

EL42A - Circuitos Electrónicos

Clase No. 12: Transistores de Efecto de Campo (3)

Patricio Parada

`pparada@ing.uchile.cl`

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Chile

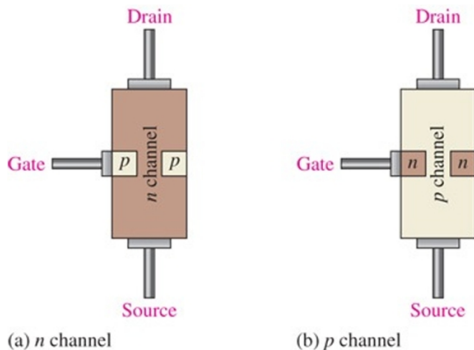
10 de Septiembre de 2009

Transistores *pn* JFET y MESFET
Operación del Transistor JFET
Característica Voltaje-Corriente

Análisis DC con Circuitos JFET y MESFET

- ▶ Existen dos categorías de transistores de efecto de campo por juntura (JFET)
 - ▶ Transistor de Efecto de Campo de Juntura pn (JFET pn).
 - ▶ Transistor de Efecto de Campo de Juntura Metal-Semiconductor (MESFET).
- ▶ El principio básico tras un JFET es que la juntura entre la compuerta y la fuente está polarizada en inversa para controlar la corriente en el canal entre fuente y drenaje.
- ▶ El voltaje entre la compuerta y el canal genera un campo eléctrico perpendicular al canal, lo que permite **modular** su altura y controlar la corriente I_D .
- ▶ Al igual que los MOSFETs, existen JFETs de canal n y canal p .

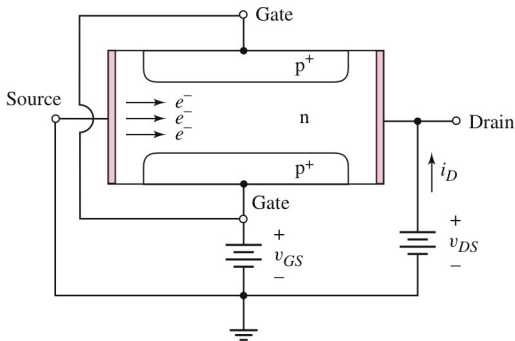
Introducción II



- Aunque los JFETs fueron desarrollados antes que los MOSFETs, las aplicaciones y usos de éste último han superado con creces al JFET.

Operación del JFET *pn* I

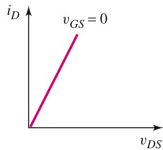
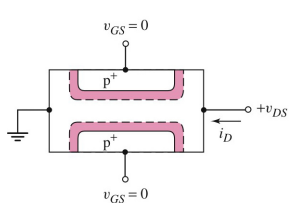
- La figura muestra una vista en corte de la sección de un JFET *pn* típico.



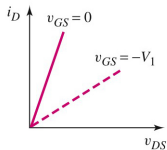
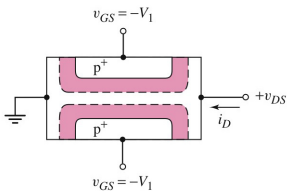
- ▶ Los portadores mayoritarios (electrones) circulan desde la fuente al drenado a través del canal n .
- ▶ El JFET a veces es llamado un **dispositivo portador mayoritario**.
- ▶ Notar que los dos terminales de compuerta están conectados al mismo punto.
- ▶ En un JFET de canal p los portadores mayoritarios (huecos) circulan de fuente a drenado.

- ▶ En general, los JFETs de canal n tendrán mejor respuesta para altas frecuencias que un JFET de canal p , porque los electrones tienen mayor movilidad que los huecos.
- ▶ Consideremos que la fuente (S) está conectado a tierra. Analizaremos tres casos.
- ▶ **Figura (a):** Si $v_G = 0$, y aplicamos un pequeño voltaje positivo al terminal de drenaje v_{DS} , comienza a circular corriente i_D que es proporcional al voltaje aplicado.
- ▶ El canal n actúa como una pequeña resistencia y se tiene una característica lineal (óhmica).

