

# Índice

---

<b><i>TEMA 15: Transistor JFET</i></b>	<b>15.1</b>
15.1. INTRODUCCIÓN	15.1
15.2. ESTRUCTURA DE UN JFET	15.2
15.3. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO	15.4
15.4. TENSIÓN UMBRAL O TENSIÓN DE CORTE, $V_T$	15.13
15.5. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN JFET	15.14
15.6. MESFET	15.17



# *Tema 15*

## *Transistor JFET*

---

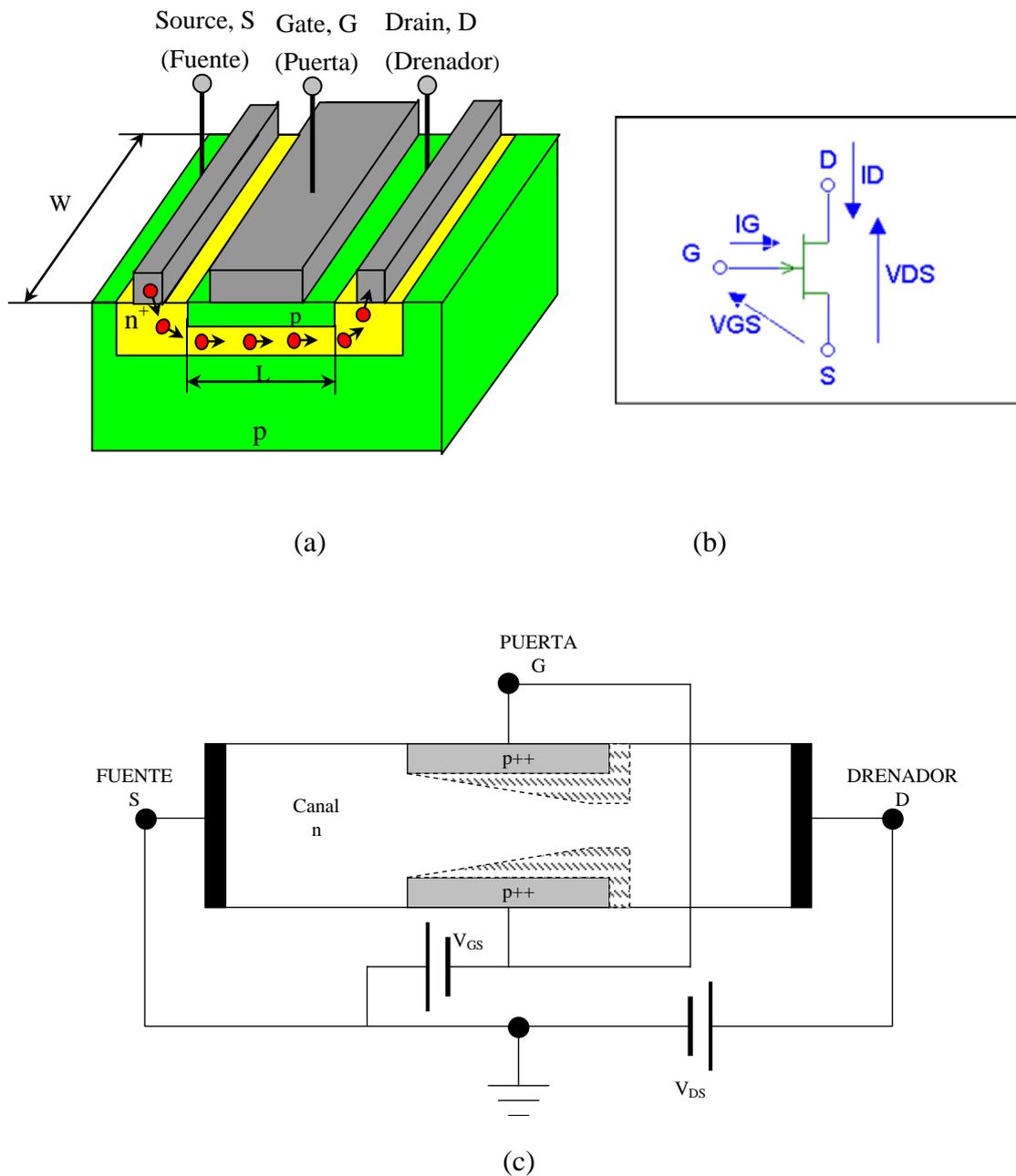
### *15.1.- Introducción*

*El transistor JFET (Junction Field Effect Transistor) constituye un tipo de FET de puerta de unión, esto es, entre la puerta y el canal conductor tenemos una unión pn.*

*Para su estudio se seguirán los mismos pasos que en el caso del MOSFET: estudio de su constitución o estructura, principios de funcionamiento y curvas características. Adelantando resultados veremos que un JFET es un dispositivo equivalente a un MOSFET de deplexión, con algunas particularidades que se comentarán posteriormente.*

## 15.2.- ESTRUCTURA DE UN JFET

Se va a realizar el estudio de un JFET de canal n. En la Figura 15.1 puede observarse su estructura típica, representación unidimensional (más didáctica) y símbolo de circuito.



**Figura 15.1.-** Transistor de unión de efecto de campo JFET: (a) Estructura típica; (b) Representación circuital; (c) Representación simplificada.

