceso de fabricación, en el ancho del canal.



Los “Junction Transistors” de GeneSiC



Power Supply Systems


A-GA10JT12

Normally – OFF Silicon Carbide Super Junction Transistor

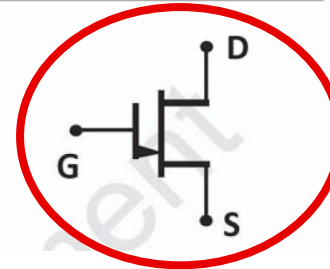
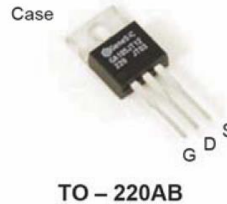
¡Han cambiado el nombre!

V_{DS}	=	1200 V
I_D	=	7 A
$R_{DS(ON)}$	=	220 m Ω

Features

- 225 °C maximum operating temperature
- Best in class temperature independent switching and blocking performance
- Lowest $V_{DS(ON)}$ as compared to any other SiC switch
- Suitable for connecting an anti-parallel diode
- Gate oxide free SiC switch
- Positive temperature coefficient for easy paralleling
- Low gate charge
- Low intrinsic capacitance

Package



¡Han cambiado el símbolo!

¡Terminales S, G y D en un bipolar!


GA10JT12-247

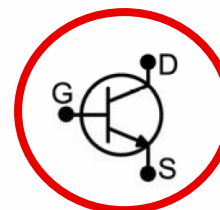
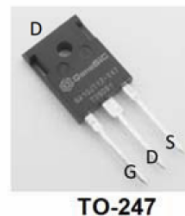
Normally – OFF Silicon Carbide Junction Transistor

V_{DS}	=	1200 V
$R_{DS(ON)}$	=	100 m Ω
$I_D (T_c = 25^\circ\text{C})$	=	25 A
$I_D (T_c > 125^\circ\text{C})$	=	10 A
$h_{FE} (T_c = 25^\circ\text{C})$	=	100

Features

- 175 °C Maximum Operating Temperature
- Gate Oxide Free SiC Switch
- Exceptional Safe Operating Area
- Excellent Gain Linearity
- Temperature Independent Switching Performance
- Low Output Capacitance
- Positive Temperature Coefficient of $R_{DS,ON}$
- Suitable for Connecting an Anti-parallel Diode

Package





















¡Hablan de “beta”!



Transistores GeneSiC para “alta temperatura” (225°C)

Power Supply
Systems



Part No. ▲	V _{DS} (V) ▲	R _{DS(ON)} (mΩ) ▲	I _D (A) ▲	h _{FE} (A/A) ▲	Package ▲	Designation ▲	Symbol ▲	SPICE Model ▲
GA05JT01-46	100	240	9	110		TO-46		GA05JT01-46-SPC
GA05JT03-46	300	240	9	110		TO-46		GA05JT03-46-SPC
2N7635-GA	600	425	10	110		TO-257		2N7635-GA-SPC
2N7636-GA	600	425	10	110		SMD0.5/TO-276		2N7636-GA-SPC
2N7637-GA	600	170	20	110		TO-257		2N7637-GA-SPC
2N7638-GA	600	180	20	110		SMD0.5/TO-276		2N7638-GA-SPC
2N7639-GA	600	60	32	80		TO-257		2N7639-GA-SPC
2N7640-GA	600	60	32	80		SMD0.5/TO-276		2N7640-GA-SPC
GA50JT06-258	600	25	100	100		TO-258		GA50JT06-258-SPC



¡Baja tensión
(para ser SiC)!



Evolución de los transistores de SiC

*Power Supply
Systems*



JFET “nor-on”

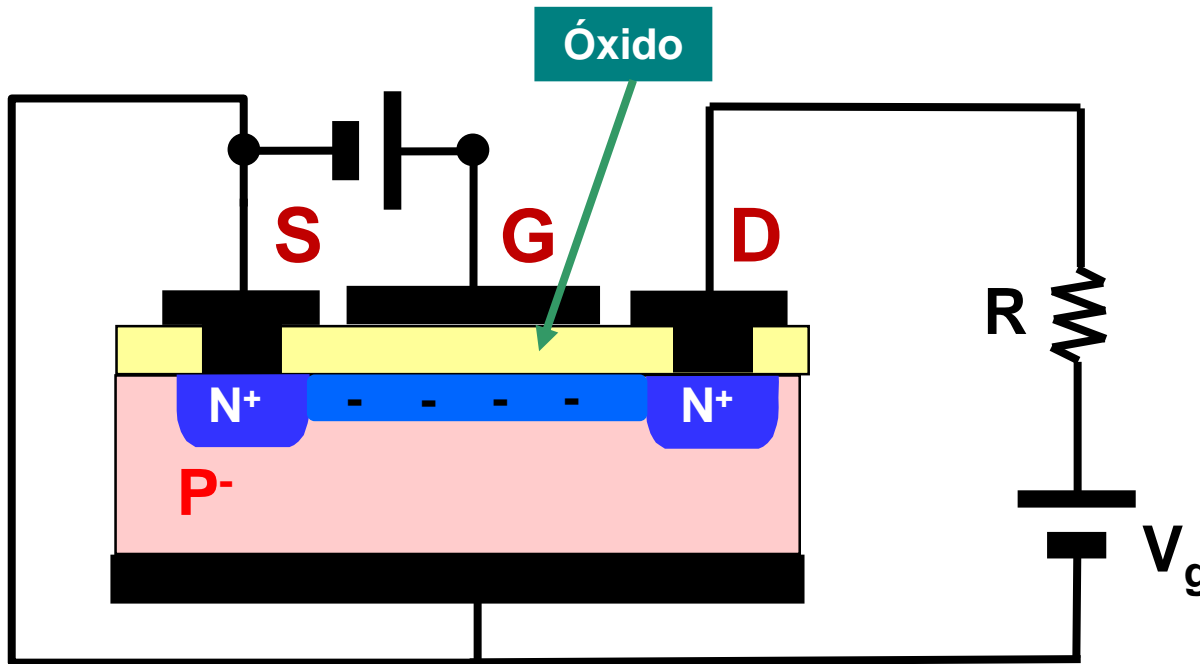
JFET “nor-off”

MOSFET

¿Pero, por qué no hemos empezado desde el principio por los MOSFETs?



Problemas con el MOSFET de SiC: baja movilidad de los electrones en el canal



Explicación sencilla
con un dispositivo
“lateral”.

- Origen del problema: las cargas eléctricas que se forman en el óxido.
- El material a usar como óxido es la clave.
- Numerosas investigaciones.
- Avances muy significativos en los últimos 15 años.



Ejemplos de MOSFETs de SiC comerciales

Power Supply
Systems



1200-V SiC MOSFET Packaged

2nd-generation Z-FET™ SiC MOSFETs

- **CMF10120D: 1200 V, 160 mΩ, 24 A**
- **C2M0080120D: 1200 V, 80 mΩ, 31,6 A**
- **CMF20120D: 1200 V, 80 mΩ, 42 A**
- **C3M0065090J: 900 V, 65 mΩ, 35 A**



TO-247

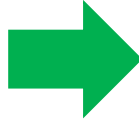




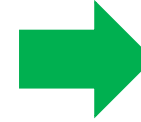
Módulos y drivers para MOSFETs de SiC (comerciales)

Power Supply
Systems

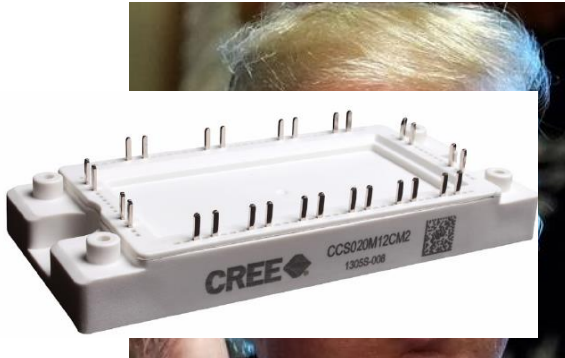
CREE 



Wolfspeed 



infineon 



CCS020M12CM2
1.2kV, 80 mΩ Silicon Carbide
Six-Pack (Three Phase) Module
C2M MOSFET and Z-Rec[®] Diode



CAS300M12BM2
1.2kV, 4.2 mΩ All-Silicon Carbide
Half-Bridge Module
C2M MOSFET and Z-Rec[™] Diode



Features

- 6 output channels
- Isolated power supply
- Direct mount low inductance design
- Short circuit protection
- Over temperature protection
- Under voltage protection



Power Supply
Systems

MOSFETs de SiC de Rohm



Matching Parts	Thermal del	Common Standard	Drain-source Voltage[V]	Drain-source On-state Resistance(Typ.)[mΩ]	Drain Current[A]	Total Power Dissipation[W]	Junction Temperature (Max.) [°C]	Storage Temperature (Min.)[°C]	Storage Temperature (Max.)[°C]	Package	Distribution Inventory	
<input type="checkbox"/> SCT3022KLHR		AEC-Q101 (Automotive Grade)	1200	22	95	427	175	-55	175	TO-247N	Buy	Sample
<input type="checkbox"/> SCT3022KL		-	1200	22	95	427	175	-55	175	TO-247N	Buy	Sample
<input type="checkbox"/> SCT3022ALHR		AEC-Q101 (Automotive Grade)	650	22	93	339	175	-55	175	TO-247N	Buy	Sample
<input type="checkbox"/> SCT3022AL		-	650	22	93	339	175	-55	175	TO-247N	Buy	Sample
<input type="checkbox"/> SCT3017ALHR		AEC-Q101 (Automotive Grade)	650	17	118	427	175	-55	175	TO-247N	Buy	Sample
<input type="checkbox"/> SCT3017AL		-	650	17	118	427	175	-55	175	TO-247N	Buy	Sample
<input type="checkbox"/> SCT2H12NZ		-	1700	1150	3.7	35	175	-55	175	TO-3PFM	Buy	Sample
<input type="checkbox"/> SCT2H12NY		-	1700	1150	4	44	175	-55	175	TO-268-2L	Buy	Sample
<input type="checkbox"/> SCT2750NY		-	1700	750	6	57	175	-55	175	TO-268-2L	Buy	Sample
<input type="checkbox"/> SCT2450KE		-	1200	450	10	85	175	-55	175	TO-247	Buy	Sample
<input type="checkbox"/> SCT2280KE		-	1200	280	14	108	175	-55	175	TO-247	Buy	Sample
<input type="checkbox"/> SCT2160KE		-	1200	160	22	165	175	-55	175	TO-247	Buy	Sample
<input type="checkbox"/> SCT2120AF		-	650	120	29	165	175	-55	175	TO-220AB	Buy	Sample
<input type="checkbox"/> SCT2080KEHR		AEC-Q101 (Automotive Grade)	1200	80	40	262	175	-55	175	TO-247N	Buy	Sample
<input type="checkbox"/> SCT2080KE		-	1200	80	40	262	175	-55	175	TO-247N	inquiry	



Power Supply
Systems

MOSFETs de SiC de ST

Very high temperature handling capability (max. $T_J = 200\text{ }^\circ\text{C}$)

STSiC MOSFET series positioning



Breakdown Voltage

650V	1200V	1700V
------	-------	-------

Series

G2	G1	G2	G1
----	----	----	----

$R_{DS(on)}$

18-55m Ω	52-520m Ω	22-75m Ω	65-1100m Ω
-----------------	------------------	-----------------	-------------------

I_D Current

45-120A	12-65A	40-100A	6-25A
---------	--------	---------	-------



Power Supply
Systems

Consideraciones sobre el uso de MOSFETs de SiC



Applications Information

The Cree SiC MOSFET has removed the upper voltage limit of silicon MOSFETs. However, there are some differences in characteristics when compared to what is usually expected with high voltage silicon MOSFETs. These differences need to be carefully addressed to get maximum benefit from the SiC MOSFET. In general, although the SiC MOSFET is a superior switch compared to its silicon counterparts, it should not be considered as a direct drop-in replacement in existing applications.


Recomendaciones de Cree-Wolfspeed-Infineon

- Como tenían baja transconductancia \Rightarrow había que llegar a 20 V en puerta.
- Había que aplicar tensión ligeramente negativa en puerta (entre -2 y -5 V) para cortar bien el dispositivo.
- Tensiones máximas de puerta asimétricas.
- Hay que garantizar una señal “limpia” en puerta \Rightarrow resistencia en serie.
- Hay que minimizar las inductancias parásitas en el camino de retorno de la corriente transitoria de puerta.



MOSFETs-SiC versus MOSFETs-Si

Power Supply
Systems

CREE  **C3M0065090J** Silicon Carbide Power MOSFET
C3M™ MOSFET Technology

$V_{DS} = 900\text{ V}$ $R_{DS(on)} = 65\text{ m}\Omega$ $Q_g = 30\text{ nC}$

C_{iss}	Input Capacitance		660		pF
C_{oss}	Output Capacitance		60		
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance		4.0		

¡Aproximadamente 16 veces mejor el de SiC!



IPP90R340C3 - Silicon

$V_{DS} = 900\text{ V}$ $R_{DS(on)} = 340\text{ m}\Omega$ $Q_g = 94\text{ nC}$

Input capacitance	C_{iss}	$V_{GS}=0\text{ V}, V_{DS}=100\text{ V},$ $f=1\text{ MHz}$	-	2400	-	pF
Output capacitance	C_{oss}		-	120	-	



Power Supply Systems

MOSFETs-SiC versus JFETs-Si



¡No es una comparación actual!



CMF10120D-Silicon Carbide Power MOSFET

$V_{DS} = 1200\text{ V}$

$R_{DS(on)} = 160\text{ m}\Omega$

$Q_g = 47\text{ nC}$

C_{iss}	Input Capacitance		928		pF
C_{oss}	Output Capacitance		63		
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance		7.45		



SJEP120R125 Normally-OFF JFET

$V_{DS} = 1200\text{ V}$ $R_{DS(on)} = 125\text{ m}\Omega$

Input Capacitance	C_{iss}	$V_{DD} = 100\text{ V}$	-	610	-	pF
Output Capacitance	C_{oss}		-	90	-	
Reverse Transfer Capacitance	C_{rss}		-	85	-	



SJDP120R085 Normally-On JFET

$V_{DS} = 1200\text{ V}$ $R_{DS(on)} = 85\text{ m}\Omega$

Input Capacitance	C_{iss}	$V_{DD} = 100\text{ V}$	-	670	-	pF
Output Capacitance	C_{oss}		-	103	-	
Reverse Transfer Capacitance	C_{rss}		-	97	-	

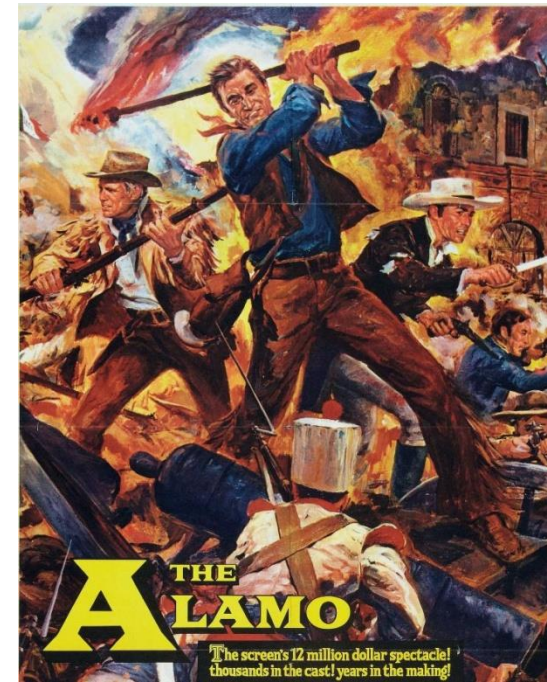
➤ El JFET normalmente cerrado es mejor



Power Supply
Systems

Cascodos JFET-SiC + MOSFET-Si versus MOSFET-SiC e IGBTs-Si

-  defiende el cascode a ultranza.
- ¿Es información imparcial?



Technology	SiC Cascode 1200V-45mΩ (UJC1206K)	Commercial SiC MOSFET 1200V-80mΩ (C2M0080120D)	Commercial SiC JFET 1200V-70mΩ (IJW120R070T1)	Commercial Si IGBT 1200V-50A (IRG7PH35UD)
$R_{DS(ON)}$	34 mΩ	80 mΩ	55 mΩ	1.9V@20A
E_{OFF}	163 μJ	180 μJ	216 μJ	1050 μJ
Condition	800V, 25A	800V, 25A	800V, 25A	800V, 25A
V_{GS}	0 to 12 V	-5 to 20 V	-20 to 0V	-5 to 15V



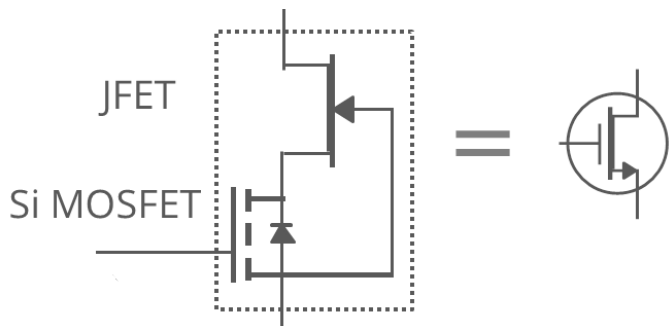


Power Supply
Systems

Cascodos JFET-SiC + MOSFET-Si versus MOSFET-SiC: más detalles



Información de USCi (¿imparcial?)



	Normally Off USCi Cascode	Normally Off Typical SiC MOSFET
	<p>Integrated LV Si-MOSFET</p>	<p>Additional Antiparallel SiC Diode</p>
Die Size	(Smaller) $R_{DSA} \sim 1.7 \text{ m}\Omega\text{-cm}^2$	(Larger) $R_{DSA} \sim 3.1\text{-}4.5 \text{ m}\Omega\text{-cm}^2$
Gate Drive	(Standard) $V_{GS} = 0\text{V to }12\text{V}$	$V_{GS} = -5\text{V to }20\text{V}$
Threshold	$V_{GS(TH)} = 4.5\text{V Typical}$	$V_{GS(TH)} = 2.2\text{V Typical}$
Intrinsic Diode	Low Q_{rr} +10% Over Temperature	High Q_{rr} , High VF 3X Over Temperature
Avalanche	Yes	Yes
Short Circuit	Yes	Low





Guía de la presentación

Power Supply
Systems

- Introducción: lo mínimo imprescindible a conocer sobre semiconductores.
- ¿Por qué dispositivos de banda prohibida ancha en electrónica de potencia?: propiedades, ventajas y limitaciones del SiC y del GaN.
- Diodos de SiC: Diodos Schottky, bipolares y mixtos.
- Dispositivos "normalmente cerrados" en SiC: JFETs.
- Dispositivos "normalmente abiertos" en SiC: JFETs y MOSFETs.
- Dispositivos de alta movilidad de electrones en GaN: el HEMT de GaN.**



¿Por qué el GaN?

Power Supply
Systems

- Se pueden hacer diodos parecidos a los de SiC (Powdec, Emcore y Transphorm). Aquí no está el interés principal.
- El interés principal radica en que se pueden hacer HEMTs.
- Un HEMT (*“High Electron Mobility Transistor”*) es un transistor cuyo funcionamiento se basa en una “heterounión”.
- Se comportan como un MESFET (un JFET de puerta metálica en vez de semiconductor) pero con un canal compuesto por un “gas bidimensional de electrones” (*“2D gas”*).
- La conductividad de este canal es altísima y se consigue con muy bajas capacidades parásitas.
- Los HEMTs tradicionales se basan en heterouniones de GaAs y AlGaAs.
- Se usan para amplificación en microondas.
- Fabricados en GaN y AlGaN (en vez de en GaAs y AlGaAs) pueden disipar mejor el calor y trabajar a mayores tensiones.
- Se trata de exportar tecnología de RF a la electrónica de potencia.