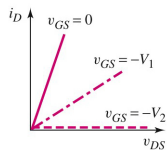
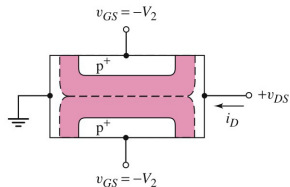
Operación del JFET *pn* IV



(a)



(b)



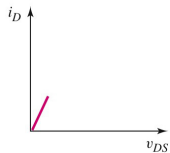
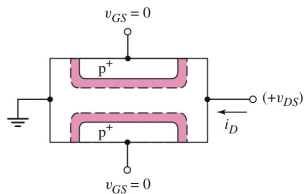
(c)

- ▶ **Figura (b):** Si aplicamos un voltaje $v_{GS} = -V_1 < 0$, la juntura compuerta-canal pn queda polarizada en forma inversa.
- ▶ Esto ensancha la región de carga, lo que estrecha el canal y aumenta la resistencia del canal n .
- ▶ Por lo tanto, la pendiente de la curva i_D vs. v_{DS} disminuye, tal como podemos ver en la figura (b).
- ▶ **Figura (c):** hemos considerado un voltaje $v_{GS} = -V_2 < -V_1$.
- ▶ Los efectos se intensifican, haciendo más difícil la conducción.

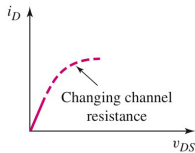
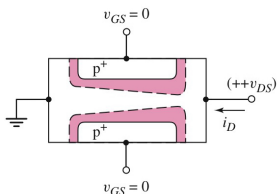
- ▶ Cuando la polarización de la compuerta v_{GS} es tal que la región de carga llena por completo el espacio correspondiente al canal se dice que el transistor está en la condición de **pinchoff**.
- ▶ En este caso, la corriente $i_D \approx 0$.
- ▶ El JFET pn está “encendido” (modo de vaciado) siempre y cuando no se aplique un voltaje negativo a la compuerta para “apagarlo”.

Operación del JFET *pn* VII

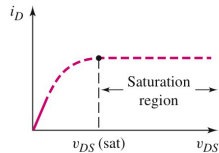
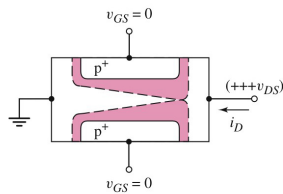
- Consideremos ahora el caso en que $v_{GS} = 0$. Veamos qué ocurre al variar el voltaje v_{DS} .



(a)



(b)

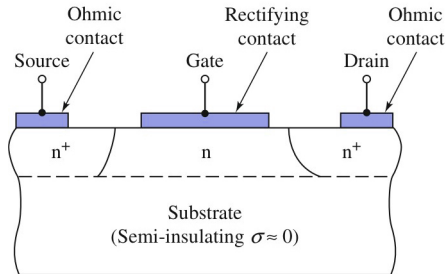


(c)

- ▶ **Figura (a):** Estamos en la misma situación que antes. El JFET pn se comporta como una resistencia. Estamos en la región **óhmica** del transistor.
- ▶ **Figura (b):** A medida que aumentamos v_{DS} la juntura compuerta-canal pn se polariza en forma inversa cerca de la región de drenado, reduciendo la altura del canal en este sector.
- ▶ En este caso, comienza a aumentar la resistencia a la circulación de portadores mayoritarios por el canal, produciendo un similar al visto en la región de triodo visto en los MOSFETs.
- ▶ **Figura (c):** Podemos seguir aumentando el voltaje v_{DS} hasta que el canal se estrangule por completo en la región de drenado.
- ▶ Cualquier aumento por encima de este voltaje de pinchoff no incrementará la circulación por el canal.

Operación del MESFET I

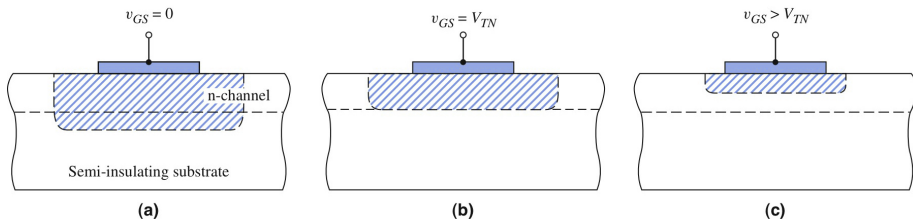
- La figura muestra una vista en corte de la sección de un MESFET típico.