Según puede observarse en la Figura 15.1a, se parte de una barra de material semiconductor tipo n en la que se construyen dos contactos óhmicos en sus extremos. A lo largo de esta barra se hace circular una corriente aplicando una tensión de alimentación,  $V_{DS}$ , entre sus extremos. Esta corriente está constituida por portadores mayoritarios del material, en este caso electrones. Alrededor de la barra tipo n se forman dos regiones fuertemente impurificadas con impurezas aceptadoras, ya sea por aleación, difusión o cualquier otro procedimiento empleado para la creación de uniones pn. Estas regiones impurificadas se denominan “puertas” o “compuertas”,  $G$ .

La notación normalizada es:

- Fuente o surtidor: Es el terminal,  $S$ , a través del cual los portadores mayoritarios entran en la barra.
- Drenaje o drenador: Es el terminal,  $D$ , a través del cual los portadores mayoritarios salen de la barra.
- Canal: Porción de material semiconductor, en nuestro caso tipo n, a través del cual los portadores mayoritarios se mueven desde la fuente al drenador siendo la tensión  $V_{GS}$ , aplicada entre los terminales de puerta y fuente, la que controla la anchura, la conductancia del canal. Esta tensión  $V_{GS}$  se aplica (debemos aplicarla) de forma que polarice inversamente la unión puerta-canal, de tal manera que  $I_G \cong 0$ .

Por lo tanto, en un JFET de **canal n**:

$$\begin{array}{ll} V_{DS} > 0 & V_{GS} < 0 \\ I_D > 0 \text{ (entrante)} & I_S < 0 \text{ (saliente)} \end{array}$$

Además, puesto que  $I_G \cong 0 \Rightarrow I_D = -I_S$ .

En la Figura 15.1b aparece el símbolo de circuito de un JFET de canal n. La flecha indica el sentido en el que fluiría la corriente de puerta,  $I_G$ , si la unión de puerta estuviera directamente polarizada

En un JFET de **canal p**, las tensiones y corrientes presentan sentidos contrarios. Es decir,

$$\begin{array}{ll} V_{DS} < 0 & V_{GS} > 0 \\ I_D < 0 \text{ (saliente)} & I_S > 0 \text{ (entrada)} \end{array}$$

En la Figura 15.2 se indica su símbolo de circuito.

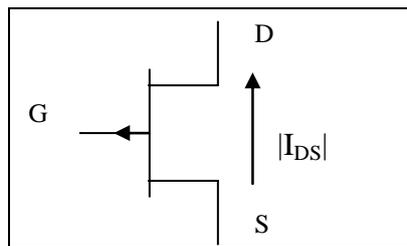


Figura 15.2.- Símbolo de circuito para un JFET de canal p.

Señalar, finalmente, que en un JFET las tensiones  $V_{DS}$  y  $V_{GS}$  se aplican respecto al mismo terminal que en este caso es la fuente  $S$ .

### 15.3.- PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

Se va a describir el funcionamiento de un JFET de canal n. Si el JFET es de canal p, el estudio es igualmente válido sin más que cambiar el sentido de las tensiones y corrientes. En todo este apartado, se hará referencia a las Figuras 15.3 – 15.8.

→  $V_{GS} > 0$

En este caso, las uniones de puerta-canal están polarizadas directamente, por lo

que circulará una gran cantidad de corriente a través de la puerta. Este funcionamiento no es el que se busca en el JFET, por lo que en los diseños siempre se tratará de evitar la polarización directa de las uniones de puerta.

$$\rightarrow \boxed{V_{GS} = 0}$$

- Si  $V_{DS} = 0$ , el dispositivo se encuentra en equilibrio termodinámico por lo que  $I_D = 0$ . En este caso, el canal entre las dos uniones de puerta está totalmente abierto (Figura 15.3).

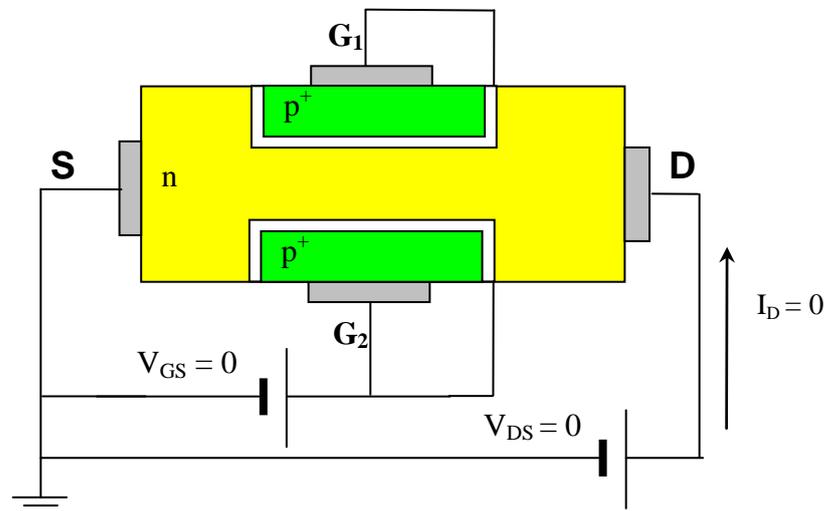


Figura 15.3.- JFET en equilibrio,  $V_{GS} = 0$ ,  $V_{DS} = 0$ .