Power Supply
Systems

Entender un HEMT

➤ No es magia



➤ Hay que hablar de:

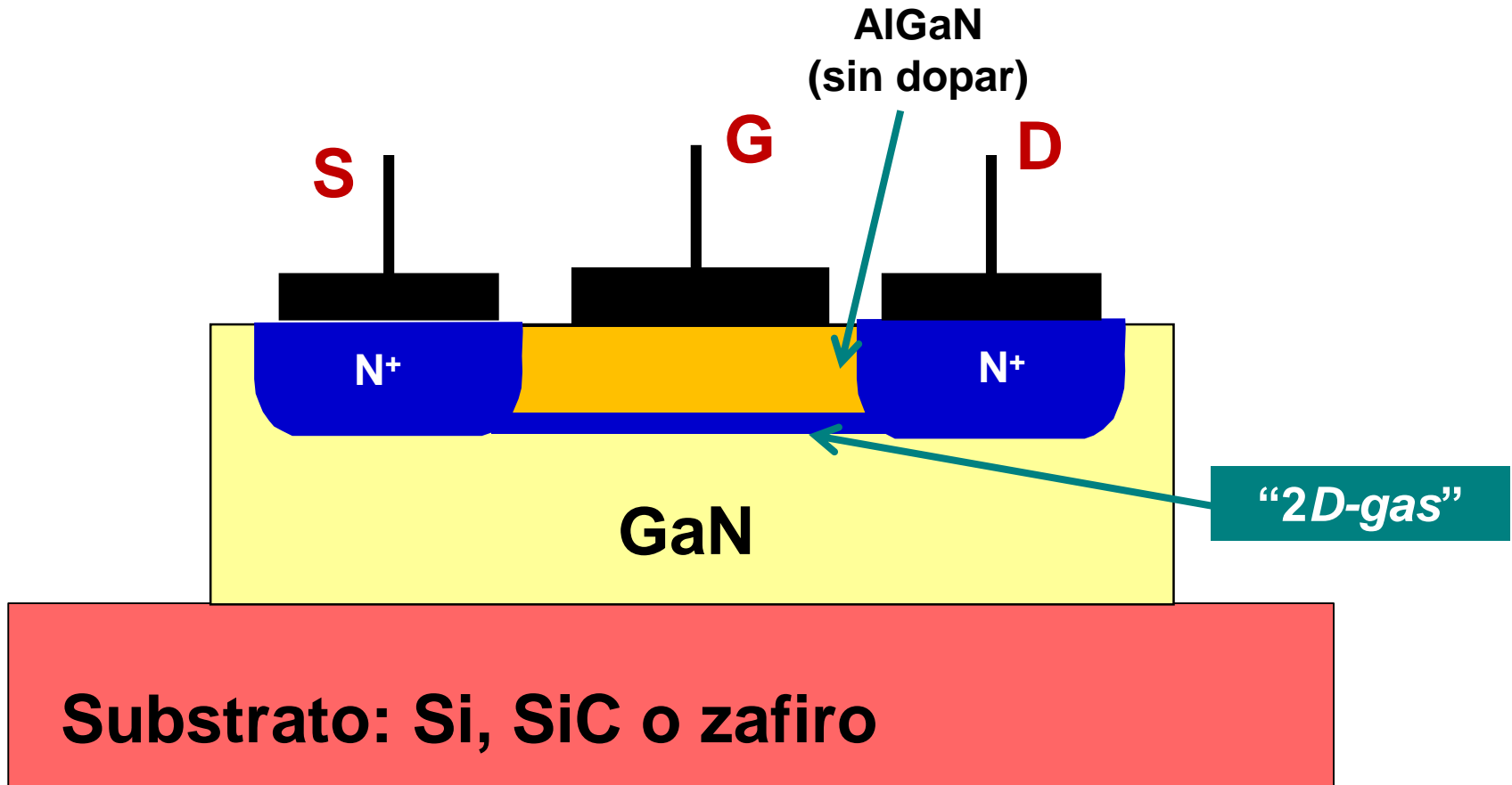
Diagramas de bandas, niveles de Fermi,
homouniones, funciones de trabajo,
heterouniones y del “2D gas”

➤ Está desarrollado en el Apéndice II



Power Supply
Systems

HEMT de potencia de AlGaN-GaN para aplicaciones lineales de RF (simplificado)





Power Supply
Systems

HEMT de AlGaN-GaN para aplicaciones de electrónica de potencia

- ¿“Normalmente abiertos” o “normalmente cerrados”?
- ¿Con puerta “MES” o con puerta “MOS”?
- Si son con puerta MOS, ¿qué aislante?
- Fabricantes: IR, EPC, Transphorm, Micro GaN, Panasonic, GaN Systems, TriQuint, Navitas, On semi y Texas



ON Semiconductor®



RFMD + TriQuint = Qorvo





Power Supply
Systems

Tipos de HEMT de AlGaN-GaN para aplicaciones de electrónica de potencia

CREE 


NITRONEX CORPORATION 

TriQuint 
Reach Further · Reach Faster™

(RF)

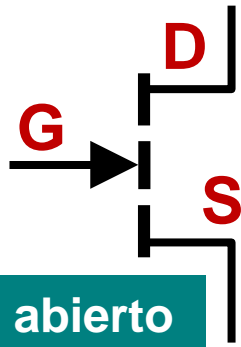


▪ Norm. cerrado
▪ Puerta MES

EPC 
EFFICIENT POWER CONVERSION

Panasonic

GaN Systems



▪ Norm. abierto
▪ Puerta MES

transphorm 

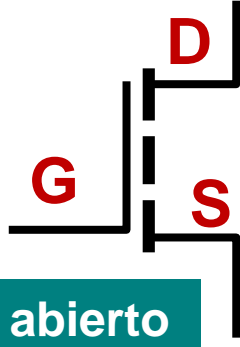
micro GaN GmbH

IOR



▪ Norm. cerrado
▪ Puerta MOS

¿?



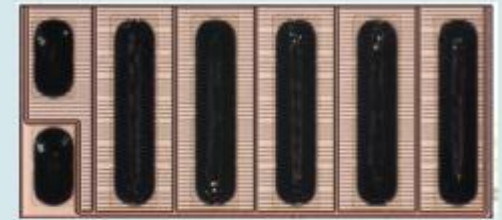
▪ Norm. abierto
▪ Puerta MOS



Power Supply
Systems

Cartera de HEMTs de EPC

<http://epc-co.com/epc/>



EPC2010 eGaN® FETs are supplied only in passivated die form with solder bars

Part Number	Package (mm)	Ch	Vds	Vgs	Max. Rdson (mΩ) @5V	Qg @5V Typ.	Qgs Typ.	Qgd Typ.	Rg Typ.	Vth Typ.	Qrr	Id	T _{J(MAX)} (°C)	RoHS and Halogen Free	Buy eGaN FETs
EPC2015	LGA 4.1x1.6	N	40	6	4.0	10.5	3.0	2.2	0.6	1.4	0	33	150	YES	Buy Now
EPC2001	LGA 4.1x1.6	N	100	6	7.0	8.0	2.3	2.2	0.6	1.4	0	25	125	YES	Buy Now
EPC2010	LGA 3.6x1.6	N	200	6	25.0	5.0	1.3	1.7	0.6	1.4	0	12	125	YES	Buy Now
EPC1014	LGA 1.7x1.1	N	40	6	16.0	3.0	1.0	0.6	0.6	1.4	0	10	125	NO	Buy Now
EPC1015	LGA 4.1x1.6	N	40	6	4.0	11.5	4.0	2.2	0.6	1.4	0	33	125	NO	Buy Now
EPC1009	LGA 1.7x1.1	N	60	6	30.0	2.5	0.7	0.8	0.6	1.4	0	6	125	NO	Buy Now
EPC1005	LGA 4.1x1.6	N	60	6	7.0	10.0	2.9	2.7	0.6	1.4	0	25	125	NO	Buy Now
EPC1007	LGA 1.7x1.1	N	100	6	30.0	2.7	0.7	1.0	0.6	1.4	0	6	125	NO	Buy Now
EPC1001	LGA 4.1x1.6	N	100	6	7.0	11.0	2.9	3.7	0.6	1.4	0	25	125	NO	Buy Now
EPC1013	LGA 1.7x0.9	N	150	6	100.0	1.7	0.3	0.7	0.6	1.4	0	3	125	NO	Buy Now
EPC1011	LGA 3.6x1.6	N	150	6	25.0	6.7	1.4	2.7	0.6	1.4	0	12	125	NO	Buy Now
EPC1012	LGA 1.7x0.9	N	200	6	100.0	1.9	0.9	0.3	0.6	1.4	0	3	125	NO	Buy Now
EPC1010	LGA 3.6x1.6	N	200	6	25.0	7.5	1.4	3.5	0.6	1.4	0	12	125	NO	Buy Now



Power Supply
Systems

Ejemplo de HEMT de GaN de EPC (I)

DATASHEET

EPC1010

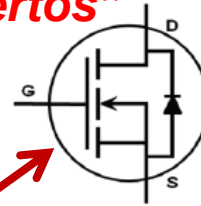
EPC1010 – Enhancement Mode Power Transistor

V_{DSS} , 200 V

$R_{DS(ON)}$, 25 m Ω

I_D , 12 A

Son "normalmente abiertos"



Este símbolo es equívoco

Gallium Nitride... ing the infrastr... tron mobility and low temperature coefficient allows very low $R_{DS(ON)}$, while its lateral device structure and majority carrier diode provide exceptionally low Q_G and zero Q_{RR} . The end result is a device that can handle tasks where very high switching frequency, and low on-time are beneficial as well as those where on-state losses dominate.

Maximum Ratings

Parameter	Description	Value	Unit
V_{DS}	Drain-to-Source Voltage	200	V
I_D	Continuous ($T_A = 25^\circ\text{C}$, $\theta_{JA} = 40$)	12	A
	Pulsed (25°C , $T_{pulse} = 300 \mu\text{s}$)	40	
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	6	V
	Gate-to-Source Voltage	-5	
T_J	Operating Temperature	-40 to 125	$^\circ\text{C}$
T_{STG}	Storage Temperature	-40 to 150	



EPC Power Transistors are supplied only in passivated die form with solder bumps

Applications

- High Speed DC-DC conversion
- Class D Audio
- Hard Switched and High Frequency Circuits

Benefits

- Ultra High Efficiency
- Ultra Low $R_{DS(on)}$
- Ultra low Q_G
- Ultra small footprint



Power Supply
Systems

Ejemplo de HEMT de GaN de EPC (II)

EPC2010 – Enhancement Mode Power Transistor



Figure 1: Typical Output Characteristics

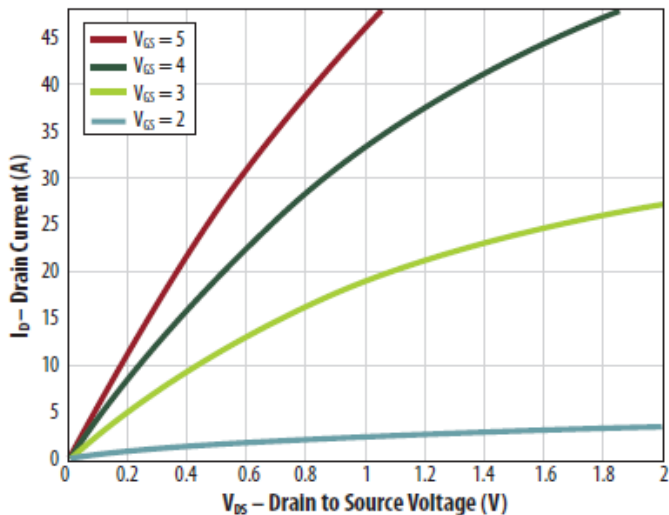


Figure 2: Transfer Characteristics

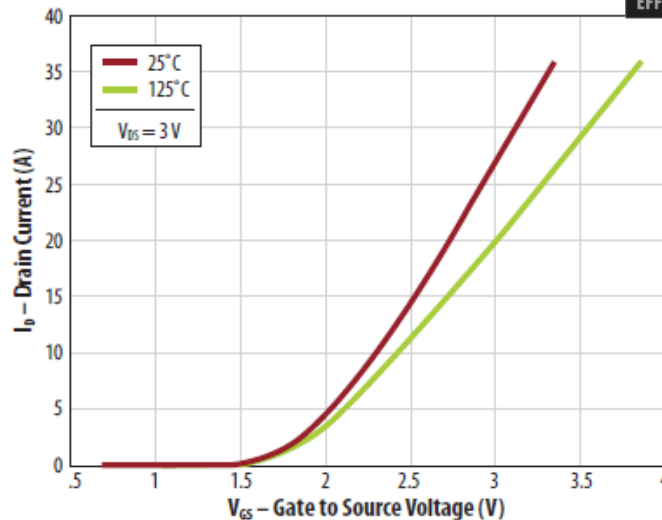


Figure 3: $R_{DS(ON)}$ vs V_G for Various Current

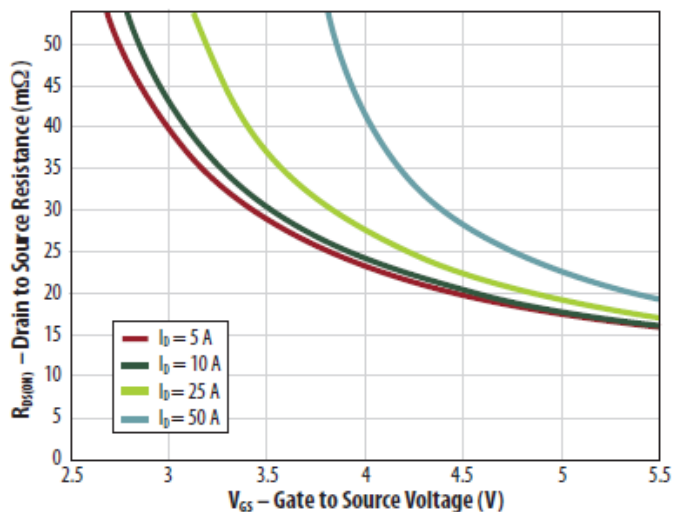
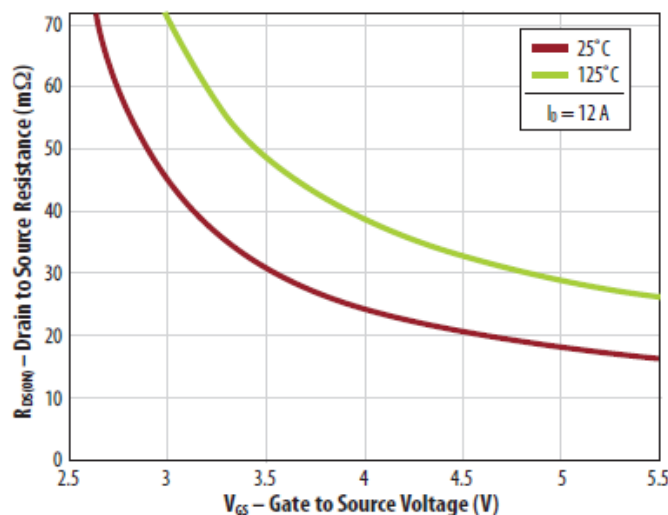


Figure 4: $R_{DS(ON)}$ vs V_G for Various Temperature

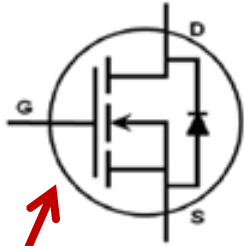




Power Supply
Systems

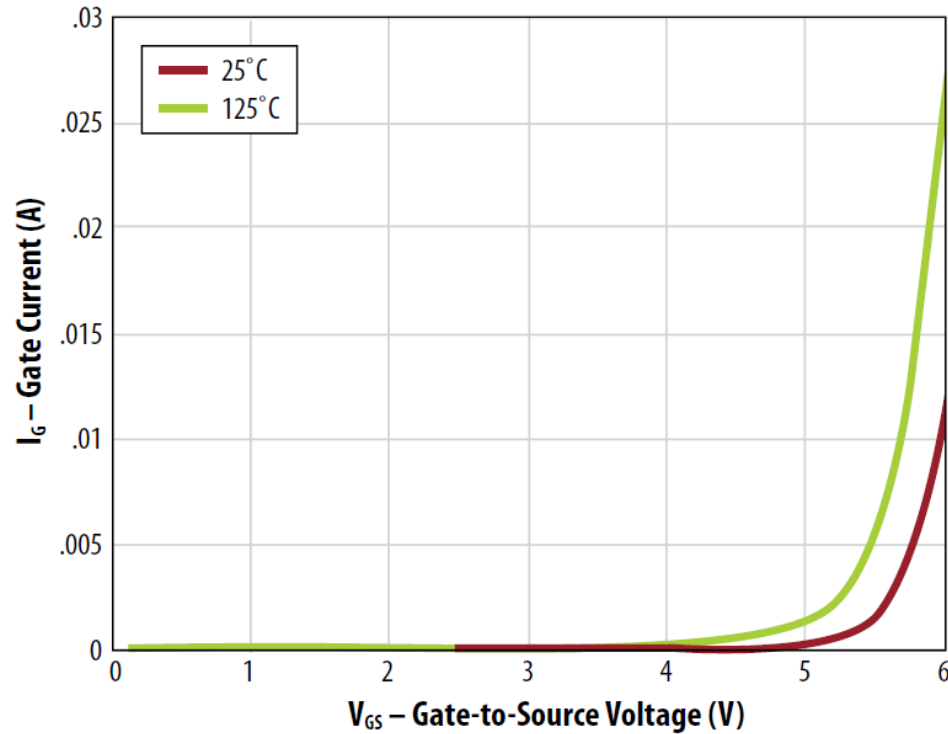
Ejemplo de HEMT de GaN de EPC (III)

EPC2010 – Enhancement Mode Power Transistor



**Este símbolo
es equívoco**

Figure 10: Gate Current



**¡Ojo! Hay corriente de puerta
para tensiones mayores de 5 V**



Power Supply
Systems

Comparación de HEMT de GaN de EPC y MOSFETs de Si



EPC2010 – Enhancement Mode Power Transistor

$V_{DS} = 200\text{ V}$ $R_{DS(on)} = 25\text{ m}\Omega$ $Q_g = 7,5\text{ nC}$ *Figura de mérito= 187,5*

Dynamic Characteristics ($T_J = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise stated)				
C_{ISS}	Input Capacitance	$V_{DS} = 100\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}$		440
C_{OSS}	Output Capacitance			310
C_{RSS}	Reverse Transfer Capacitance			30



IPB320N20N3 G

$V_{DS} = 200\text{ V}$ $R_{DS(on)} = 32\text{ m}\Omega$ $Q_g = 22\text{ nC}$ *Figura de mérito= 704*

Dynamic characteristics

Input capacitance	C_{ISS}	$V_{GS} = 0\text{ V}, V_{DS} = 100\text{ V},$ $f = 1\text{ MHz}$	-	1770	2350	pF
Output capacitance	C_{OSS}		-	135	180	
Reverse transfer capacitance	C_{RSS}		-	4	-	

Aproximadamente 4 veces mejor el de GaN



Power Supply
Systems

Ejemplo de HEMT de GaN de Panasonic

- Se le denomina **Gate Injection Transistor (GIT)**.
(o cómo hacer de la necesidad virtud)
- La puerta es tipo **JFET**.