- ▶ En este caso, la juntura compuerta-canal es una juntura del tipo barrera de Schottky, en lugar de la juntura *pn* que vimos en el JFET.
- ▶ Aunque los hay de silicio, la mayor parte se construyen de arsenido de galio (GaAs).
- ▶ Estos dispositivos tienen alta movilidad de portadores, lo que los hace ideal para aplicaciones de alta frecuencia.
- ▶ La aplicación de polarización inversa entre compuerta y fuente induce la aparición de una región de carga bajo la compuerta metálica del dispositivo.

Operación del MESFET III

- ▶ Se produce un fenómeno de modulación del canal similar al visto en el JFET *pn*.
- ▶ Si se aplica un voltaje suficientemente negativo entre compuerta y fuente, esta región puede eventualmente llegar al sustrato, generando un efecto de pinchoff.



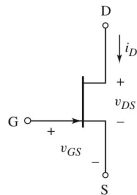
- ▶ A diferencia del JFET, donde el transistor está “on” para $v_{GS} = 0$ V, los MESFETs presentan diferentes opciones
- ▶ **Figura (a):** Observamos que el grosor del canal es menor que el de la región de carga.
- ▶ **Figura (b):** Para abrir el canal se debe aplicar un pequeño voltaje positivo.
- ▶ El voltaje crítico que separa ambos casos es el voltaje de pinchoff del MESFET, y es positivo.

Característica Voltaje-Corriente JFET I

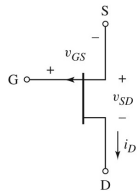
- ▶ El símbolo utilizado para denotar un JFET es similar al de los MOSFETs.
- ▶ En la figura (a) tenemos el símbolo para el JFET de canal n y en la figura (b) para el del canal p .
- ▶ La característica ideal de voltaje-corriente en la **región de saturación** es

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_p} \right)^2 \quad (1)$$

donde I_{DSS} es la corriente de saturación cuando $v_{GS} = 0$ y V_P es el voltaje de pinchoff.

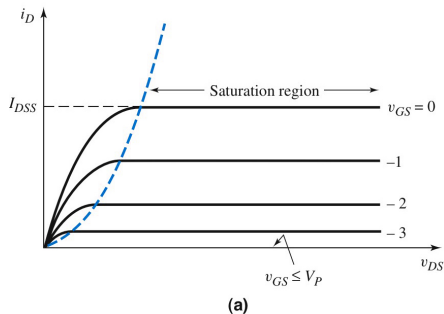


(a)

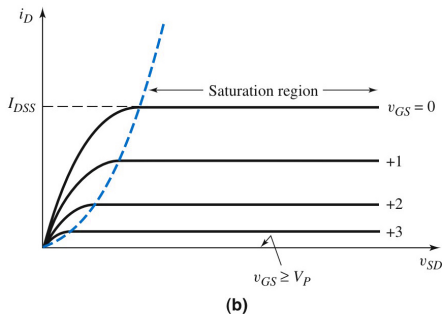


(b)

Característica Voltaje-Corriente JFET II

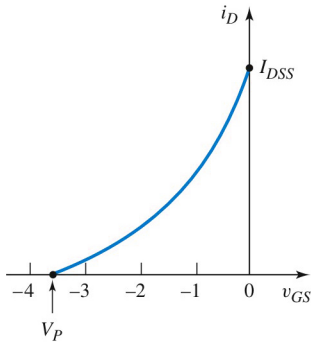


Corriente de drenado para un transistor JFET de canal n .

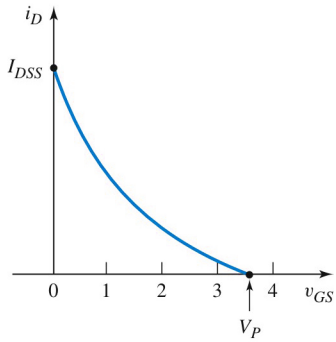


Corriente de drenado para un transistor JFET de canal p .

Característica Voltaje-Corriente JFET III



(a)



(b)

- Notemos que el voltaje de pinchoff es negativo para el JFET de canal n y positivo para el JFET de canal p .