- Si  $V_{DS}$  empieza a tomar valores positivos pequeños, empezará a circular una corriente  $I_D$  pequeña y proporcional. El canal tipo n actúa como una mera resistencia, la caída de tensión producida por  $I_D$  a lo largo del canal será también pequeña y prácticamente no influirá en la polarización de las uniones de puerta. Es decir, puesto que  $V_{GS} = 0$ , el único potencial que existe entre la puerta y el canal es el potencial termodinámico  $\phi_T$ . Por lo tanto, en estas condiciones, el canal estará abierto e  $I_D$  y  $V_{DS}$  seguirán la

Ley de Ohm  $I_D = \frac{V_{DS}}{R_{canal}}$ . Nos encontramos en la **REGIÓN ÓHMICA** o

**LINEAL** (Figura 15.4 y Figura 15.8).

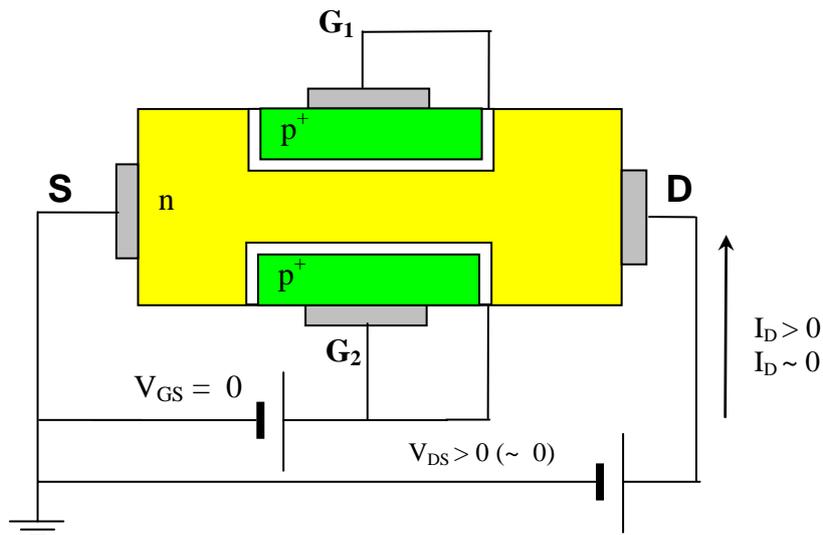


Figura 15.4.- JFET en la región lineal, pequeños valores de  $V_{DS}$ .

- Si  $V_{DS}$  sigue aumentando de manera que sus valores empiezan a ser notables,  $I_D$  también aumentará pero la caída óhmica de tensión a lo largo del canal empezará modular el canal. Efectivamente, en la zona de drenador aparece la unión se encuentra polarizada inversamente, con una z.c.e. creciente, y el canal se empezará a contraer en dicha zona (Figura 15.5). Como consecuencia de esta contracción, la resistencia del canal aumenta y las características  $I_D - V_{DS}$  suavizan su pendiente. Nos encontramos en la **REGIÓN GRADUAL** (Figura 15.5 y Figura 15.8).

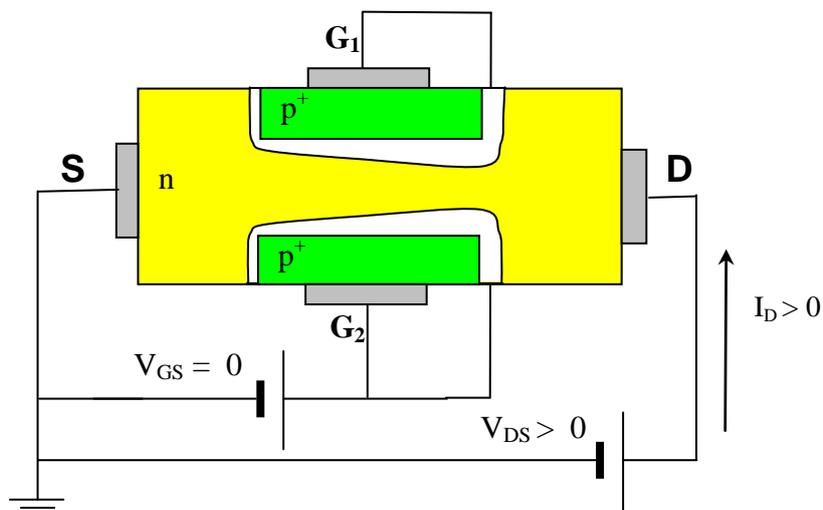
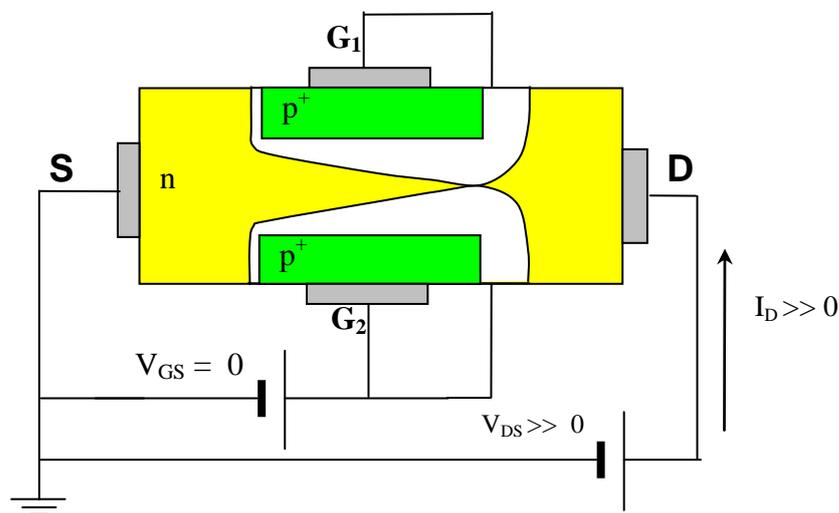


Figura 15.5.- JFET en la región gradual, estrechamiento del canal para valores moderados de  $V_{DS}$ .