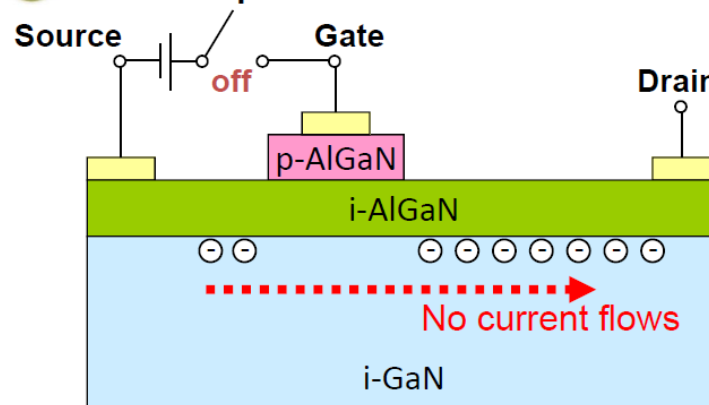
Panasonic

600V GaN

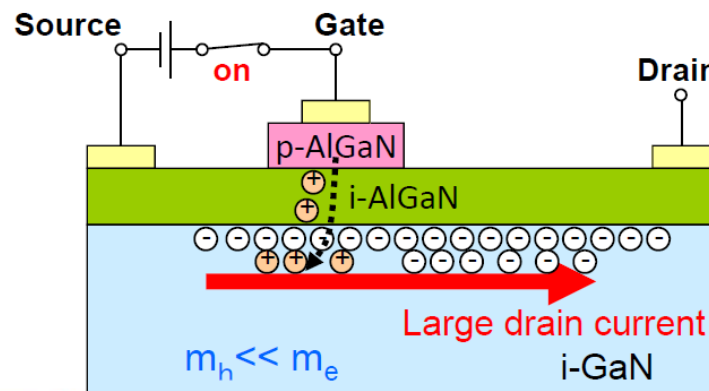
- Normally-Off
- Current-Collapse-Free
- Zero Recovery

ID(Continuous) : 15A
 RDS(on) : 65mΩ
 Qg : 11nC

● GIT Operation



$V_g = 0V$
 p-gate potential depletes the channel under the gate
 ↓
 No drain current



$V_g > V_f$ of GaN-PN junction
 Hole injection
 ↓
 Electron generation
 ↓
 Large drain current
 (conductivity modulation)



Power Supply
Systems

Ejemplo de HEMT de GaN de IR (Infineon) (I)

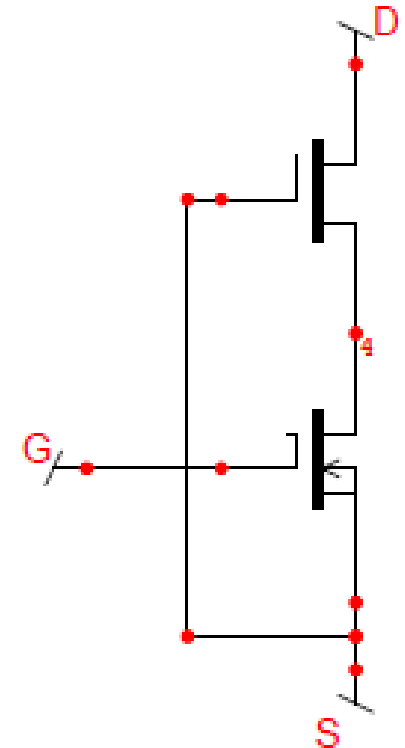
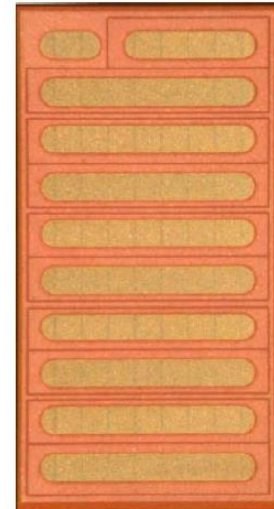
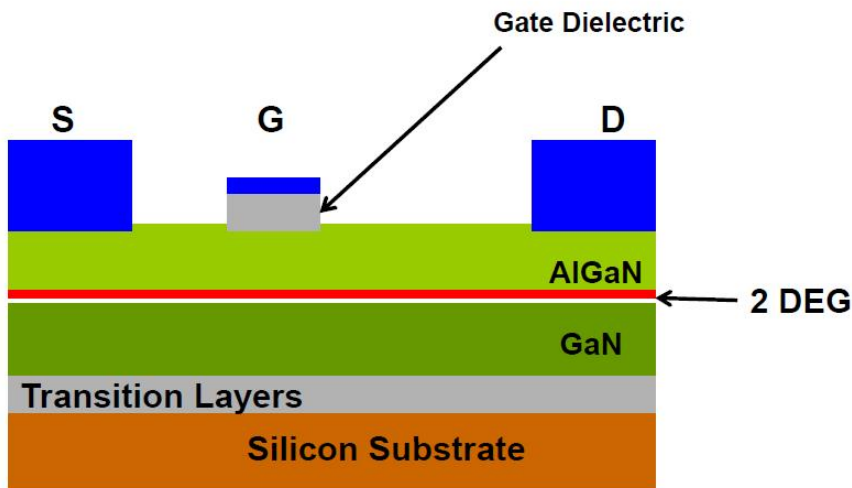
- **Son de puerta tipo MOS.**
- **Son “normalmente cerrados”.**
- **Están pensados para usarse en cascodo.**



Depletion Mode GaN HEMT Structure



- The GaN device is fabricated using standard CMOS production tools
- The device is Metal Insulator Semiconductor, hence low gate leakage





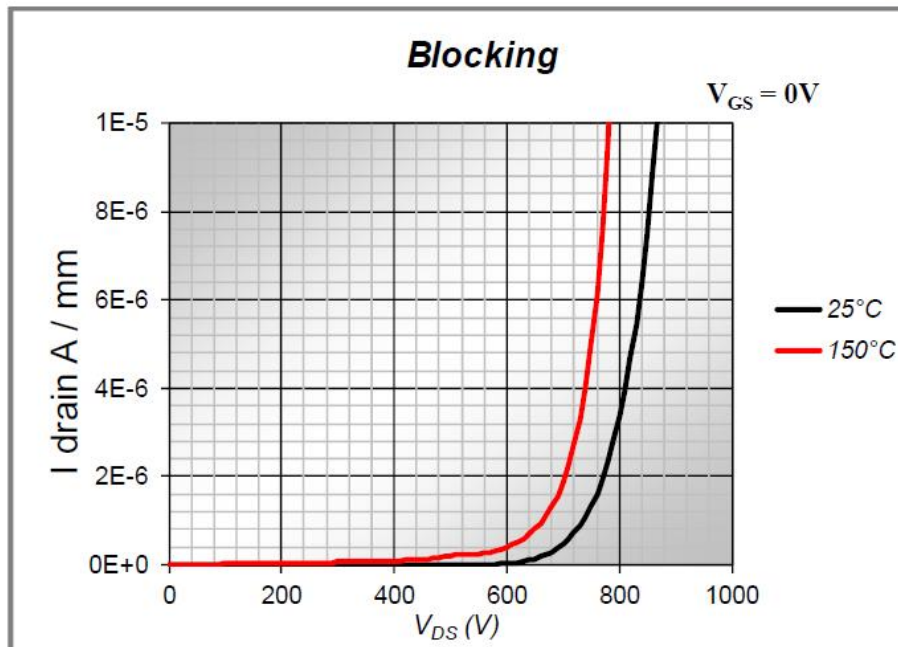
Ejemplo de HEMT de GaN de IR (Infineon) (II)

Power Supply
Systems

➤ **El concepto de tensión máxima soportada en los HEMTs:**



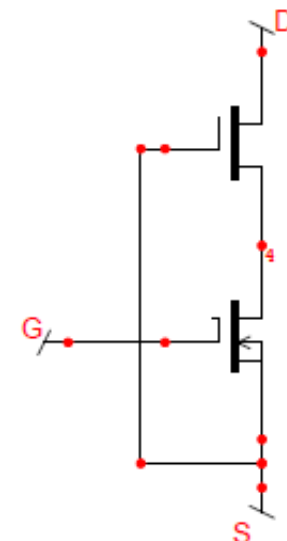
GaN cascode switch Blocking voltage



GaN device shows leakage determined breakdown (not an avalanche breakdown)

At $V_{DS} = 600V$, the typical drain leakages of HV GaN cascodes at

- 25 °C: **< 50 nA/mm**
- 150 °C: **< 400 nA/mm**





Power Supply
Systems

Cascodos HEMT + MOSFET-Si “integrados” (I)

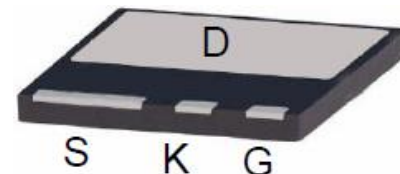
transphorm

TPH3002LD

PRODUCT SUMMARY (TYPICAL)

V_{DS} (V)	600
$R_{DS(on)}$ (Ω)	0.29
Q_{rr} (nC)	29

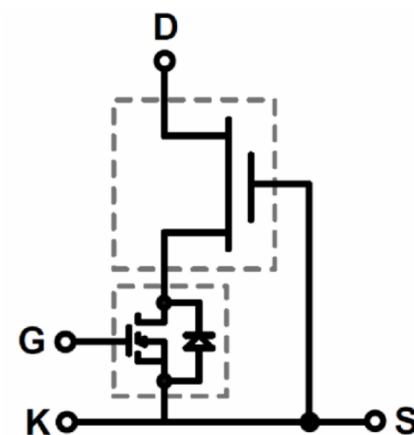
GaN Power Low-loss Switch



8x8 PQFN Package
(bottom view)

Absolute Maximum Ratings ($T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise stated)

Symbol	Parameter	Limit Value	Unit
$I_{D25^\circ\text{C}}$	Continuous Drain Current @ $T_C=25^\circ\text{C}$	9	A
$I_{D100^\circ\text{C}}$	Continuous Drain Current @ $T_C=100^\circ\text{C}$	6	A
I_{DM}	Pulsed Drain Current (pulse width: 100 μs)	33	A
V_{DSS}	Drain to Source Voltage	600	V
V_{TDS}	Transient Drain to Source Voltage ^a	750	V
V_{GSS}	Gate to Source Voltage	± 18	V
$P_{D25^\circ\text{C}}$	Maximum Power Dissipation	65	W
T_C	Operating Temperature Case	-55 to 150	$^\circ\text{C}$
T_J	Junction	-55 to 175	$^\circ\text{C}$
T_S	Storage Temperature	-55 to 150	$^\circ\text{C}$
T_{Csold}	Soldering peak Temperature ^b	260	$^\circ\text{C}$





Power Supply Systems

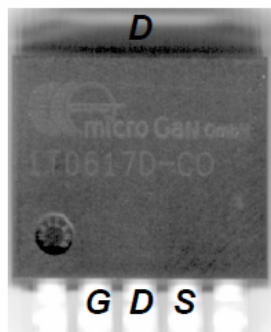
Cascodos HEMT + MOSFET-Si "integrados" (II)



micro GaN GmbH

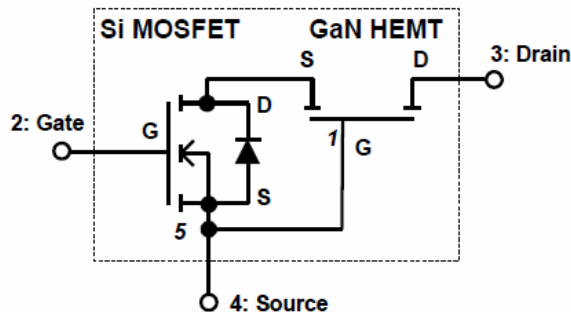
Devices Today – High Power Devices

MicroGaN 600V N-OFF Switch

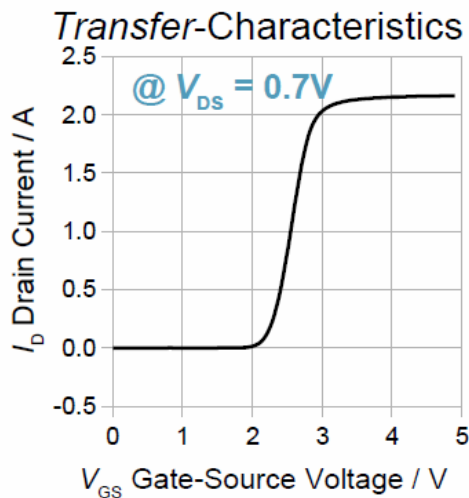
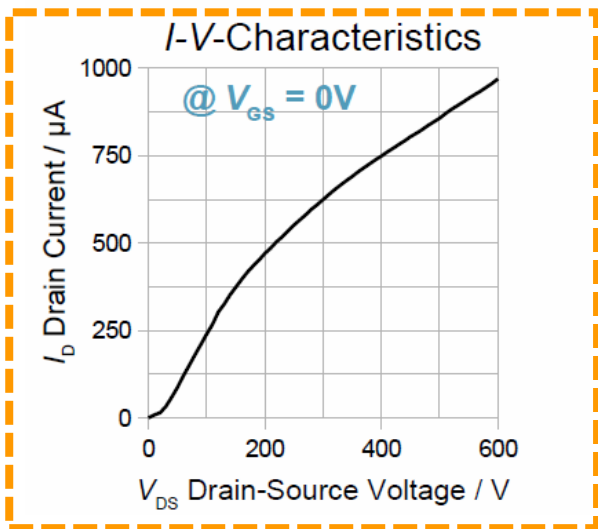


5LD TO-263

$C_{OSS} = 42\text{pF}$
 $R_{DSon} = 320\text{m}\Omega$



MGG1T0617D-CO

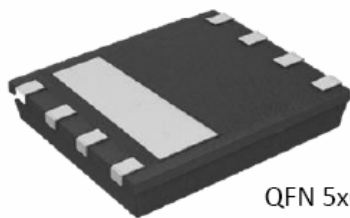
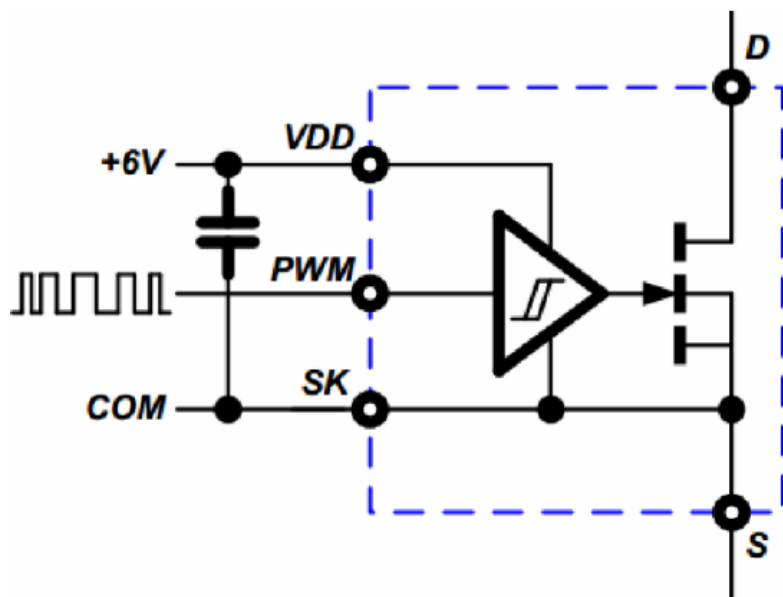


$C_{OSS} = 42\text{pF}$
 $C_{ISS} = 1.3\text{nF}$
@ $V_{DS} = 100\text{V}$ and @ $V_{GS} = 0\text{V}$

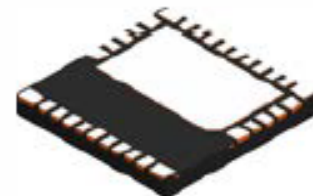
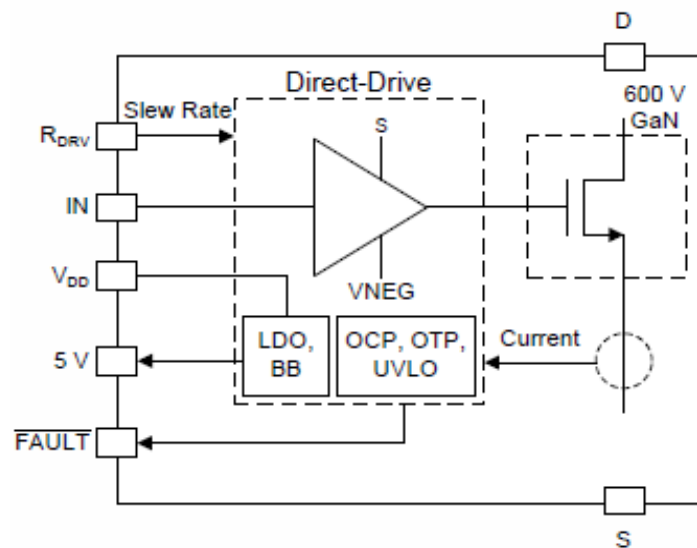


Power Supply
Systems

Integración de Cascodos HEMT + MOSFET-Si y su driver



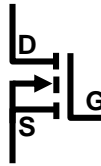
QFN 5x6mm





Resumen de las características de los transistores (I)

MOSFET de SiC



Nuevo driver

- Frecuencia media
- Alta temperatura (?)
- Alta tensión
- Lógica estándar
- Nuevos drivers

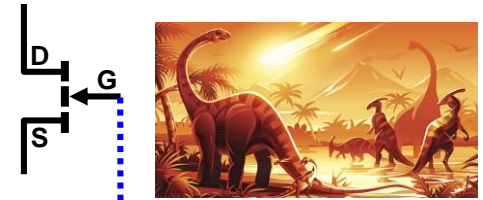
JFET de SiC norm. cerrado



Nuevos control,
driver y lógica

- Frecuencia media
- Alta temperatura (?)
- Alta tensión
- Lógica no estándar
- Nuevos drivers

JFET de SiC norm. abierto



Nuevo driver

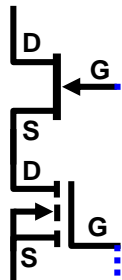
- Frecuencia media
- Alta temperatura (?)
- Alta tensión
- Lógica estándar
- Drivers muy distintos

Resumen de las características de los transistores (II)



Power Supply Systems

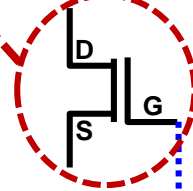
Cascodo SiC+Si



Control y driver dependen de V_{GS_JFET}

- Frecuencia media
- Baja temperatura
- Control y driver estándar si $V_{GS_JFET} = 0$
- Posibilidad de control y driver no estándar para el JFET

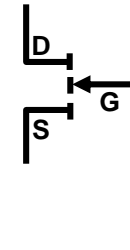
HEMT de GaN
Tipo MOS norm.
cerrado



Nuevo control y driver

- Frecuencia alta
- Baja temperatura
- Lógica no estándar
- Driver no estándar
- Uso en cascode

HEMT de GaN
Tipo MES norm.
abierto



Nuevo control y driver

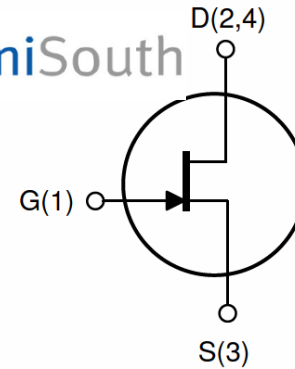
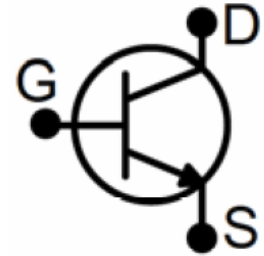
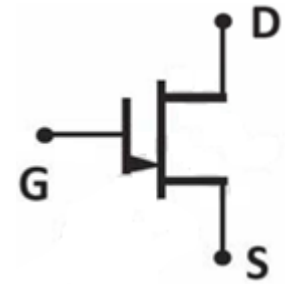
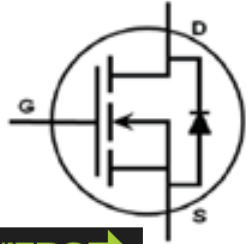
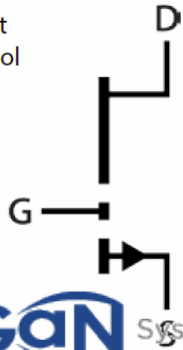
- Frecuencia alta
- Baja temperatura
- Lógica estándar
- Driver no estándar (baja tensión)



¡Macedonia de símbolos!