- Para el dispositivo de canal n la región de saturación ocurre cuando

$$v_{DS}(\text{sat}) = v_{GS} - V_P. \quad (2)$$

- Para el dispositivo de canal p la región de saturación ocurre cuando

$$v_{SD}(\text{sat}) = V_P - v_{GS}. \quad (3)$$

- Al igual que en el caso del MOSFET, el efecto Early también se puede presentar en JFETs y MESFETs.
- Modificamos la expresión en forma acorde:

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_P} \right)^2 (1 + \lambda v_{DS}). \quad (4)$$

- La resistencia de salida del JFET está dada por

$$r_O = \left(\frac{\partial i_D}{\partial v_{DS}} \right)^{-1} \bigg|_{v_{GS} \text{ constante}} \quad (5)$$

- Luego

$$r_O = \left[\lambda I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GSQ}}{V_P} \right)^2 \right]^{-1}. \quad (6)$$

- ▶ MESFETs de GaAs pueden ser fabricados con características muy similares a las de un MOSFET de tipo mejorado.
- ▶ Por lo tanto, si el transistor está en el modo activo tendremos

$$i_D = K_n(v_{GS} - V_t)^2. \quad (7)$$

- ▶ De la misma forma, si el transistor está en el modo saturado (tríodo) tenemos

$$i_D = K_n[2(v_{GS} - V_t)v_{DS} - v_{DS}^2]. \quad (8)$$

- ▶ En ambas expresiones V_t es el voltaje de pinch-off.

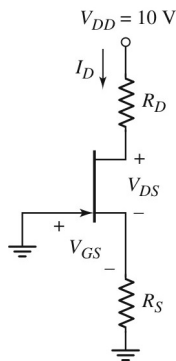
Ejemplo 1

Diseñe la polarización de un circuito JFET de canal n de modo que $I_D = 2 \text{ mA}$, y $V_{DS} = 6 \text{ V}$. Considere que los parámetros son

$$I_{DSS} = 5 \text{ mA.}$$

$$V_P = -4 \text{ V.}$$

$$\lambda = 0.$$



- Asumiremos que el transistor está saturado. Luego,

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2.$$

- Como $I_D = 2 \text{ mA}$, $V_p = -4 \text{ V}$, $I_{DSS} = 5 \text{ mA}$, tenemos

$$2 = 5 \left(1 + \frac{V_{GS}}{4} \right)^2.$$

- Esta ecuación tiene dos soluciones posibles:

$$V_{GS} = \begin{cases} -1,47 \text{ V} \\ -6,53 \text{ V} \end{cases}$$

La segunda raíz no es válida porque implicaría que el dispositivo está en corte. Esto es porque V_{GS} sería menor que el voltaje de pinchoff, que en este caso es -4 V . Por lo tanto, debemos elegir la otra raíz.

- Podemos calcular R_S planteando LVK en el loop del terminal de fuente del transistor.

$$I_D R_S = V_S = -V_{GS}$$

Por lo tanto

$$R_S = \frac{-V_{GS}}{I_D} = \frac{1,47}{0,002} = 735 \, \Omega$$

- Para determinar R_D planteamos LVK en el loop de carga:

$$V_{DD} = I_D R_S + V_{DS} + I_D R_D$$

Por lo tanto

$$R_D = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{I_D} - R_S = \frac{10 - 6}{0,002} - 735 \, \Omega = 1,265 \, \text{k}\Omega$$

- Notamos que $V_{DS} = 6 > V_{GS} - V_p = 2,53 \text{ V}$. Por lo tanto, el dispositivo efectivamente está en el modo de saturación, como habíamos supuesto originalmente.

Análisis DC Ejemplo 2

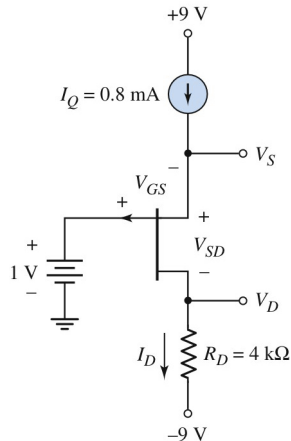
Ejemplo 2

Determine las corrientes y voltajes del punto de operación para el circuito JFET de canal p .

$$I_{DSS} = 2,5 \text{ mA.}$$

$$V_P = +2,5 \text{ V.}$$

$$\lambda = 0.$$



Análisis DC: Solución I

- Primero, notamos que

$$I_D = I_Q = 0,8 = \frac{V_D - V_{DD}}{R_D}.$$

Luego

$$\begin{aligned} V_D &= I_Q R_D + V_{DD} \\ &= 0,8 \times 4 - 9 \\ &= 5,8 \text{ V.} \end{aligned}$$

- Asumamos ahora que el transistor está operando en el modo saturado.