- Si seguimos aumentando los valores de  $V_{DS}$ , llegará un momento en el que el canal se contraiga por completo (Figura 15.6), y por lo tanto, la conexión entre la fuente y el drenador desaparece por completo. Se dice que el canal se ha “estrangulado” o “pinchado”. La tensión  $V_{DS}$  a la que tiene lugar este fenómeno se denomina “tensión de drenador de saturación”,  $V_{DS,SAT}$ . En esta situación, la pendiente de las características  $I_D - V_{DS}$  se hace aproximadamente cero, Figura 15.8. Nos encontramos en el punto de cambio de la REGIÓN GRADUAL a la **REGIÓN DE SATURACIÓN**.



**Figura 15.6.-** JFET con el canal estrangulado o pinchado (pinch-off),  $V_{DS} = V_{DS,SAT}$ .

- Para  $V_{DS} > V_{DS,SAT}$ , la característica  $I_D - V_{DS}$  se satura, es decir,  $I_D$  permanece aproximadamente constante e igual al valor  $I_{D,SAT}$ , Figura 15.8. ¿Por qué esta afirmación?, ¿no es posible esperar que el estrangulamiento del canal elimine por completo cualquier flujo de corriente en el canal?, ¿cómo se explica el hecho de que tensiones  $V_{DS} > V_{DS,SAT}$  no tengan prácticamente efecto en la corriente de drenador,  $I_D$ ?

En respuesta a la primera pregunta, supongamos que al alcanzar el estrangulamiento  $I_D = 0$ . En tal caso, el potencial a lo largo del canal sería

el mismo que con  $V_{DS} = 0$ , es decir, sería cero en todos los puntos del canal. Por lo tanto, la diferencia de potencial entre el canal y las uniones de puerta es el potencial termodinámico con lo que el canal debería estar totalmente abierto. Este razonamiento contradice la suposición inicial de estrangulamiento del canal. En otras palabras, al igual que sucedía en el caso del MOSFET, para  $V_{DS} > V_{DS,SAT}$  debe fluir una corriente para inducir y mantener la condición de estrangulamiento. Esto es, para  $V_{DS} > V_{DS,SAT}$  siguen fluyendo electrones desde la fuente hacia el drenador y, al alcanzar el estrangulamiento del canal serán acelerados por el campo eléctrico de la zona de carga de espacio. Por lo tanto, para  $V_{DS} > V_{DS,SAT}$  el punto de estrangulamiento se aproxima a la fuente. Nos encontramos en la **REGIÓN DE SATURACIÓN** (Figura 15.7).

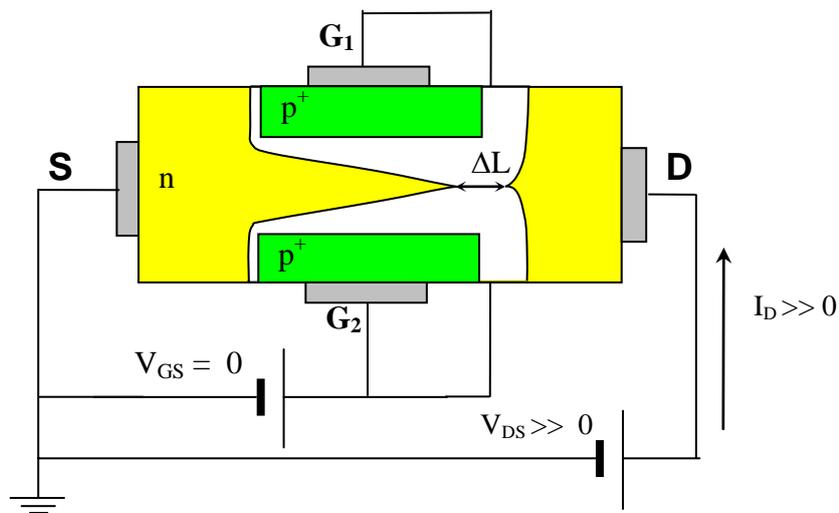


Figura 15.7.- JFET con postestrangulamiento o saturación,  $V_{DS} > V_{DS,SAT}$ .

En lo que respecta a que  $I_D \cong I_{D,SAT}$  para  $V_{DS} > V_{DS,SAT}$ , hay una explicación física muy sencilla. Para  $V_{DS} > V_{DS,SAT}$ , el estrangulamiento del canal avanza hacia la fuente una distancia  $\Delta L$ , Figura 15.7. El potencial por el lado del drenador es  $V_{DS}$ , mientras que, por el lado de la fuente es  $V_{DS,SAT}$ . Esto es,  $V_{DS} - V_{DS,SAT}$  cae a lo largo de la sección vacía (estrangulada) del canal:

- Si  $\Delta L \ll L$ , caso habitual, la región comprendida entre la fuente y el punto de estrangulamiento es esencialmente idéntica en forma y con la misma distribución de voltajes en los extremos (cero y  $V_{DS, SAT}$ ) que los que se tenían al principio del estrangulamiento, con lo que  $I_D$  será la misma, Figura 15.8.
- Si  $\Delta L$  es comparable a  $L$ , entonces, la misma caída de tensión  $V_{DS, SAT}$  aparecerá sobre una sección del canal más corta,  $L - \Delta L$ , con lo que  $I_D$  aumentará ligeramente, Figura 15.8. Este efecto es notable en dispositivos de canal corto.