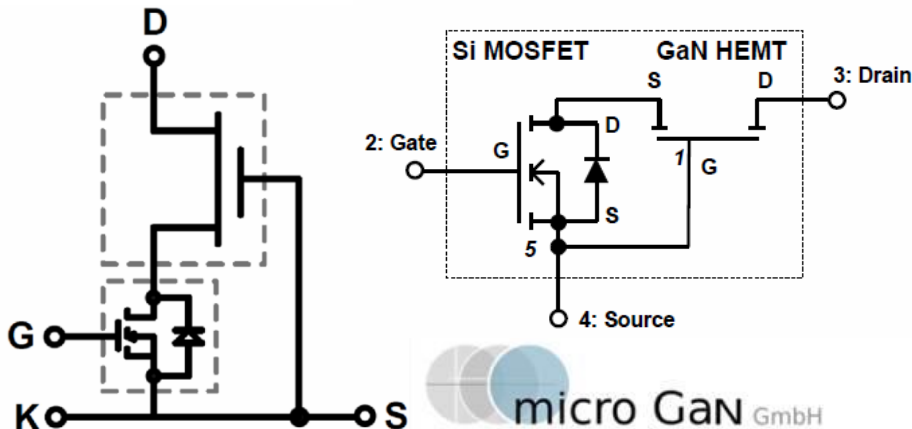
Power Supply Systems

circuit symbol



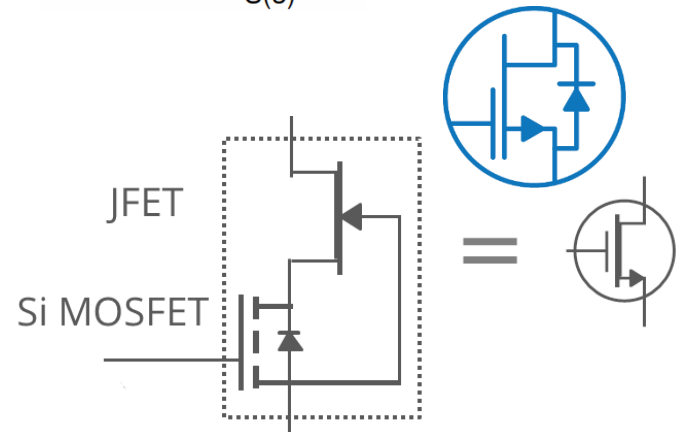
HEMT puerta no MOS

JFETs n-OFF (o bipolares)



Cascodos HEMT

WBG 72



Cascodos JFET



Power Supply
Systems

27º Seminario anual de automática, electrónica industrial e instrumentación



Semiconductores de SiC y GaN en aplicaciones de Electrónica de Potencia

***Muchas gracias por su
atención***

Ciudad Real, 03/09/2020

Contacto:
Javier Sebastián,
sebas@uniovi.es



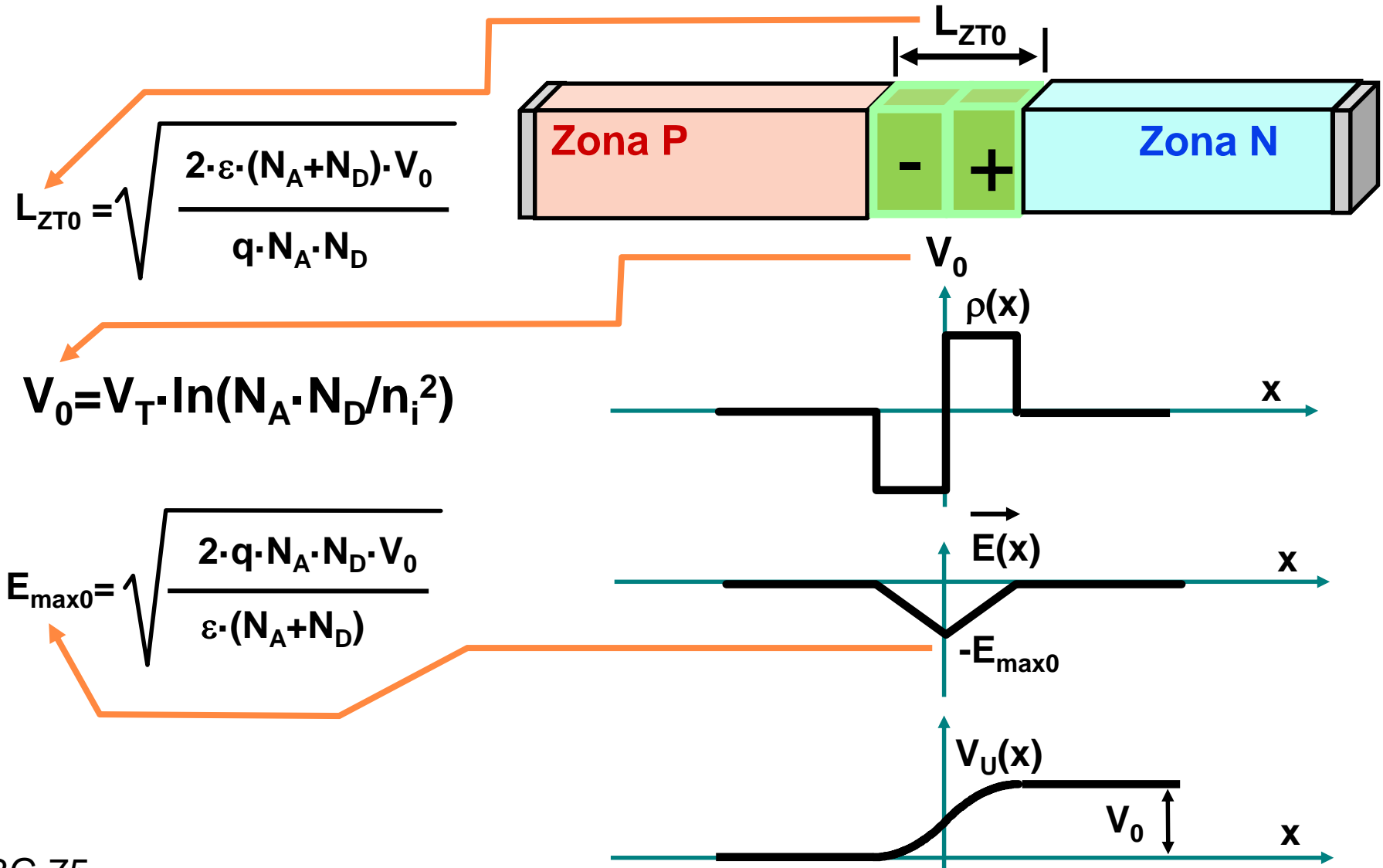
**Power Supply
Systems**

Apéndice I

**Contacto:
Javier Sebastián,
sebas@uniovi.es**



Un poco de teoría básica de uniones PN (sin polarizar)





Un poco de teoría básica de uniones PN (con polarización inversa V_{inv})

Sin polarizar teníamos:

$$L_{ZT0} = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot (N_A + N_D) \cdot V_0}{q \cdot N_A \cdot N_D}}$$

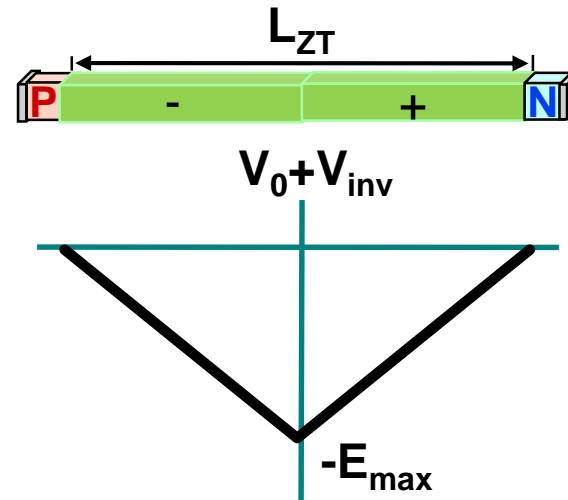
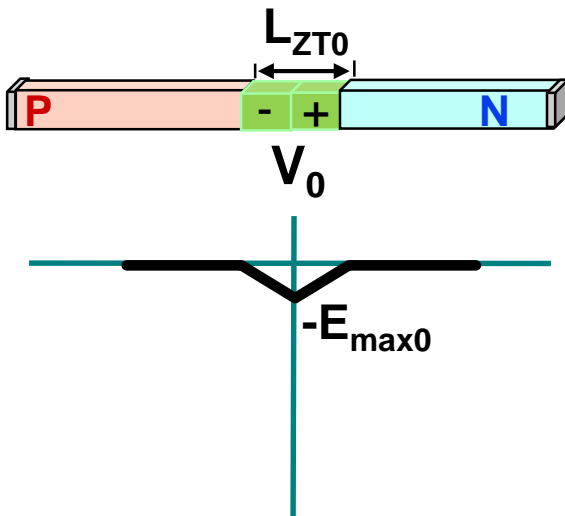
$$E_{max0} = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot N_A \cdot N_D \cdot V_0}{\varepsilon \cdot (N_A + N_D)}}$$

Con polarización tenemos:

$$L_{ZT} = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot (N_A + N_D) \cdot (V_0 + V_{inv})}{q \cdot N_A \cdot N_D}}$$

$$E_{max} = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot N_A \cdot N_D \cdot (V_0 + V_{inv})}{\varepsilon \cdot (N_A + N_D)}}$$

En polarización inversa L_{ZT} y E_{max} aumentan

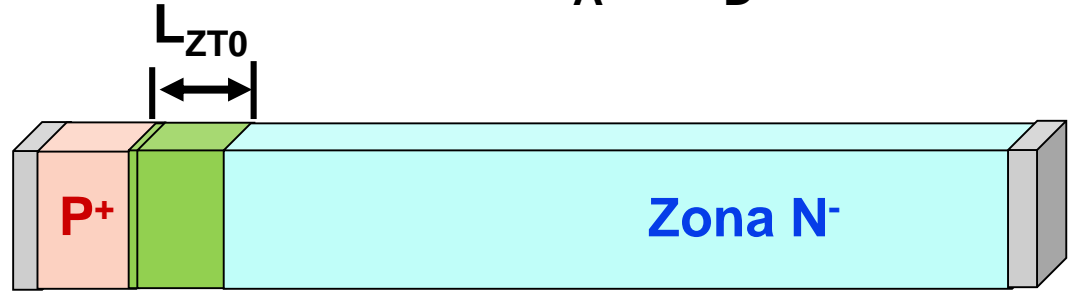




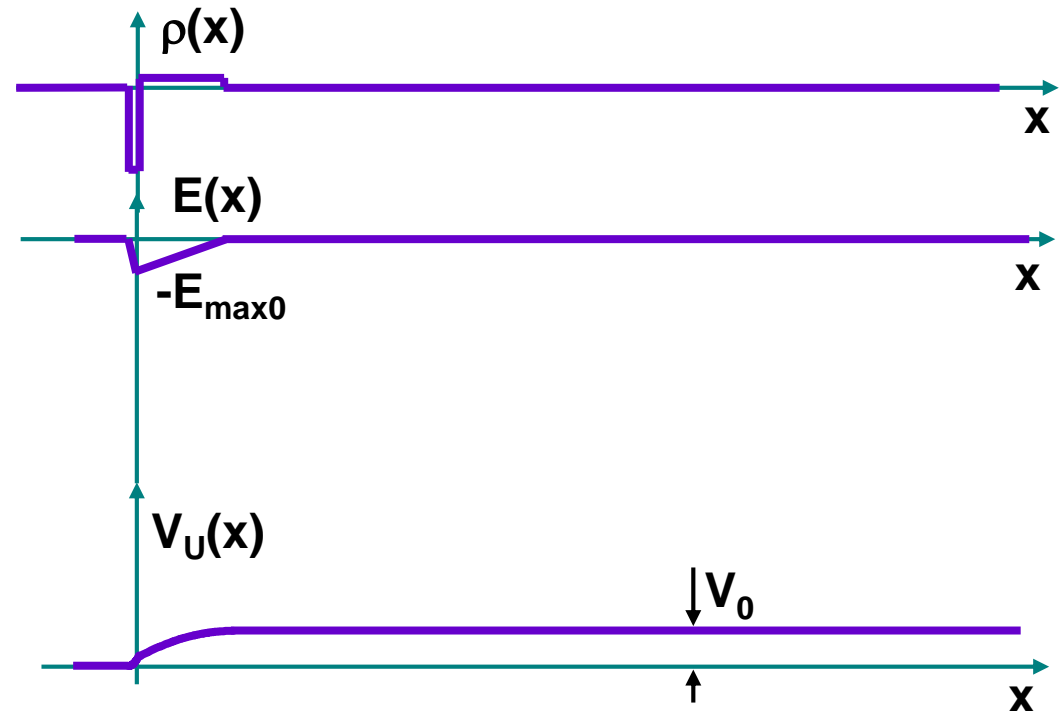
Unión P⁺N⁻ sin polarizar

$$N_A \gg N_D$$

$$L_{ZT0} = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon \cdot V_0}{q \cdot N_D}}$$



$$E_{\max0} = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot N_D \cdot V_0}{\epsilon}}$$



$$V_0 = V_T \cdot \ln(N_A \cdot N_D / n_i^2)$$



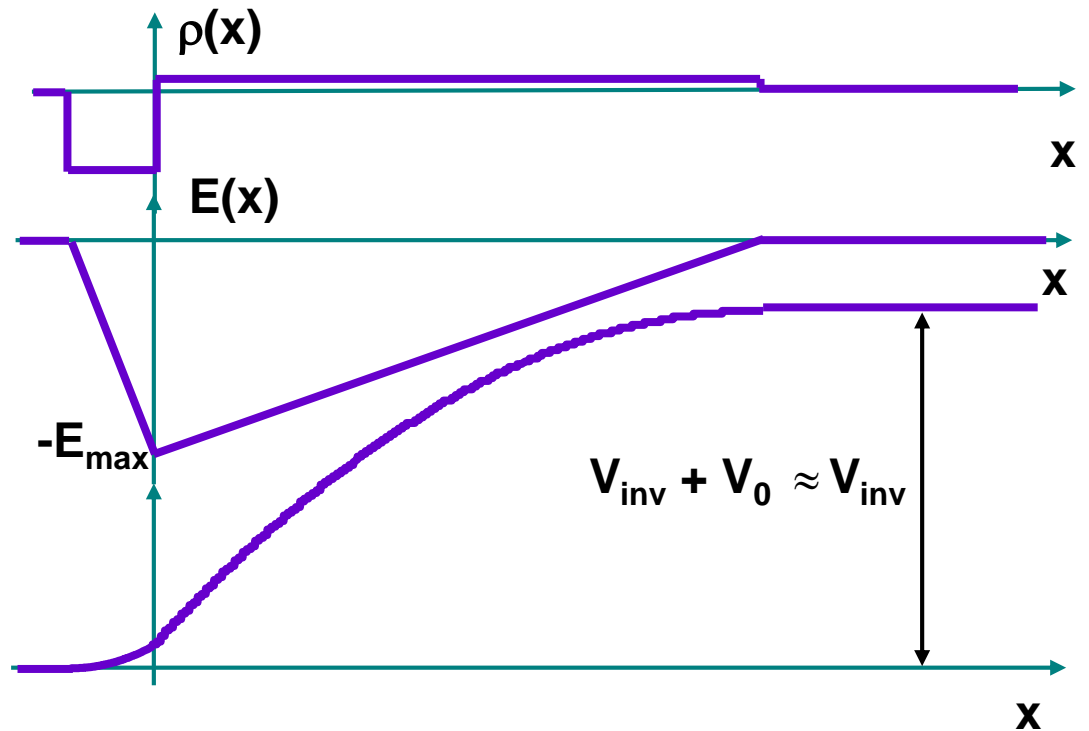
Unión P⁺N⁻ polarizado inversamente con V_{inv}

Power Supply
Systems

$$L_{ZT0} = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon \cdot V_{inv}}{q \cdot N_D}}$$



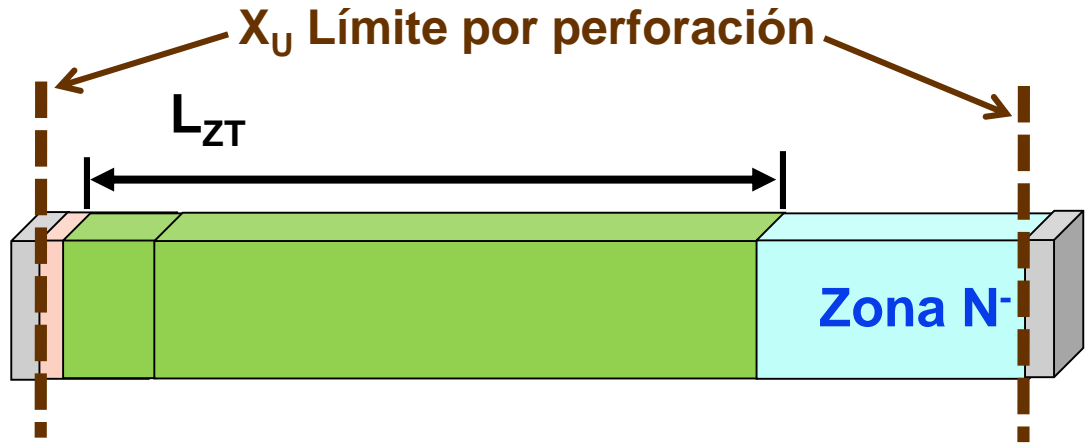
$$E_{max} = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot N_D \cdot V_{inv}}{\epsilon}}$$