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right)^2.$$

Las soluciones de esta ecuación son

$$V_{GS} = \begin{cases} 1,086 \text{ V} \\ 3,914 \text{ V.} \end{cases}$$

- ▶ Al igual que en el ejemplo anterior, la raíz $V_{GS} = 3,914$ V implica que el dispositivo está en corte para un JFET de canal p , porque nos entregaría $V_{GS} > V_p$. Por lo tanto, $V_{GS} = 1,086$ V.
- ▶ Ahora podemos calcular V_G :

$$V_{GS} = V_G - V_S \Rightarrow V_S = -0,086 \text{ V.}$$

- ▶ De igual manera,

$$V_{SD} = V_S - V_D = -0,086 - (-5,8) = 5,71 \text{ V.}$$

- ▶ Comprobamos finalmente que $V_{SD} \geq V_p - V_{GS} = 2,5 - 1,086 = 1,41$ V, lo cual reafirma que nuestra suposición inicial fue la correcta.

Ejemplo 3

Diseñe el circuito con el MESFET de tipo mejorado, de forma que $V_{GS} = 0,5 \text{ V}$ y $V_{DS} = 2,5 \text{ V}$.

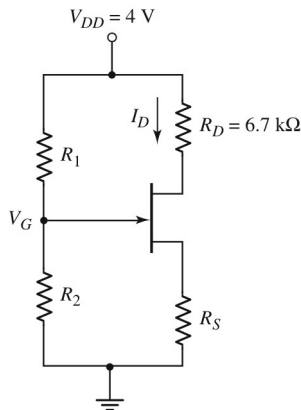
$$V_t = 0,24 \text{ mA}.$$

$$K_n = 1,1 \text{ mA/V}^2$$

$$V_P = +2,5 \text{ V}.$$

$$\lambda = 0.$$

Asuma además que $R_1 + R_2 = 50 \text{ k}\Omega$.



- ▶ Primero, determinaremos el estado de funcionamiento del MESFET.
- ▶ $V_{DS} = 2,5 \text{ V}$, $V_{DS}(\text{sat}) = V_{GS} - V_t = 0,5 - 0,24 = 0,26 \text{ V}$. Por lo tanto, el transistor está saturado.
- ▶ Utilizamos la expresión para la corriente que habíamos visto anteriormente:

$$I_D = K_n(V_{GS} - V_t)^2 = 1,1 \times 10^{-3}(0,26)^2 = 74,36 \mu\text{A}.$$

- ▶ El voltaje en el terminal de drenado satisface

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D = 4 - 0,074 \times 6,7 = 3,5 \text{ V}. \quad (9)$$

- De la misma manera, podemos determinar V_S :

$$V_S = V_D - V_{DS} = 3,5 - 2,5 = 1 \text{ V.} \quad (10)$$

- La resistencia en la fuente es

$$R_S = \frac{V_S - V_{SS}}{I_D} = \frac{1}{74,4 \times 10^6} = 13,44 \text{ k}\Omega.$$

- El voltaje en la compuerta es

$$V_G = V_{GS} + V_S = 0,5 + 1 = 1,5 \text{ V} \quad (11)$$

- Pero la corriente en la compuerta es 0. Luego, se forma un divisor de tensión en la compuerta del transistor:

$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD}.$$

- Aplicando que $R_1 + R_2 = 50 \text{ k}\Omega$, tenemos que

$$R_2 = (R_1 + R_2) \frac{V_G}{V_{DD}} = 50 \times \frac{1,5}{4} \text{ k}\Omega$$

$$= 18,75 \text{ k}\Omega.$$

$$R_1 = 50 - 18,75 \text{ k}\Omega$$

$$= 31,25 \text{ k}\Omega.$$