En la Figura 15.8 se ha representado la característica  $I_D - V_D$  de un JFET de canal n indicando cada una de las regiones de funcionamiento.

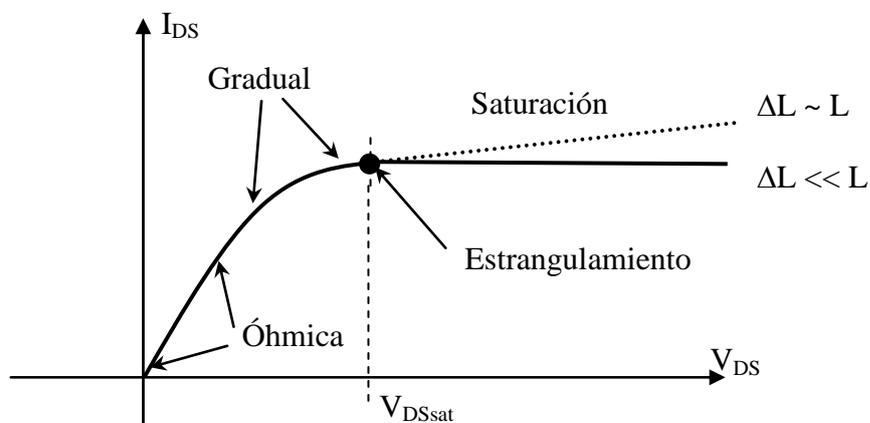


Figura 15.8.- Característica  $I_D - V_D$  de un JFET de canal n.

→  $V_{GS} < 0$

En este caso, desde el principio, las uniones de puerta están inversamente polarizadas ( $I_G = 0$ ).

- Para  $V_{DS} = 0$ , el canal está contraído uniformemente en todos sus puntos debido a la  $V_{GS}$  aplicada y, además,  $I_D = 0$ .
- Para  $V_{DS} > 0$ , se volverá a repetir toda la secuencia anterior pero, en este caso, la condición de estrangulamiento del canal se dará a tensiones  $V_{DS, SAT}$  inferiores.

Se denomina “**potencial de estrangulamiento**”, “**potencial de contracción**” o “**potencial de pinch-off**” a la tensión del punto de estrangulamiento (recordar que todas las tensiones se están aplicando respecto del terminal de fuente, que es el que está colocado al potencial de referencia, a tensión cero):

$$\boxed{\underbrace{V_P}_{\substack{\text{tension total del} \\ \text{punto de} \\ \text{estrangulamiento}}} = \phi_T - \underbrace{(V_{GS} - V_{DS, SAT})}_{\substack{\text{tension inversa total} \\ \text{aplicada a la union de puerta}}} \quad (15.1)}$$

La tensión de contracción,  $V_p$ , es una característica del dispositivo que se determina a partir de la geometría del mismo. Por lo tanto, a mayor  $V_{GS}$  aplicada, menor  $V_{DS, SAT}$  para que se produzca el estrangulamiento del canal.

- Si  $V_{GS} = 0$ , caso inicial considerado,  $\Rightarrow V_p = V_{PO} = \phi_T + V_{DS, SAT}$ . Puesto que  $\phi_T \ll V_{DS, SAT} \Rightarrow V_p = V_{PO} \cong V_{DS, SAT}$ .
- Por otro lado, se define,  $I_{DSS}$  como la corriente de drenador de saturación para una tensión de puerta igual a cero. Es, por lo tanto, la máxima corriente de drenador que puede circular por un JFET cuando éste opera con las uniones de puerta inversamente polarizadas (su valor suele aparecer en las hojas de especificación de los fabricantes).

$$I_{DSS} = I_D \Big|_{\substack{V_{DS} = V_{DS, SAT} \\ V_{GS} = 0}}$$

- Si  $V_{DS, SAT}$  es mayor que la tensión de ruptura de la unión, entonces ocurrirá primero la ruptura de la unión. Este fenómeno comenzará en las proximidades del drenador donde la polarización inversa de las uniones de puerta es mayor.
- En la Figura 15.9 pueden observarse diferentes curvas características, en la región lineal, para diferentes valores de tensión  $V_{GS}$  aplicada. Puede apreciarse el aumento de la resistencia del canal (debido a su contracción uniforme por la  $V_{GS}$  aplicada), a medida que se aumenta  $V_{GS}$ . Esto hace que, en circuitos integrados, el JFET pueda ser utilizado como una resistencia cuando está operando en la región lineal.

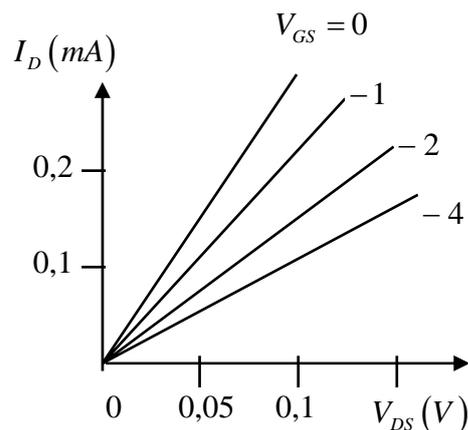


Figura 15.9.- Características típicas para valores pequeños de  $V_{DS}$ .

- En toda la argumentación anterior, se ha descrito un comportamiento unidimensional.