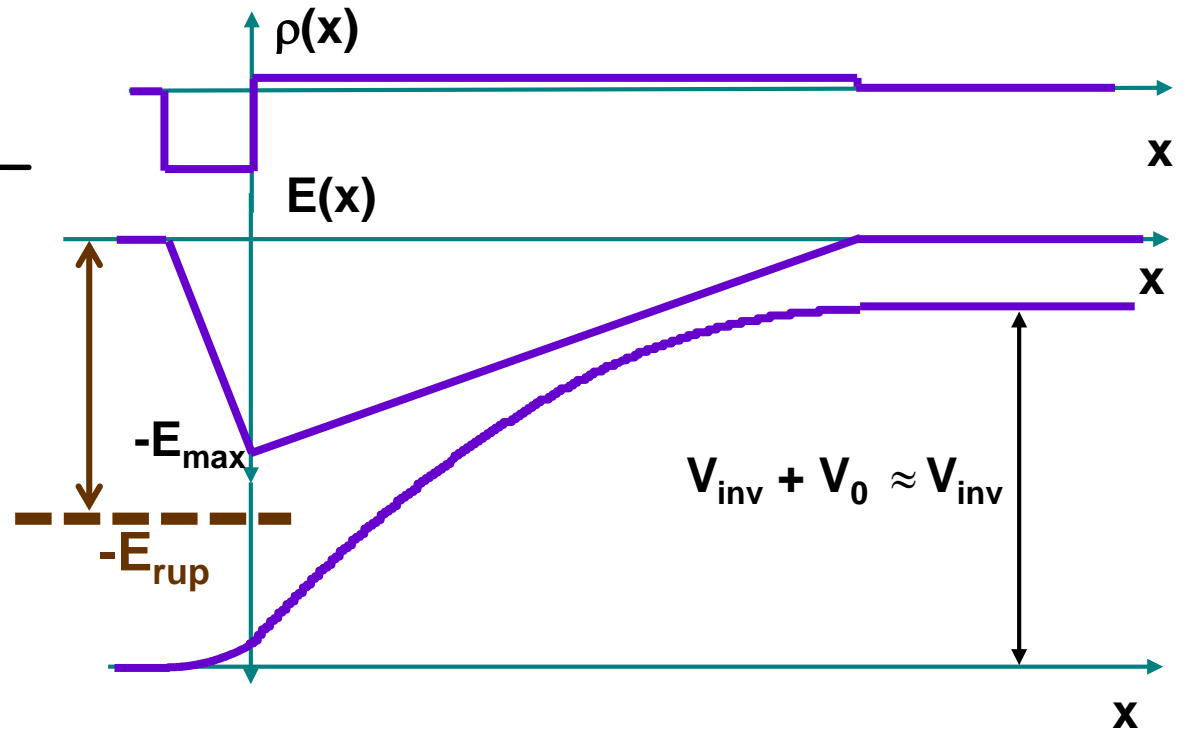


Límites de la polarización inversa

$$X_U > L_{ZT} = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon \cdot V_{inv}}{q \cdot N_D}}$$



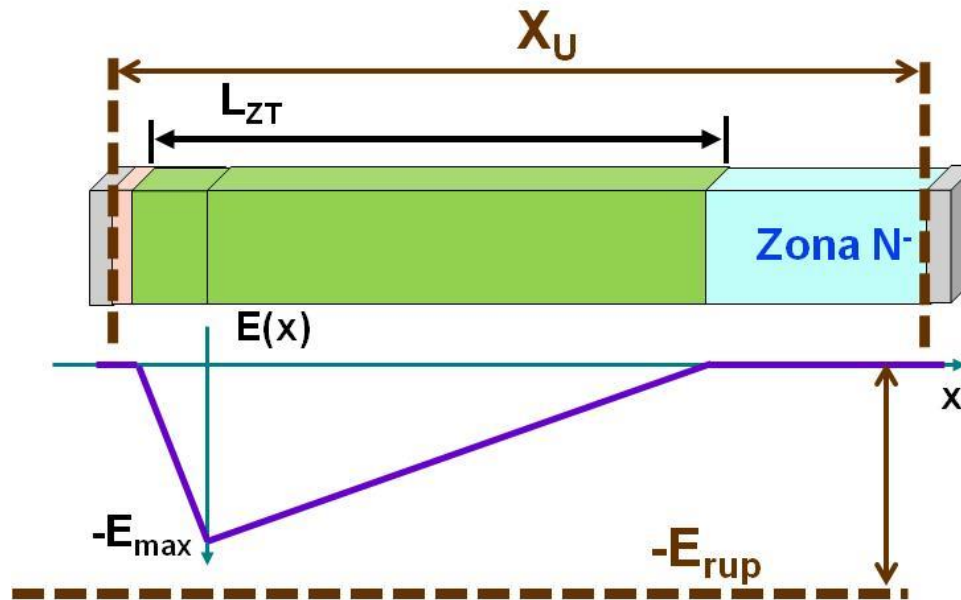
$$E_{rup} > E_{max} = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot N_D \cdot V_{inv}}{\epsilon}}$$



Límite por ruptura por
avalancha primaria



Caso extremo



$$X_U = L_{ZT} = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon \cdot V_{max}}{q \cdot N_D}}$$

$$E_{rup} = E_{max} = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot N_D \cdot V_{max}}{\epsilon}}$$



$$X_U = \frac{\epsilon \cdot E_{rup}}{q \cdot N_D}$$

$$V_{max} = \frac{\epsilon \cdot E_{rup}^2}{2 \cdot q \cdot N_D}$$



Construimos dos uniones, una de Si y otra de SiC que soporten la misma tensión máxima (I)

$$V_{\max} = \frac{\epsilon_{\text{Si}} \cdot E_{\text{rup_Si}}^2}{2 \cdot q \cdot N_{\text{D_Si}}} = \frac{\epsilon_{\text{SiC}} \cdot E_{\text{rup_SiC}}^2}{2 \cdot q \cdot N_{\text{D_SiC}}}$$



$$N_{\text{D_SiC}} = N_{\text{D_Si}} \cdot \frac{\epsilon_{\text{SiC}} \cdot E_{\text{rup_SiC}}^2}{\epsilon_{\text{Si}} \cdot E_{\text{rup_Si}}^2}$$



$$N_{\text{D_SiC}} = 26,14 \cdot N_{\text{D_Si}}$$

$$X_{\text{U_Si}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_{\text{Si}} \cdot V_{\max}}{q \cdot N_{\text{D_Si}}}}$$

$$X_{\text{U_SiC}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_{\text{SiC}} \cdot V_{\max}}{q \cdot N_{\text{D_SiC}}}}$$



$$X_{\text{U_Si}} = X_{\text{U_SiC}} \cdot \frac{E_{\text{rup_SiC}}}{E_{\text{rup_Si}}}$$



$$X_{\text{U_Si}} = X_{\text{U_SiC}} \cdot 6,67$$

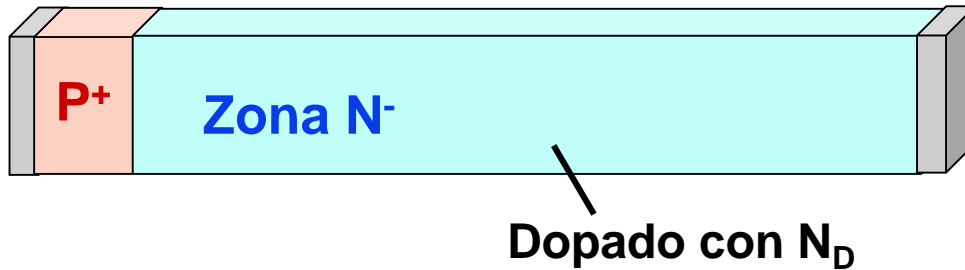
	Si	SiC
E_{rup}	$3 \cdot 10^5 \text{ V/cm}$	$2 \cdot 10^6 \text{ V/cm}$
ϵ_r	11,9	7
μ_n	$1350 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	$720 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$



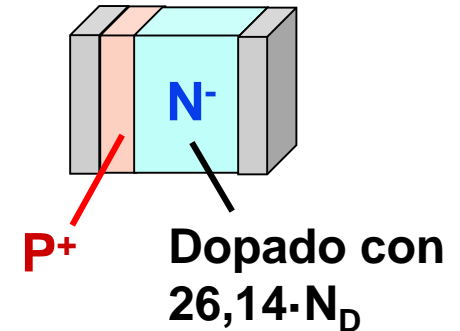
Construimos dos uniones, una de Si y otra de SiC que soporten la misma tensión máxima (II)

	Si	SiC
μ_n	1350 cm ² /V·s	720 cm ² /V·s

Unión de Si



Unión de SiC



$$R_{U_si} = R_{U_sic} \cdot 6,67 \cdot 26,14 \cdot \frac{720}{1350}$$



$$R_{U_si} = 92,94 \cdot R_{U_sic}$$



**Power Supply
Systems**

Apéndice II

**Contacto:
Javier Sebastián,
sebas@uniovi.es**

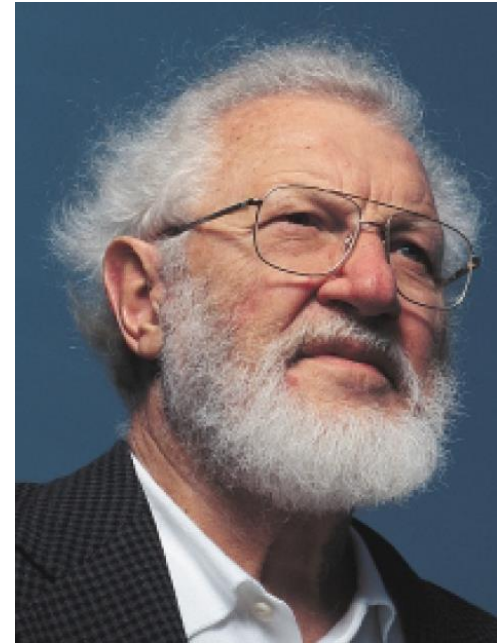


Power Supply
Systems

Herbert Kroemer

Premio Nobel de física en 2000 por "desarrollo de heteroestructuras para semiconductores de alta velocidad y optoelectrónica".

Favorite saying: "If in discussing a semiconductor problem, you cannot draw an energy band diagram, then you don't know what you are talking about."





Power Supply
Systems

Teoría de bandas

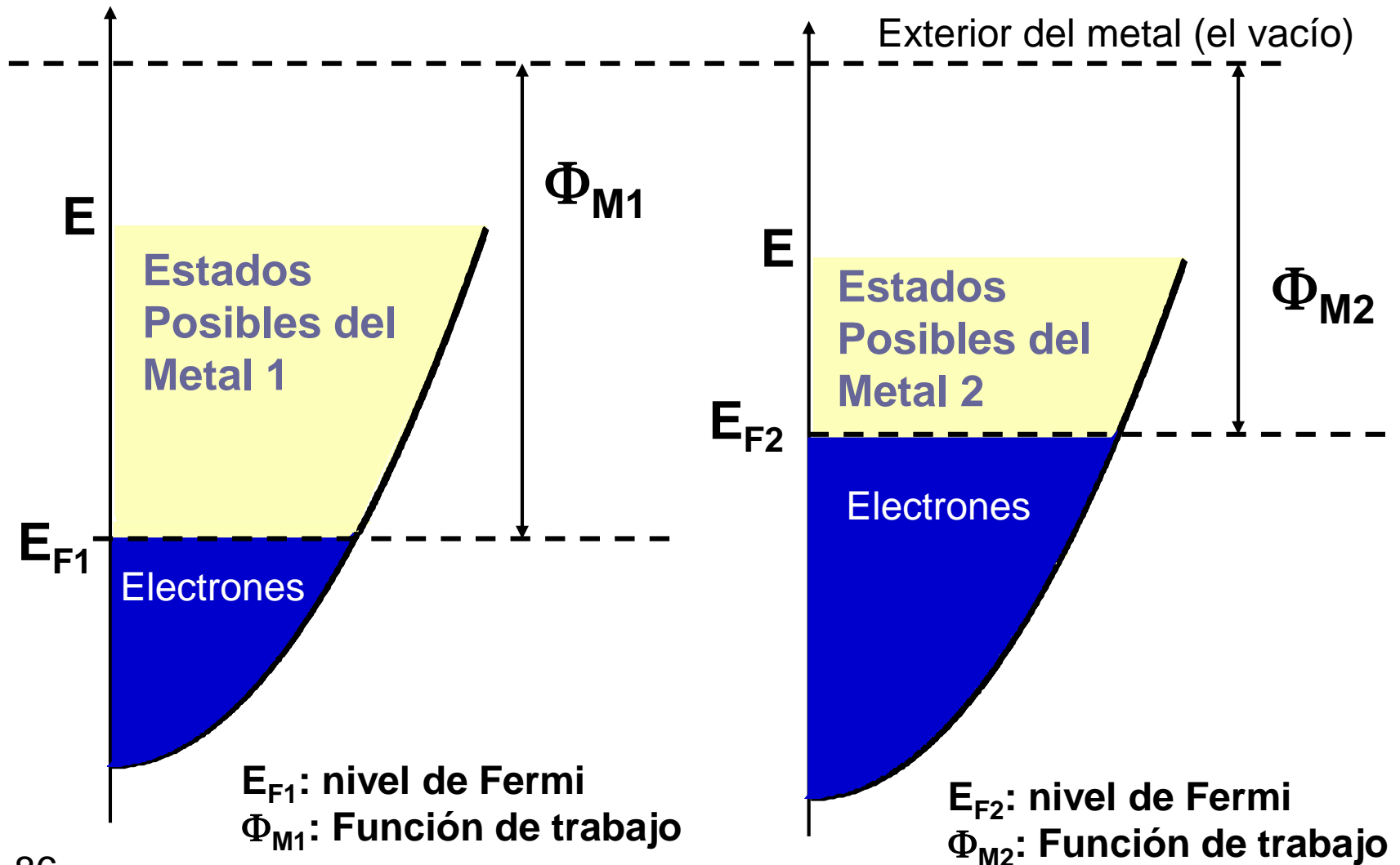


- En metales.
- En uniones de metales.
- En semiconductores.
- En homouniones de semiconductores.
- En heterouniones de semiconductores.
- Y, finalmente, el 2D gas.



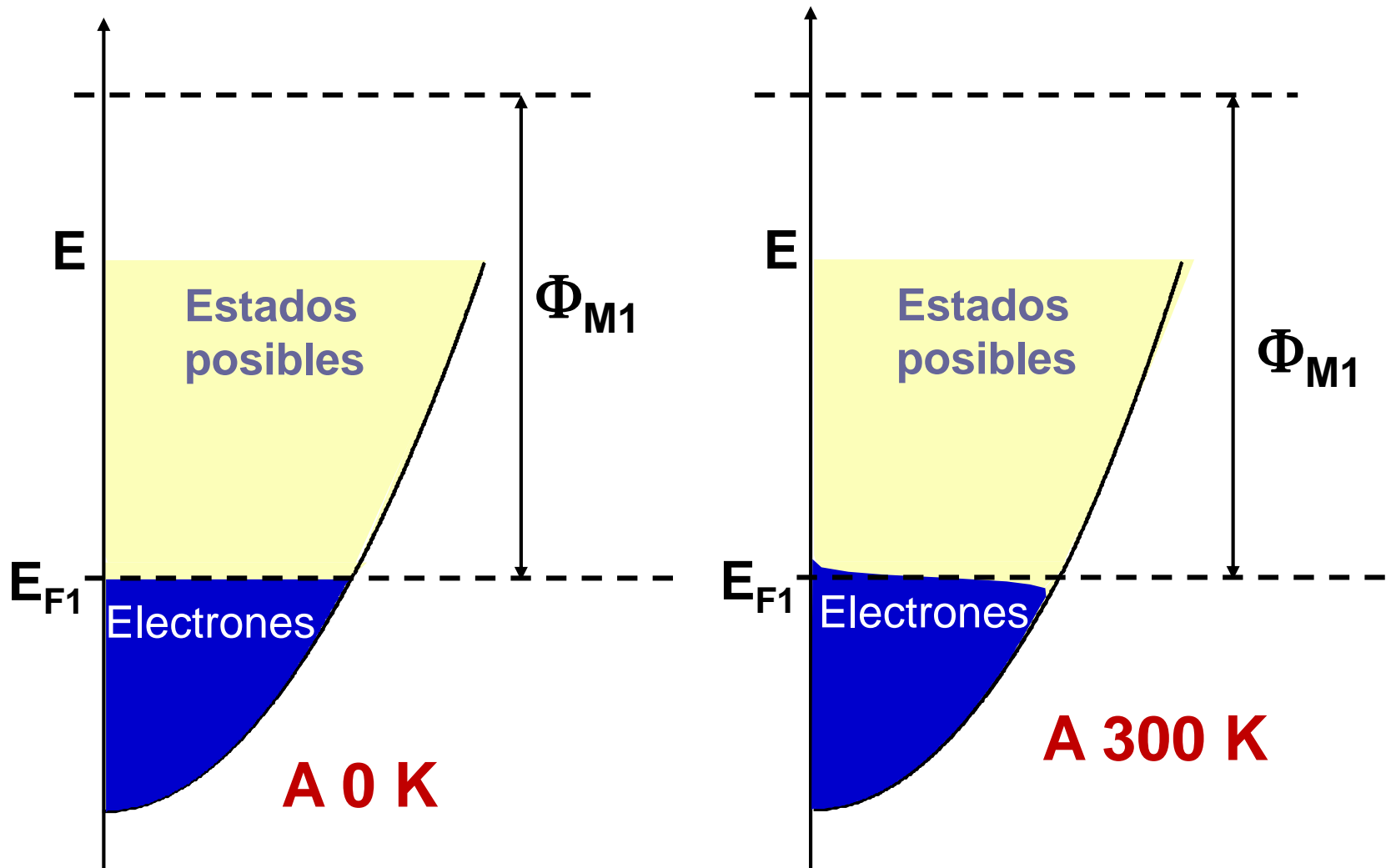
¿Cuánto cuesta robarle un electrón a un metal?

- Hay que estudiar los diagramas de bandas de un metal
- Estudiamos lo que pasa a 0 K





¿Qué pasa si estamos a temperatura ambiente?

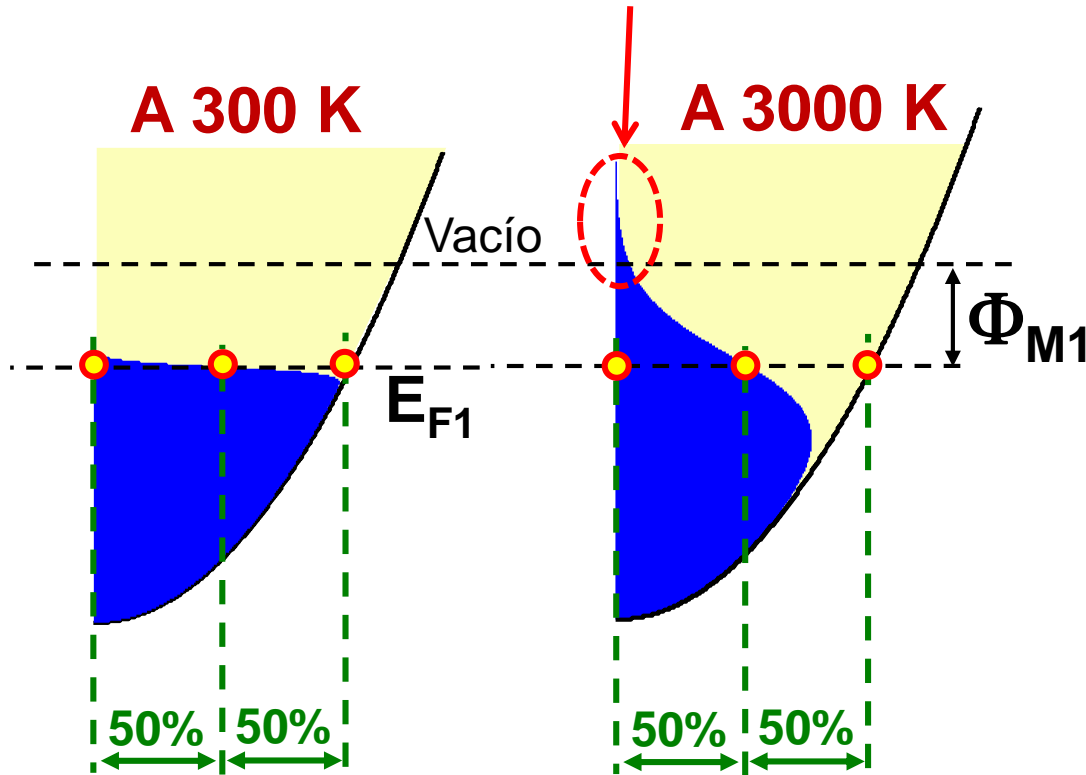


La situación no es muy distinta



¿Y si calentamos más?

Emisión termoiónica



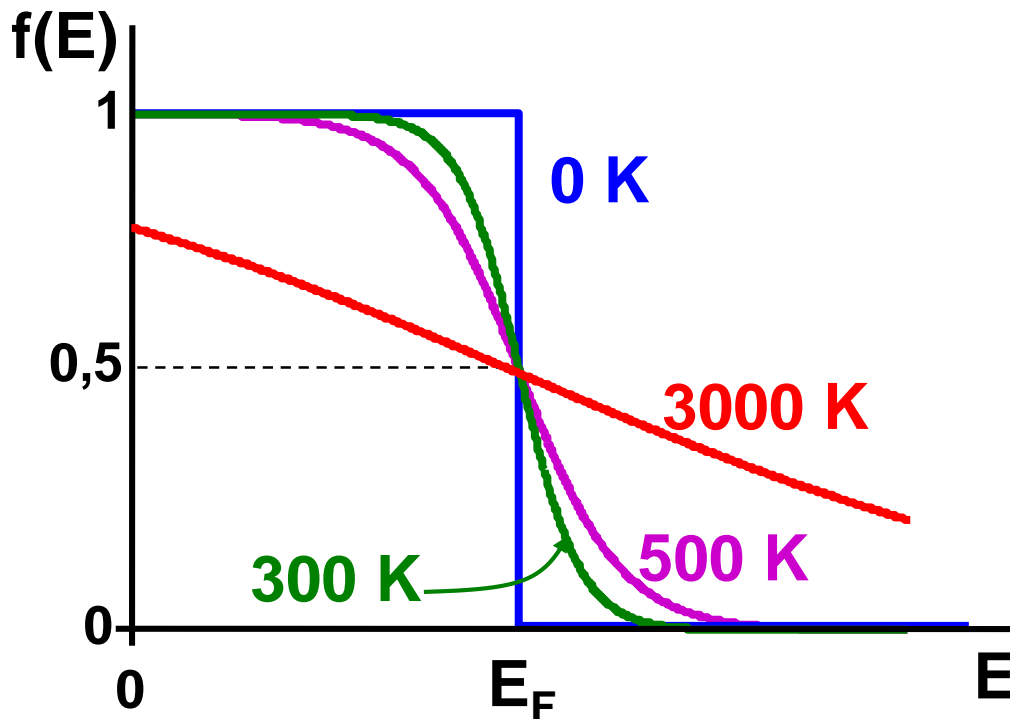
Válvulas termoiónicas

El nivel de Fermi en un metal
corresponde a que los electrones
ocupen la mitad de los estados posibles



Formalicemos todo esto: La distribución de Fermi-Dirac

- Definimos la función $f(E)$: es la probabilidad de que un estado de energía E esté ocupado por un electrón, en equilibrio



$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}}$$

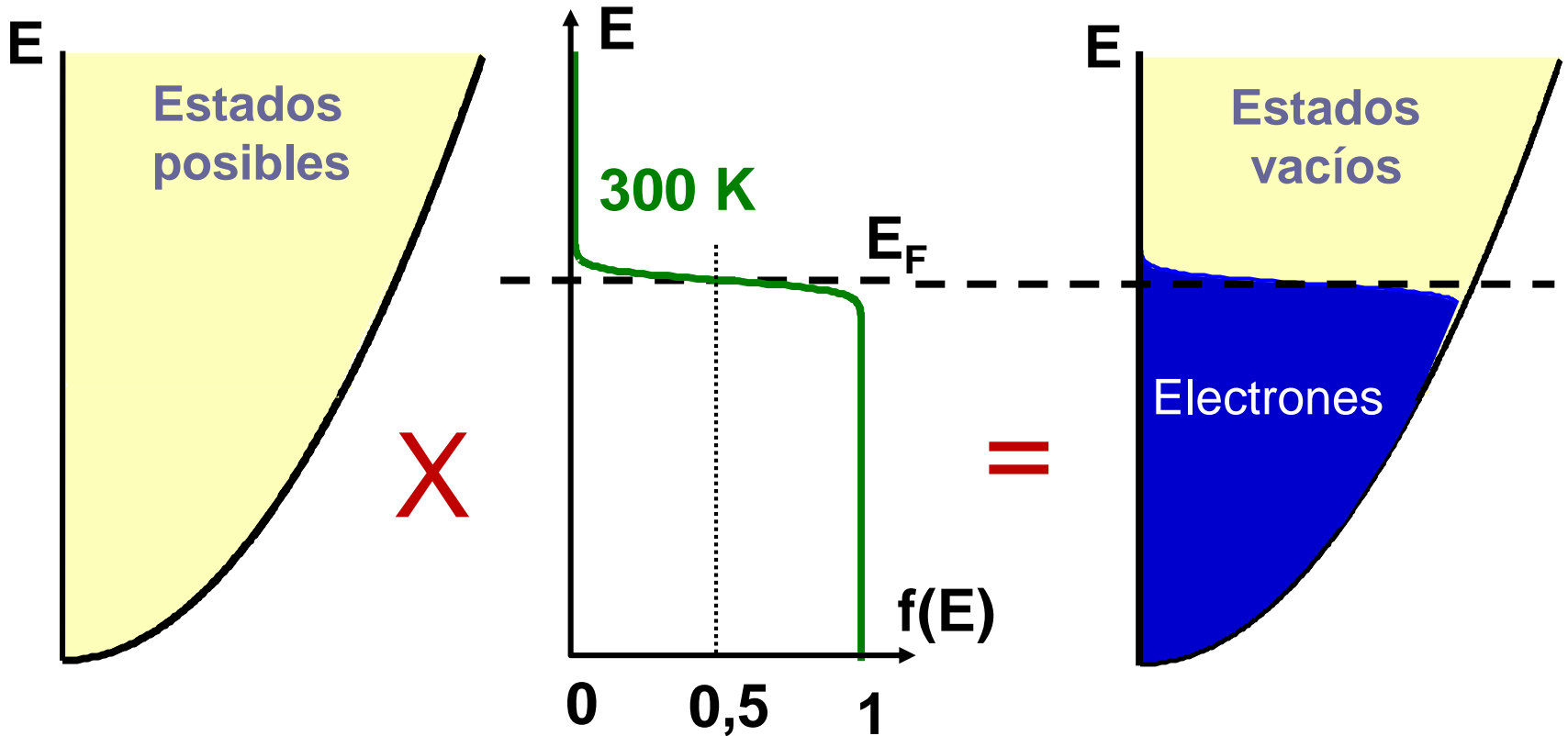
E_F = nivel de Fermi

k = constante de Boltzmann

T = temperatura absoluta



Obtención “formal” de la energía de los electrones libres en un metal



Estados
posibles

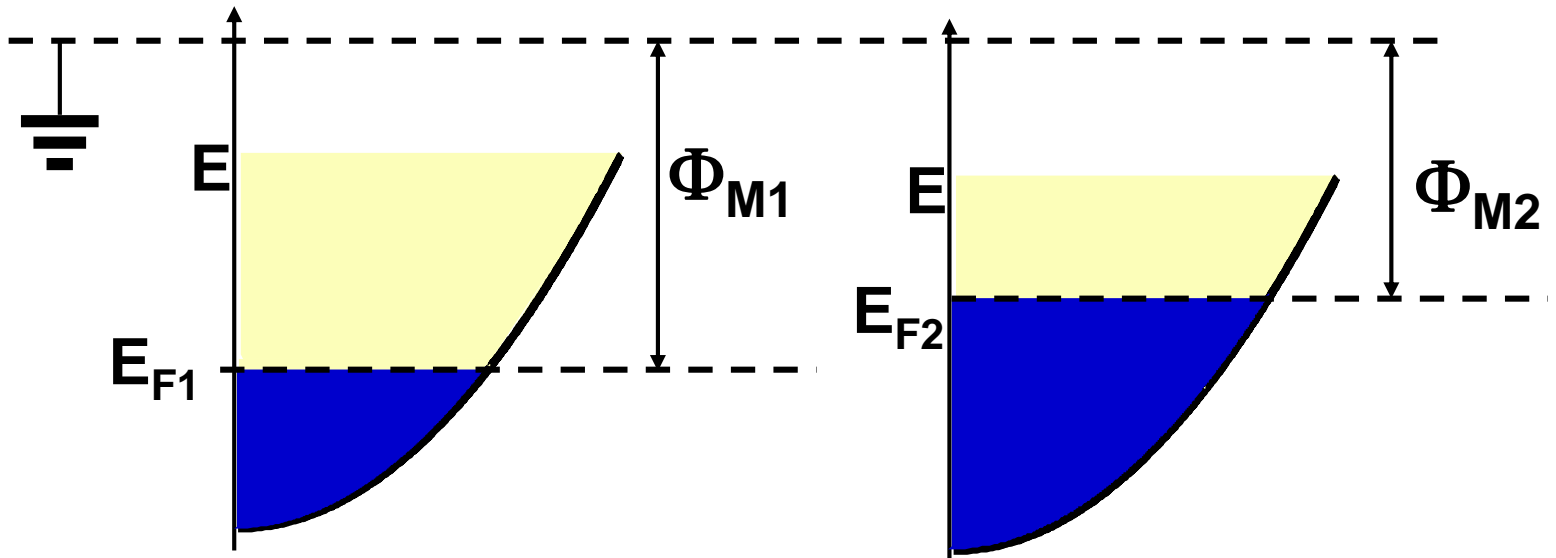
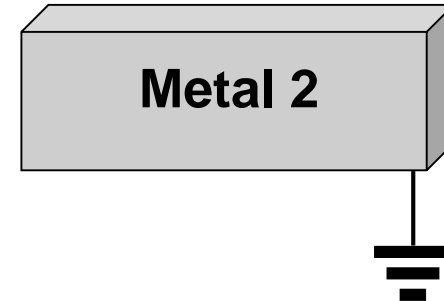
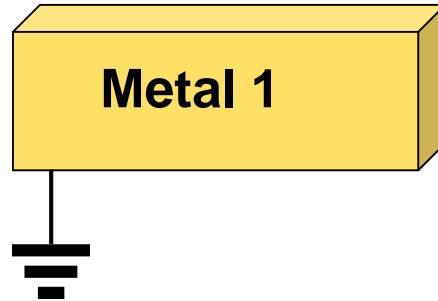
X Probabilidad
de ocupación

= Ocupación
real



¿Qué pasa si juntamos los metales (I)?

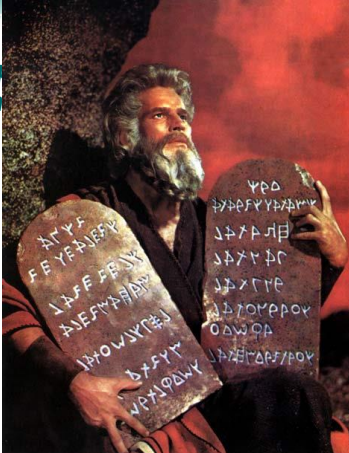
A 0 K



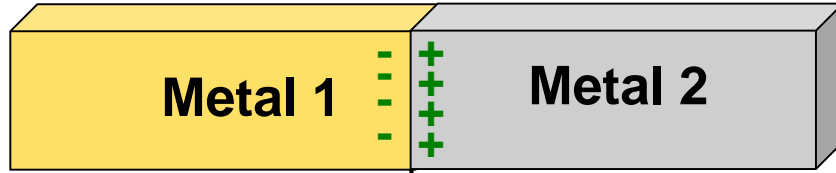


¿Qué pasa si juntamos los metales (II)?

Power Sup
System

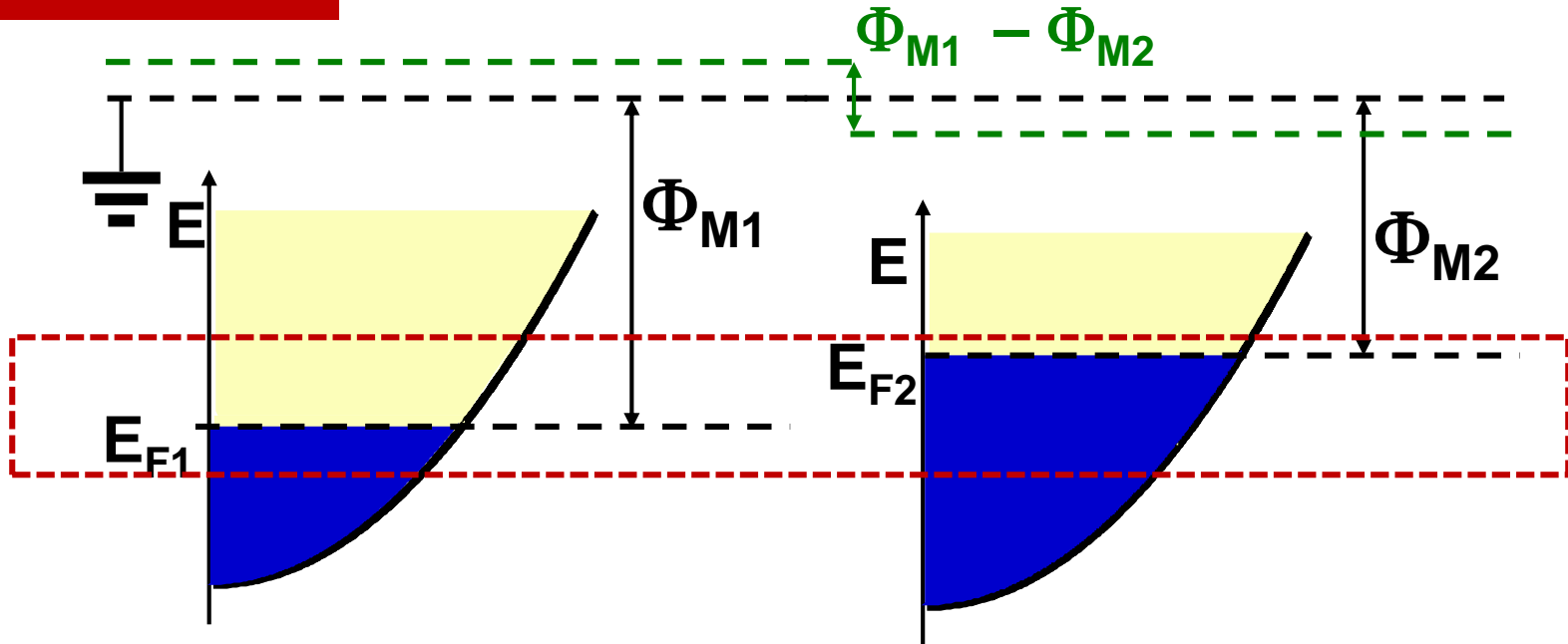


Seguimos a 0 K



$$V_0 = (\Phi_{M1} - \Phi_{M2})/q$$

Se igualan los niveles de Fermi





¿Qué pasa si juntamos los metales (III)?

- *A temperatura ambiente*
- *Cambiando la referencia de medición de energías*

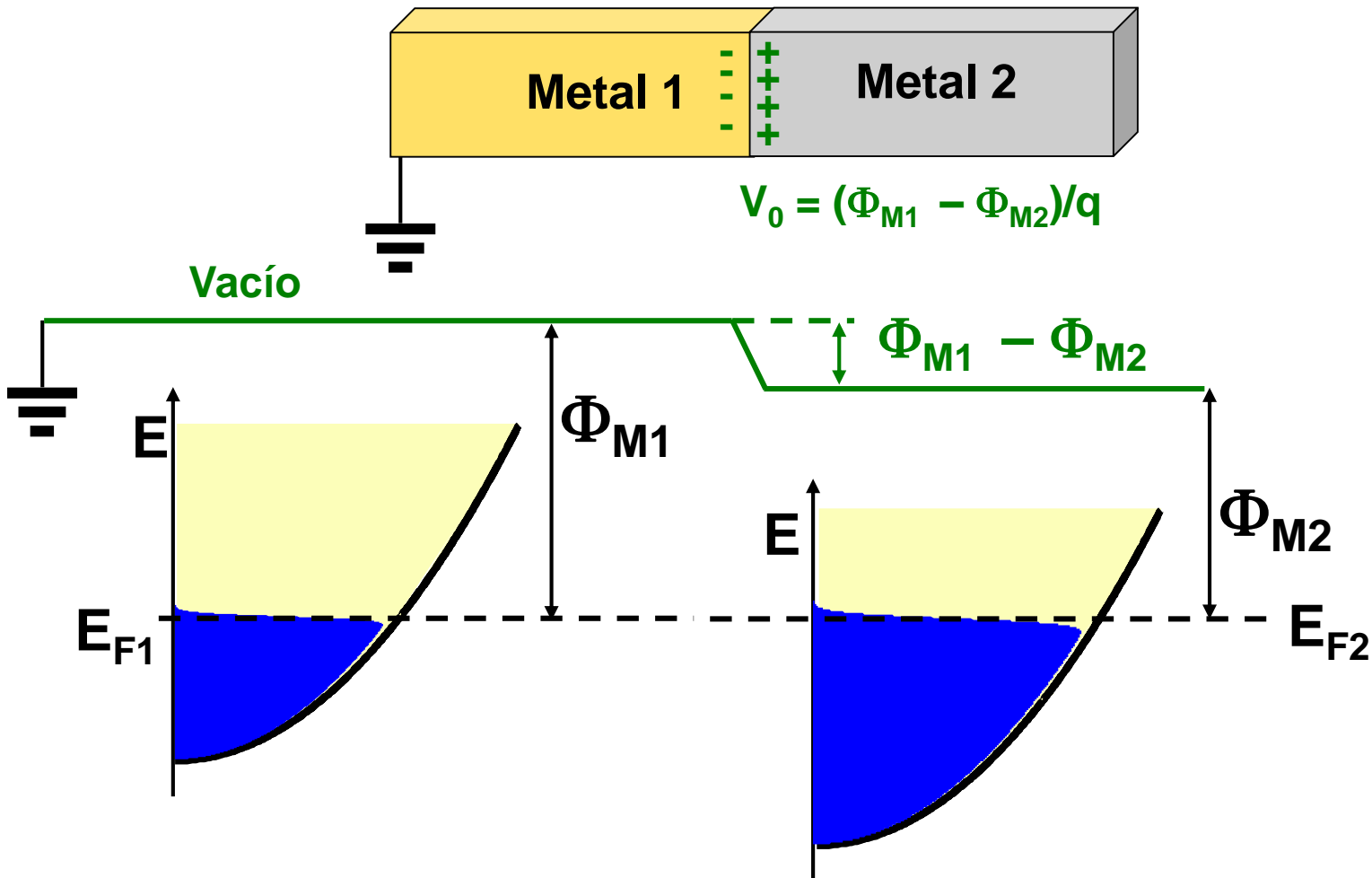
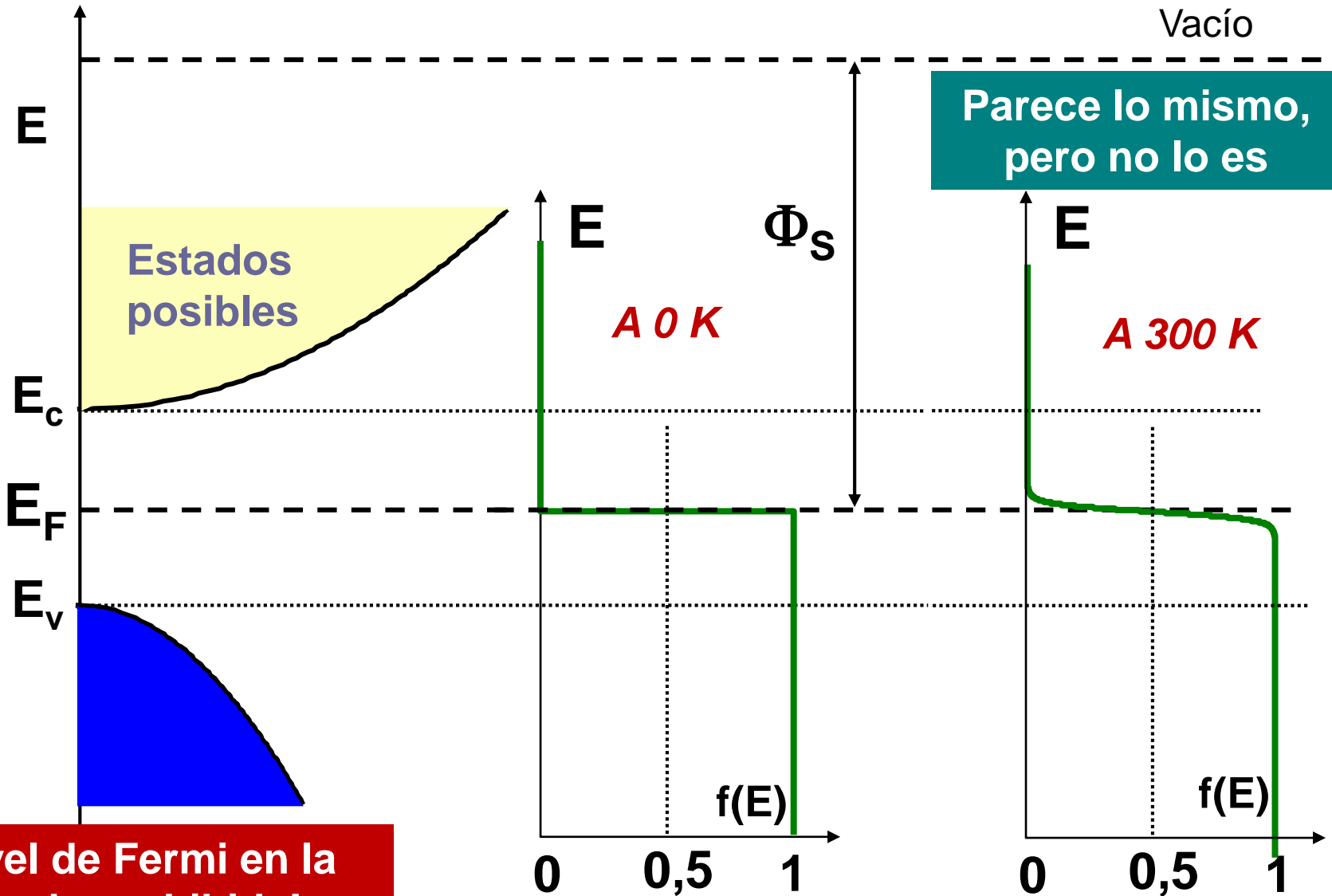




Diagrama de bandas de un semiconductor intrínseco (I)



¡Nivel de Fermi en la banda prohibida!