#### 15.4.- TENSIÓN UMBRAL O TENSIÓN DE CORTE, $V_T$

Se denomina “tensión umbral”, “tensión de corte” o “tensión de puesta en conducción”, a la tensión inversa de puerta que elimina todas las cargas libres del canal con independencia de la tensión  $V_{DS}$  aplicada. Es, por lo tanto, una característica del dispositivo que depende de la geometría del mismo.

Para su cálculo, tendremos en cuenta que las uniones de puerta son muy asimétricas ( $N_A \gg N_D$ ) con lo que la anchura de la zona de carga de espacio de estas uniones se extiende prácticamente por el lado del canal. Consideraremos, además, el caso más general en el que los dos terminales de puerta están colocados a la misma tensión de referencia. Atendiendo a la Figura 15.10 definimos,

- $d \equiv$  distancia entre las uniones metalúrgicas (anchura metalúrgica).
- $l \equiv$  anchura de la zona de carga de espacio por el lado del canal que coincide prácticamente con la anchura total de la zona de carga de espacio.
- $w \equiv$  anchura efectiva del canal que será función de la tensión de puerta aplicada.

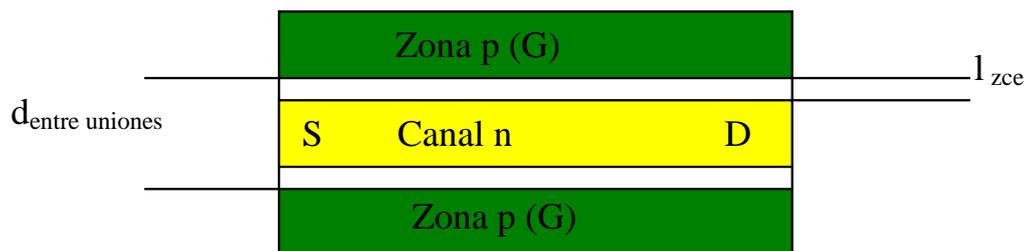


Figura 15.10.- Anchura del canal de un JFET.

Puesto que sólo estamos aplicando  $V_{GS}$ , la contracción del canal será uniforme en todos sus puntos. De la Figura 15.10 podemos escribir que,

$$w = d - 2l$$

$$w = d - 2 \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (\phi_T - V_{GS})}$$

$$w = 0 \quad \Rightarrow \quad V_{GS} = V_T \quad \Rightarrow \quad d^2 \underset{N_A \gg N_D}{=} \frac{8\epsilon}{q} \frac{1}{N_D} (\phi_T - V_T)$$

$$\boxed{V_T = \phi_T - \frac{q N_D d^2}{8\epsilon}} \quad (15.2)$$

La ecuación (15.2) define la tensión umbral cuando los dos terminales de puerta están conectados entre sí. Lo que está claro es que constituye una característica del dispositivo que depende de la geometría del mismo, siendo el segundo término el dominante.

Para  $|V_{GS}| > |V_T|$ , el canal óhmico desaparece por completo. No existe conexión física entre la fuente y el drenador y, por lo tanto, el JFET no puede conducir  $\Rightarrow I_D = 0$ .

### Relación entre $V_p$ y $V_T$

Analizando las ecuaciones (15.1) y (15.2) puede observarse que ambas magnitudes son características del dispositivo y dan cuenta de la tensión a la que se produce la contracción del canal: En el caso de  $V_p$ , esta contracción tiene lugar en las proximidades del drenador, mientras que, en el caso de  $V_T$  la contracción es uniforme. Ahora bien, indudablemente debe existir una relación entre ambas. Tenemos entonces que,

- Contracción uniforme, cuando sólo hay  $V_{GS}$  aplicada:

$$w = d - 2l(\phi_T - V_T) = 0$$

- Contracción próxima al drenador, cuando hay  $V_{GS}$  y  $V_{DS}$  aplicadas:

$$w = d - 2l(V_p) = 0$$

De las condiciones anteriores, se desprende que

$$\boxed{V_p = \phi_T - V_T} \quad (15.3)$$

Por lo tanto,  $V_p$  y  $V_T$  sólo se diferencian en el signo y, en lo que se refiere a su

valor en  $\phi_T$ . Si comparamos las ecuaciones (15.2) y (15.3) resulta que, para el caso general que estamos considerando,

$$V_P = \frac{q N_D d^2}{8\epsilon}$$

Por otra parte,

$$V_P = \phi_T - (V_{GS} - V_{DS, SAT}) \quad (15.4)$$

Por lo que comparando las ecuaciones (15.3) y (15.4),

$$\boxed{V_T = V_{GS} - V_{DS, SAT}} \quad (15.5)$$

ecuación que también había sido obtenida en el caso del MOSFET.

### 15.5.- CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN JFET

En las Figuras 15.11 y 15.12 se han representado las características de salida y características de transferencia de un JFET de canal n.

En las características de salida pueden observarse las diferentes regiones de funcionamiento comentadas anteriormente:

- Región gradual, que incluye la región puramente óhmica o lineal.
- Región de saturación.
- Región de ruptura.
- Región de corte,  $|V_{GS}| > |V_T|$ .

En estas curvas, se ha incluido la característica correspondiente a una

$V_{GS} = 0,2 V$  (polarización directa de la unión de puerta). En tal caso, la corriente de puerta  $I_G$  sería muy pequeña puesto que  $V_{GS} \ll V_\gamma (\cong 0,5 V$  para el Si).