Diagrama de bandas de un semiconductor intrínseco (II)

Cambiamos la escala horizontal para ver qué ha pasado

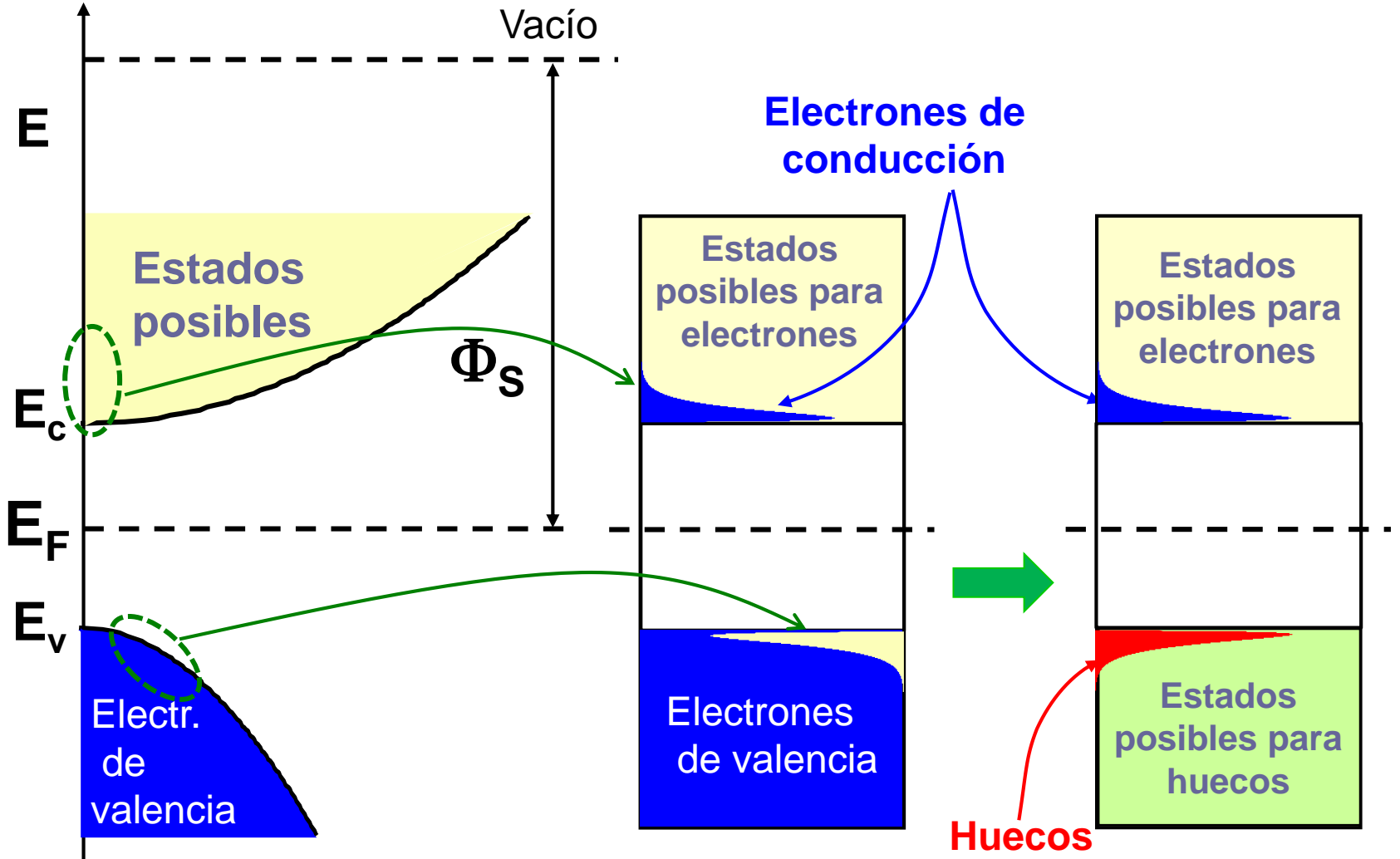




Diagrama de bandas de un semiconductor extrínseco N

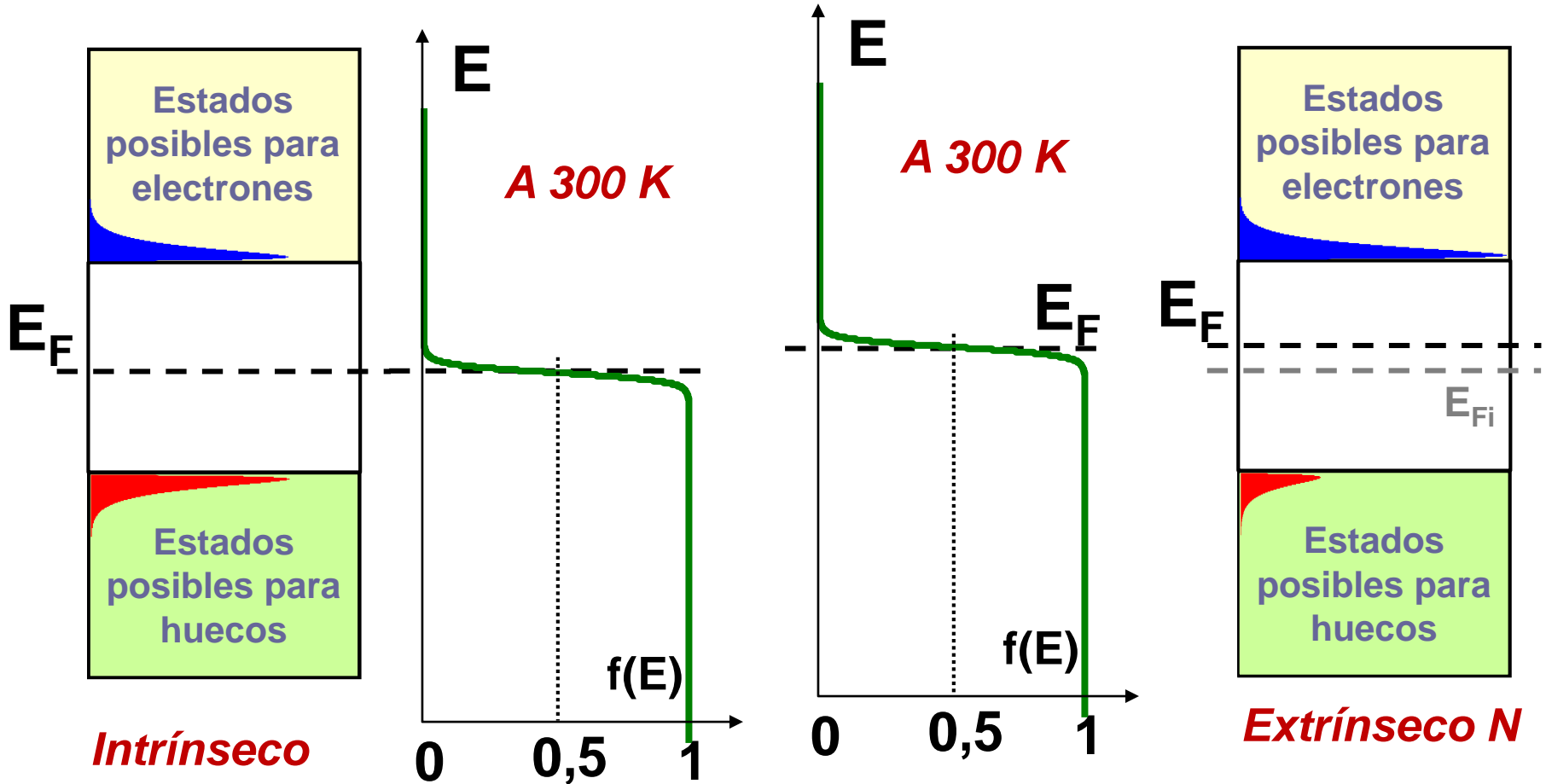
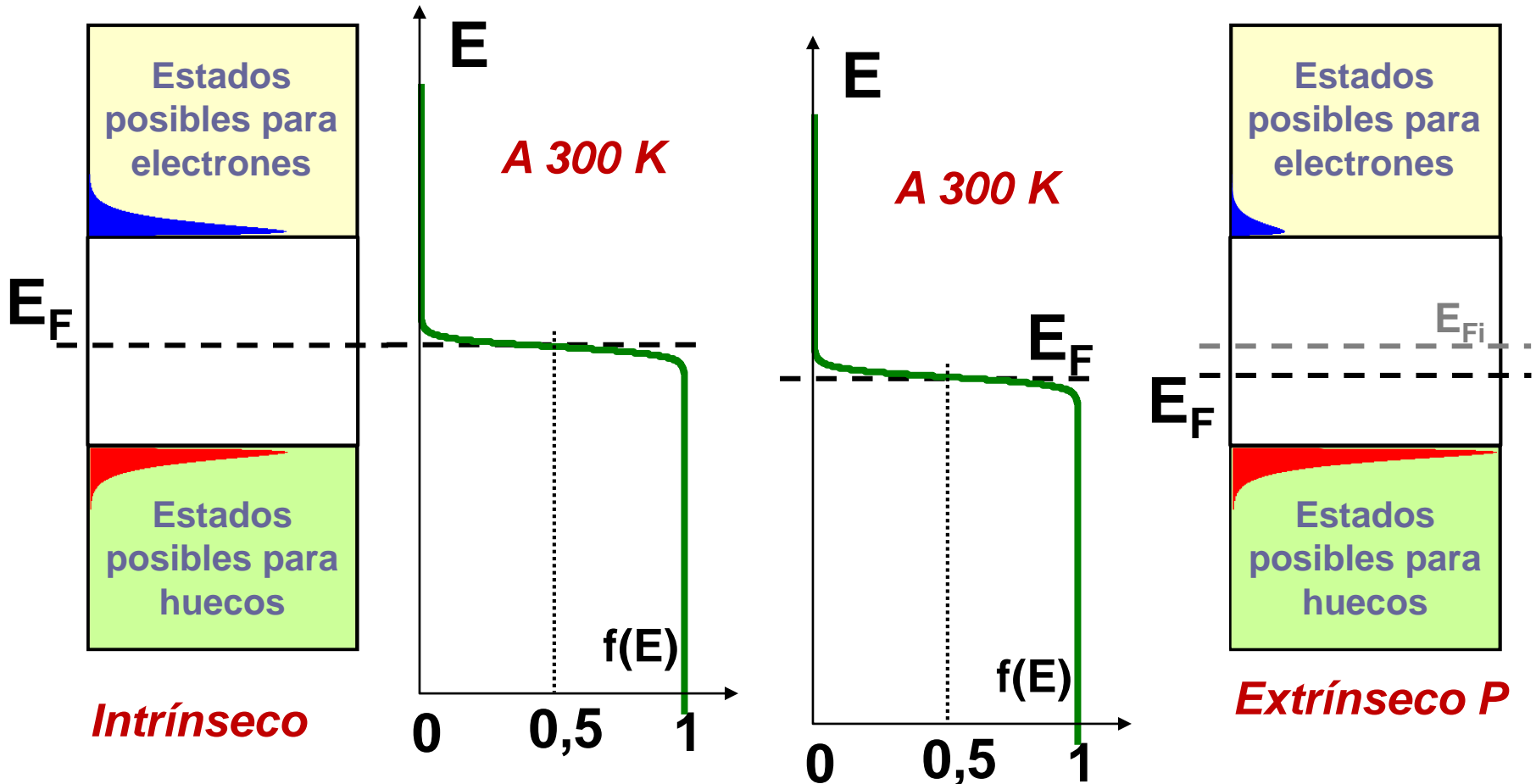




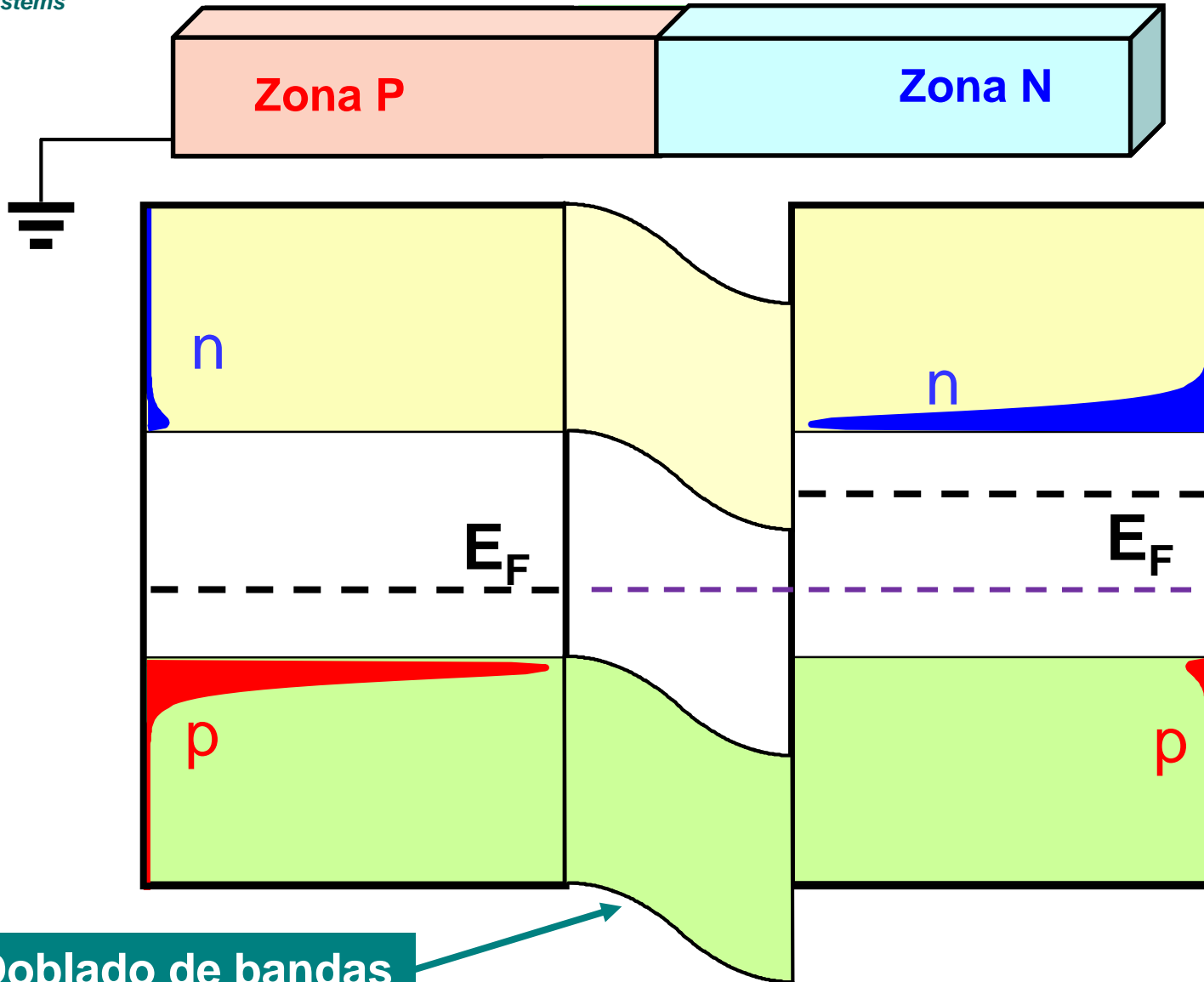
Diagrama de bandas de un semiconductor extrínseco P





Diagramas de bandas de una homounión (I)