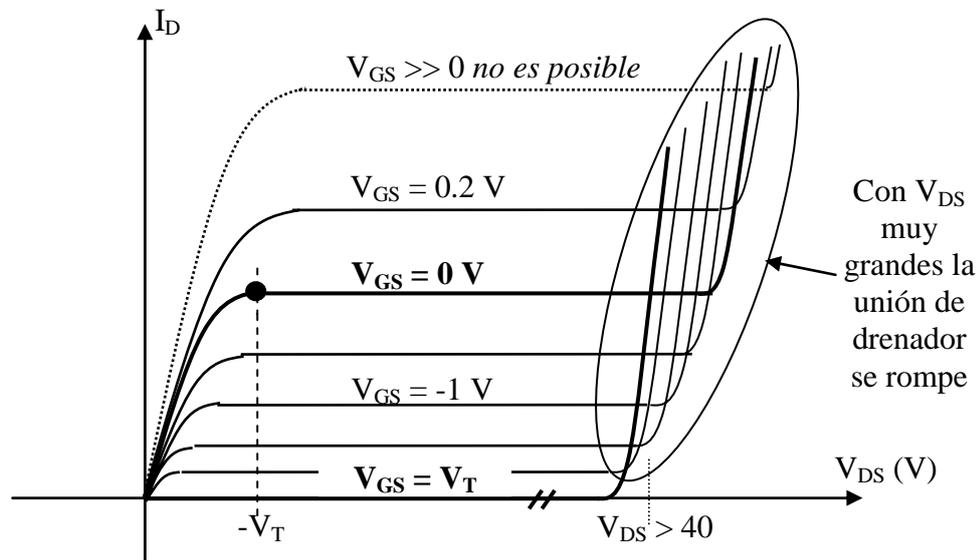


Figura 15.11.- Características de salida de un JFET de canal n.

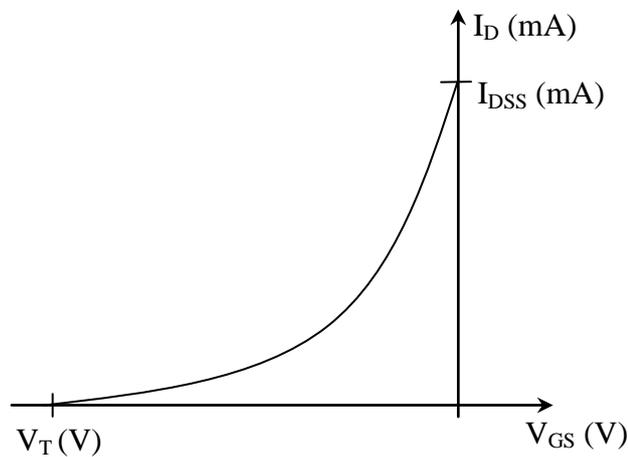
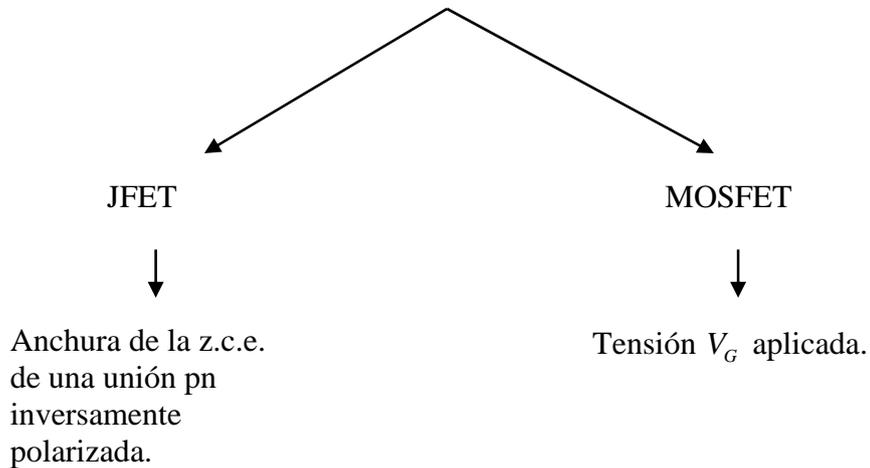


Figura 15.12.- Característica de transferencia de un JFET de canal n en saturación.

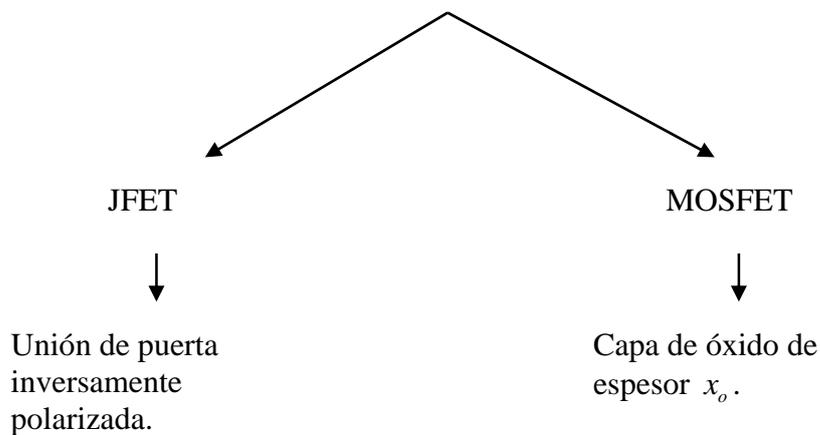
Como puede observarse, las curvas obtenidas para el JFET son equivalentes a las del MOSFET de deplexión o empobrecimiento, con la salvedad de que en los JFET no se puede aumentar la anchura del canal con respecto a la situación de equilibrio.