Power Supply
Systems



Doblado de bandas

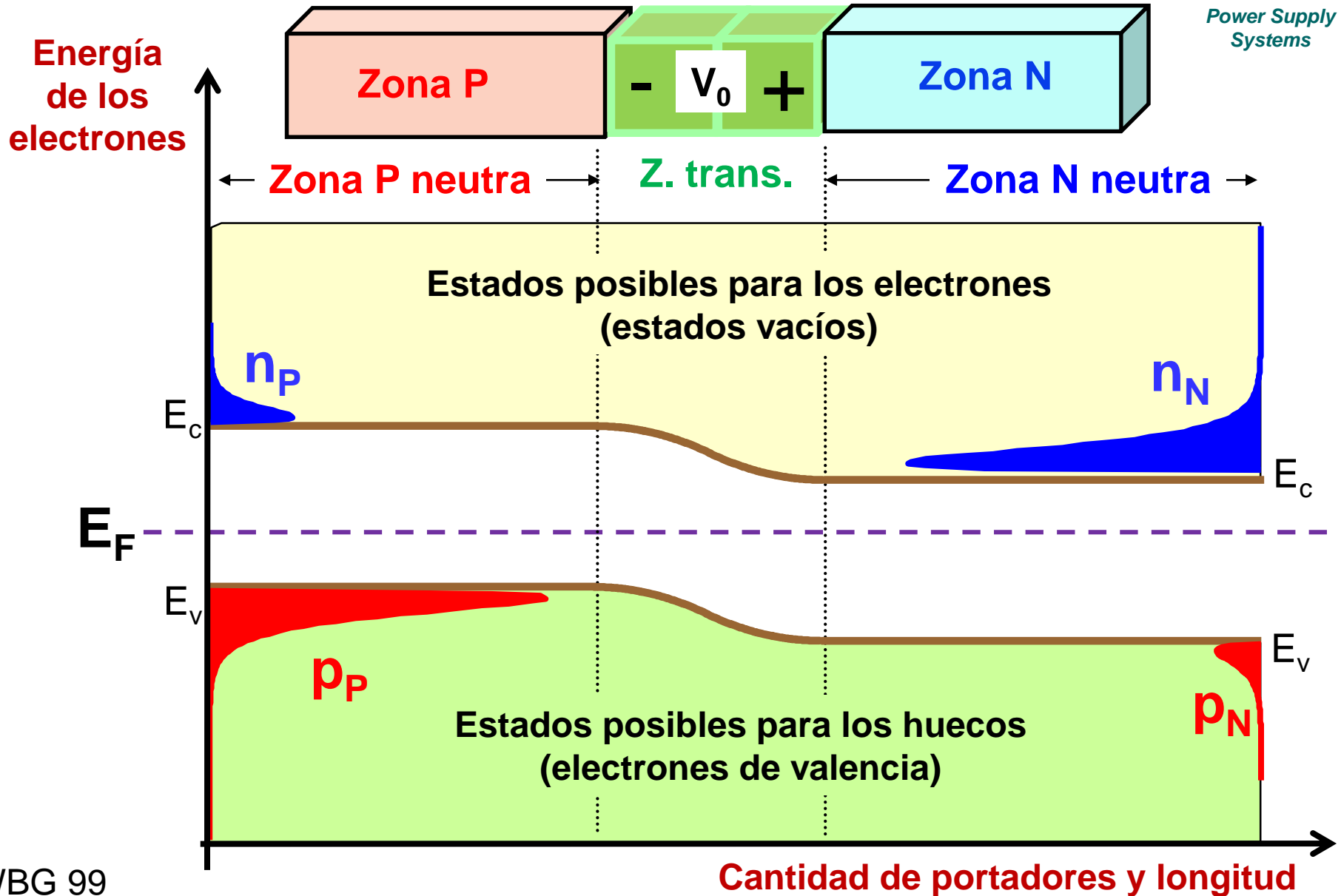


Se igualan
los niveles
de Fermi

Diagramas de bandas de una homounión (II)



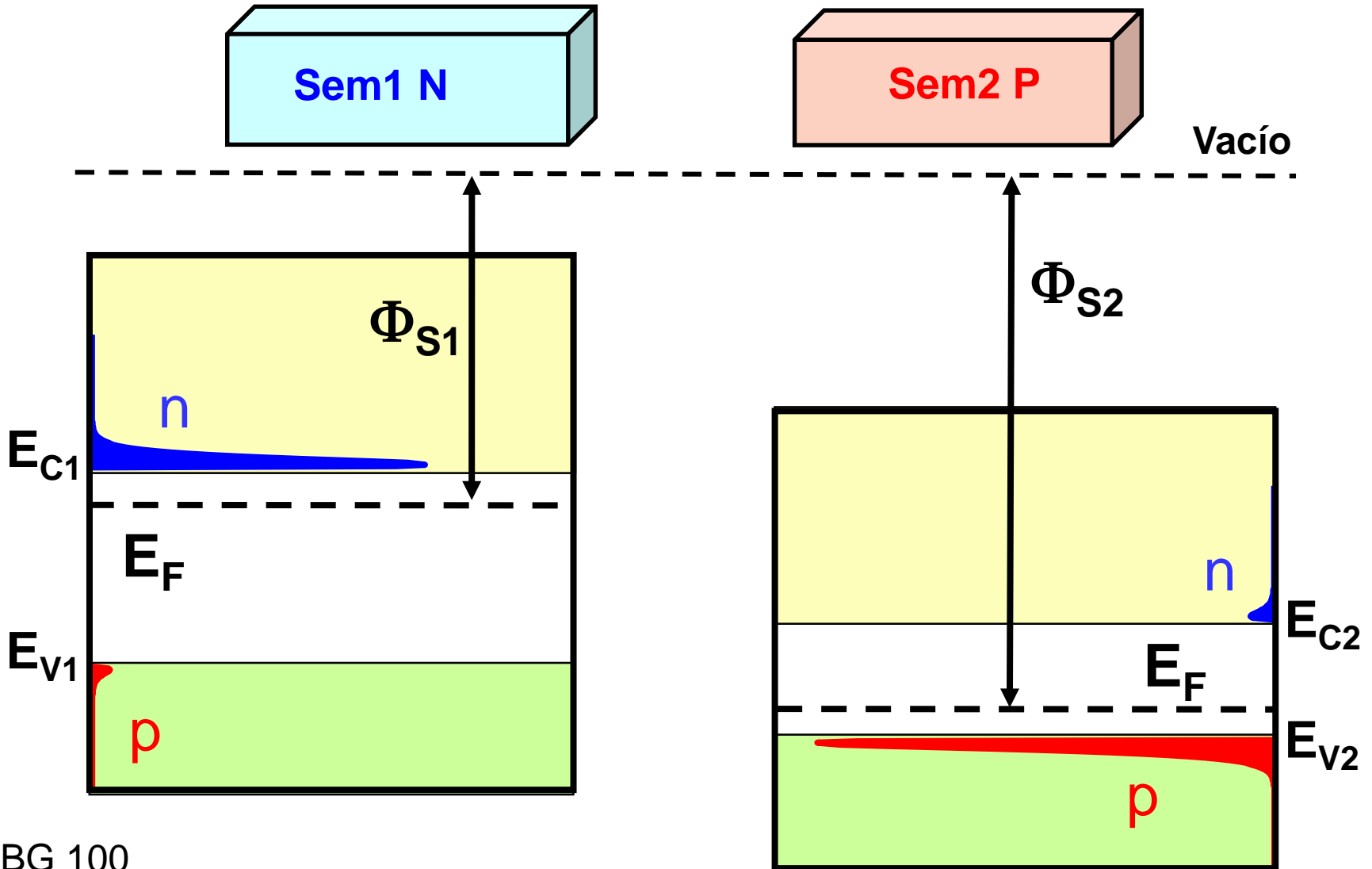
Power Supply Systems





Diagramas de bandas de una heterounión (I)

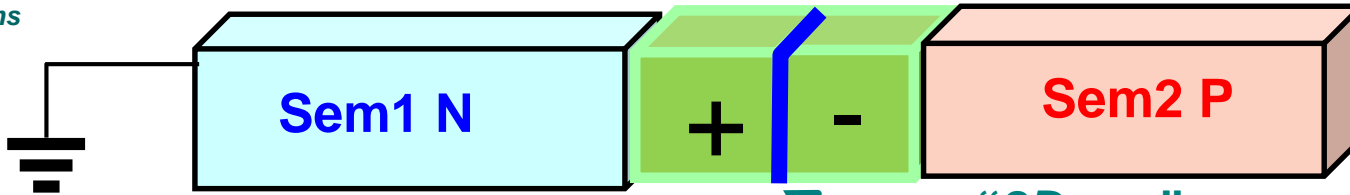
- *Distintas funciones de trabajo Φ_S*
- *Distintas anchuras de banda prohibida E_C-E_V*





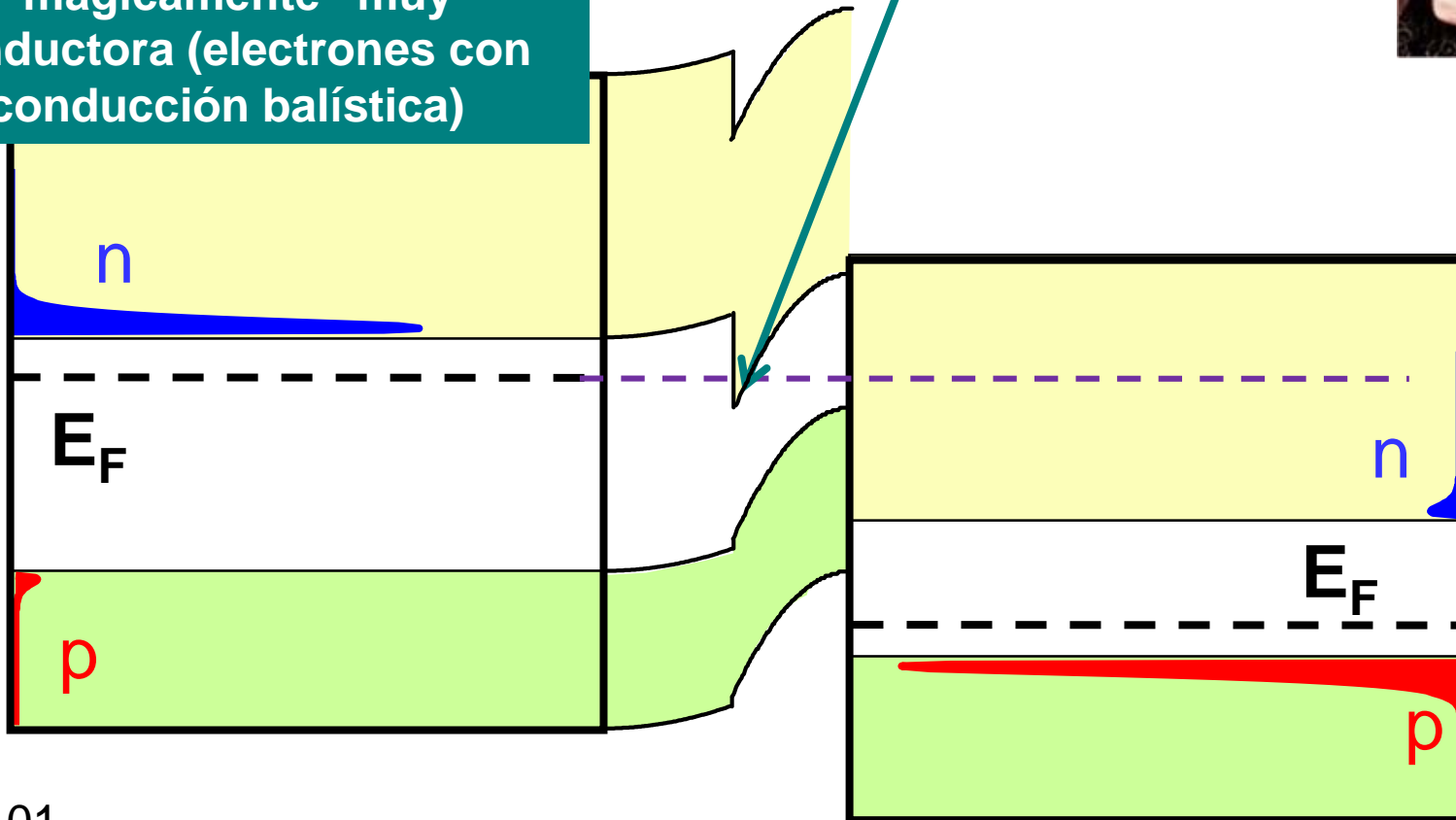
Diagramas de bandas de una heterounión (II)

Power Supply
Systems



“2D-gas”:
Nivel de Fermi en la
banda de conducción

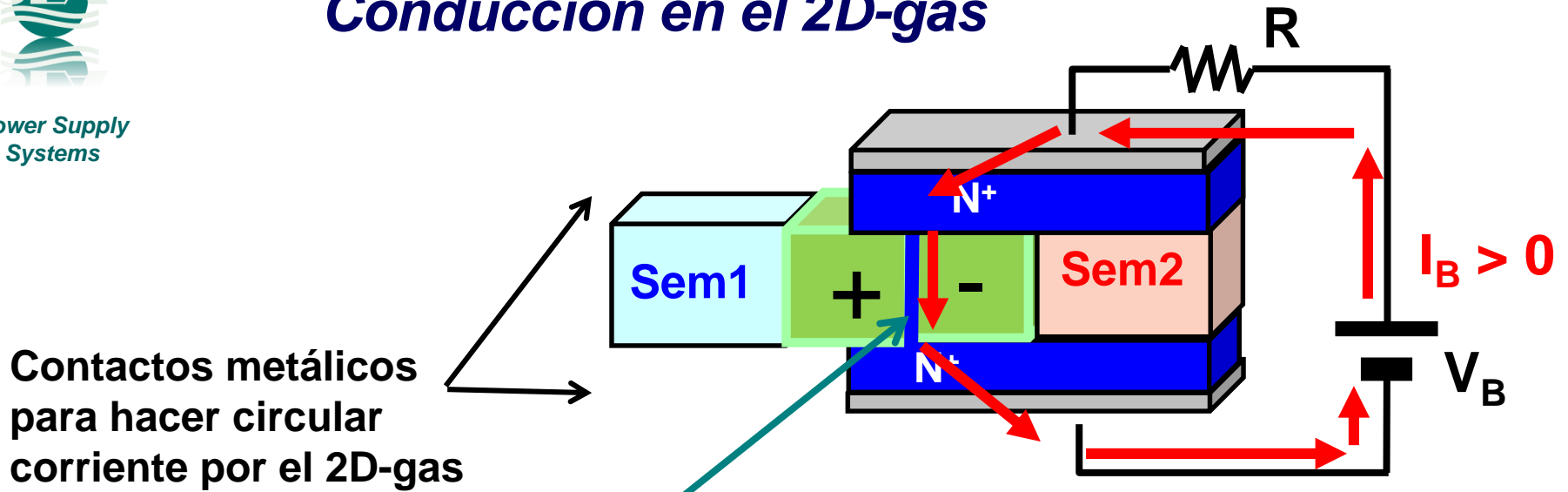
El 2D-gas es una película
“mágicamente” muy
conductora (electrones con
conducción balística)





Power Supply
Systems

Conducción en el 2D-gas

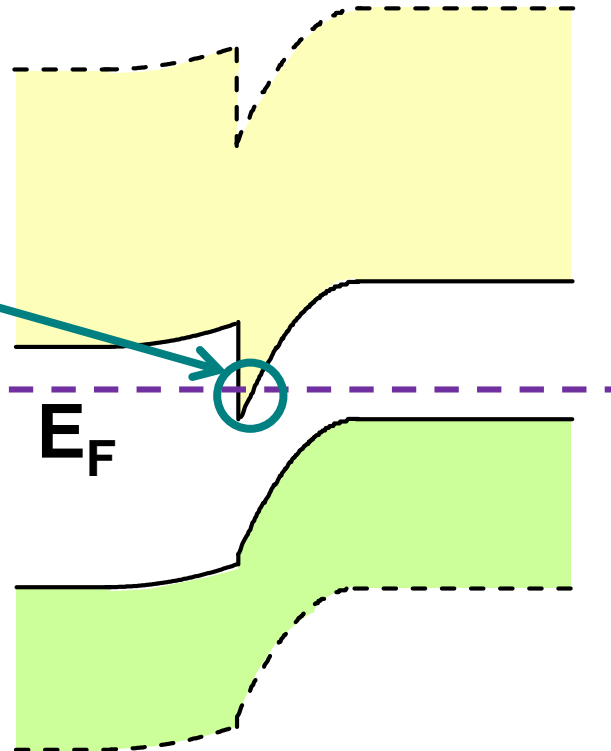


Contactos metálicos
para hacer circular
corriente por el 2D-gas

2D-gas

2D-gas

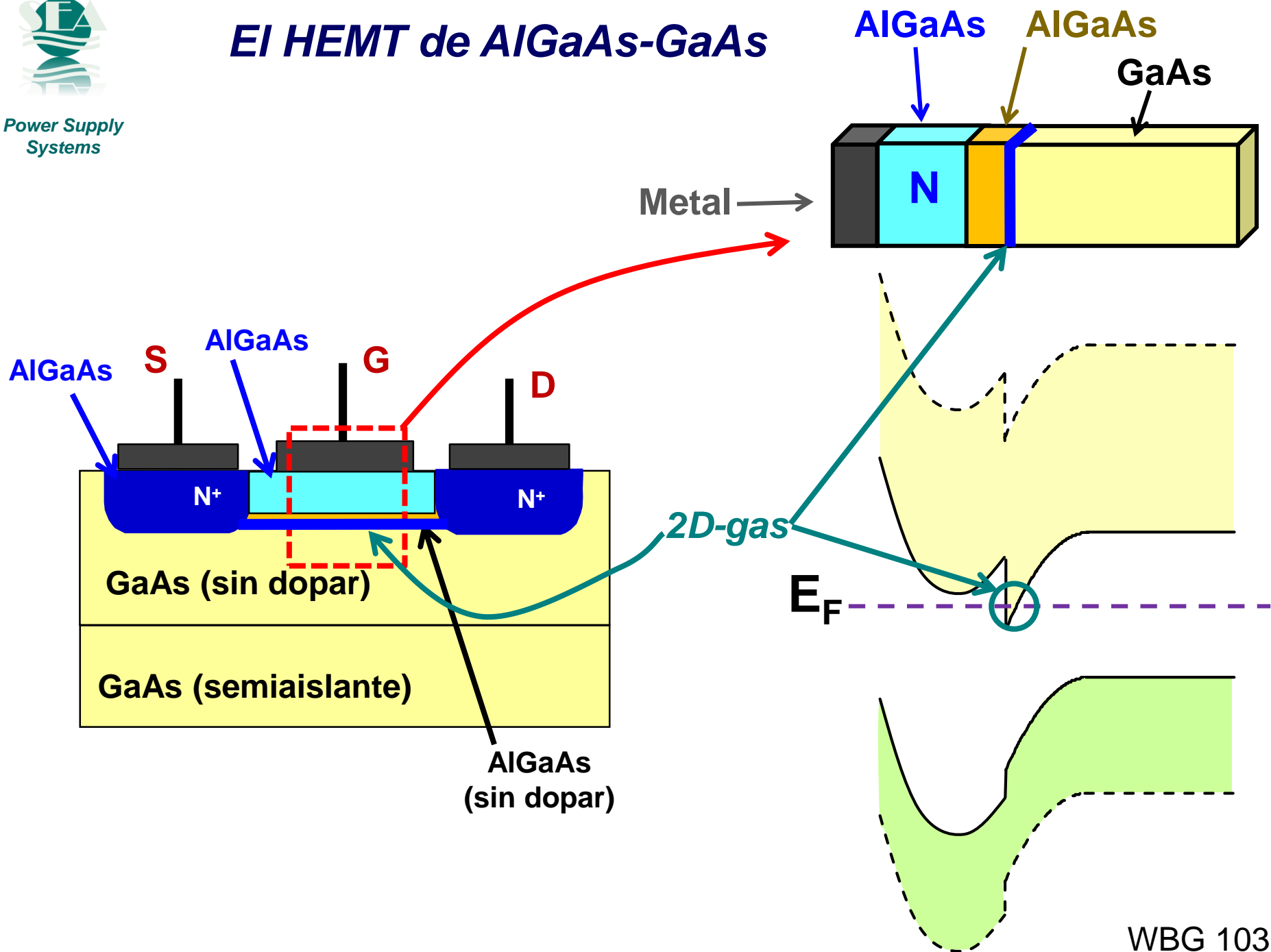
Es la base de los
HEMTs
(High Electron
Mobility Transistors)





Power Supply
Systems

El HEMT de AlGaAs-GaAs





Resumen del HEMT de señal de AlGaAs-GaAs

➤ Es una especie de JFET (MESFET) “normalmente cerrado” con un canal “mágicamente” conductor (formado por un “gas bidimensional de electrones”)

➤ Polarizando inversamente la fuente se puede disminuir (e incluso eliminar) el 2D-gas