Por lo tanto, se puede concluir que, en general, los dos dispositivos JFET y MOSFET son similares en todo salvo:

- El mecanismo responsable de modular la conductividad del canal



- El tipo de aislamiento entre puerta y canal



## 15.6.- MESFET

Los diodos metal-semiconductor (o diodos Schottky) y los diodos de unión pn están estrechamente relacionados en muchos aspectos. En particular, en los diodos metal-semiconductor también se forma una región de vaciamiento que puede ser modulada mediante el voltaje aplicado. Así, resulta lógico que se puedan construir transistores de efecto de campo con puertas rectificadores metal-semiconductor, MESFET (Metal-Semiconductor Field Effect Transistor). Los MESFET se utilizan, sobre todo, en circuitos desarrollados sobre la base de *GaAs* debido, fundamentalmente, a la falta de una tecnología de contaminación metal-aislante-semiconductor. Por lo tanto, los razonamientos y conclusiones vistos para el JFET pueden aplicarse igualmente a los MESFET. En las Figuras 15.13 y 15.14 pueden observarse la estructura idealizada y una vista simplificada del MESFET.

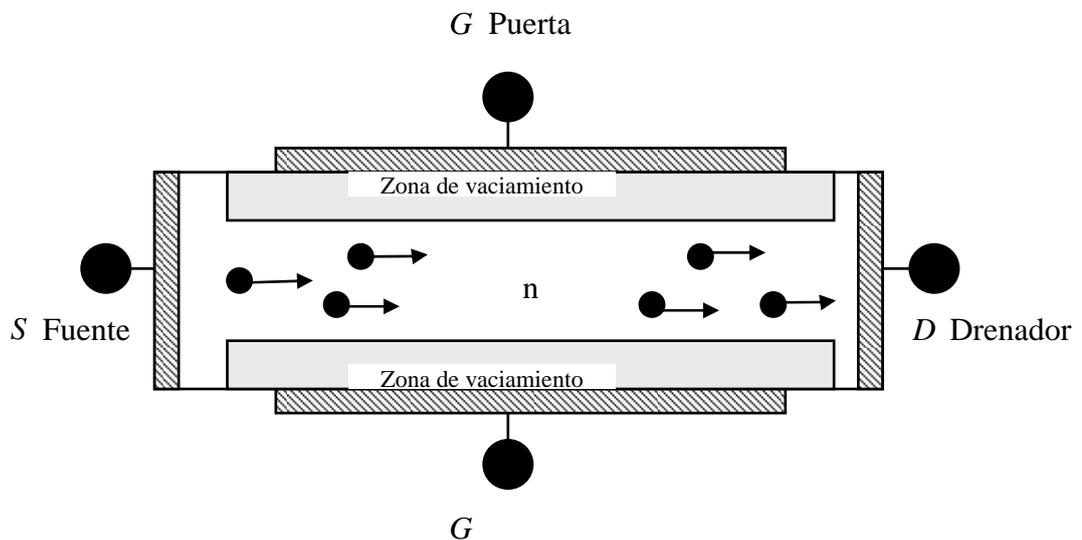


Figura 15.13.- Estructura idealizada de un MESFET.

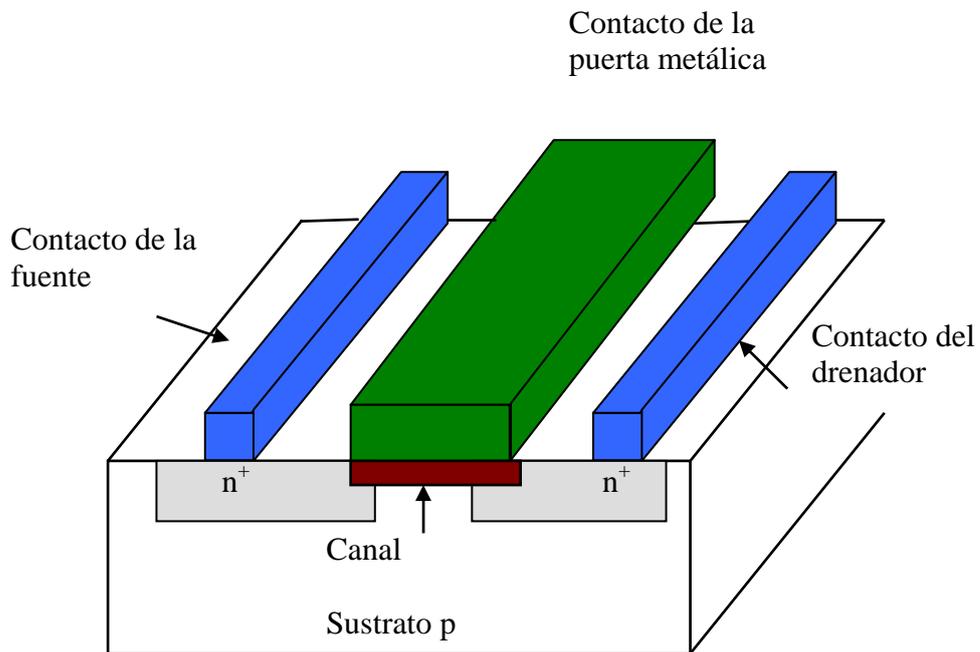


Figura 15.14.- Vista simplificada de un MESFET.