

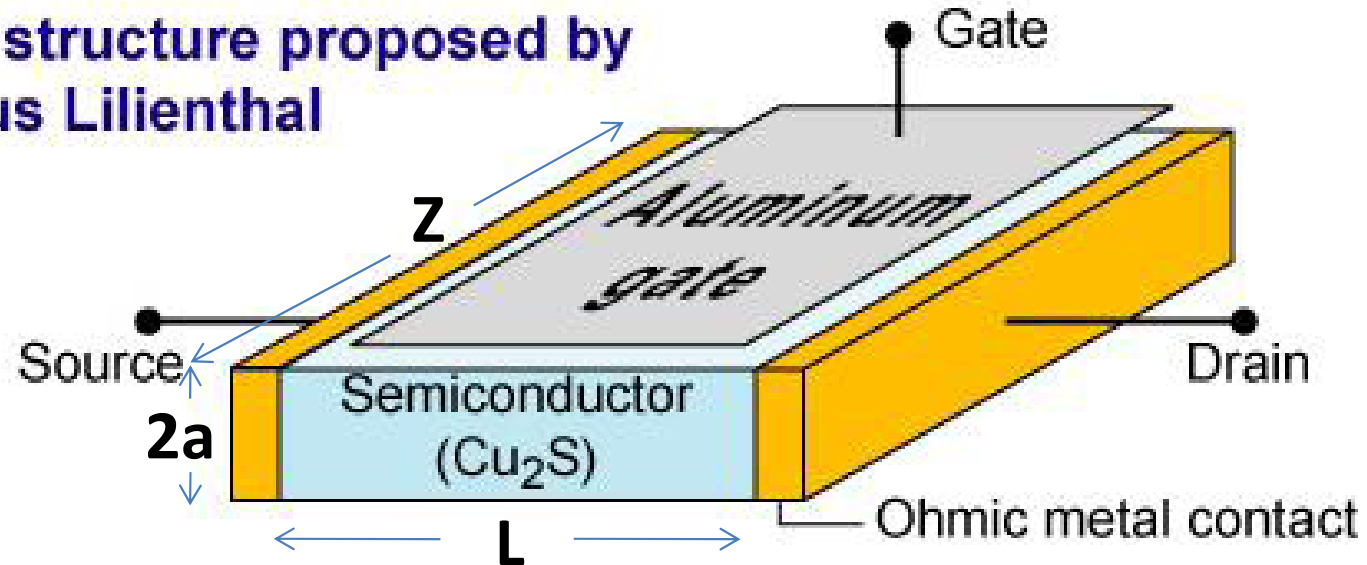
Tema 8: Transistores de efecto campo de unión (JFET, MESFET). Modelos de circuitos.

Lectura recomendada:

“Electrónica Integrada” Cap.10. Millman-Halkias. Ed. Hispano Europea

PRIMEROS FET's

FET structure proposed by Julius Lilienthal



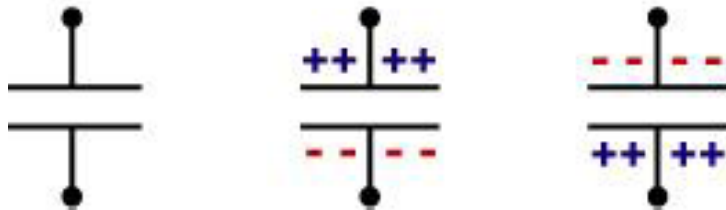
En 1925 Lilienfeld propuso una estructura que podría considerarse un FET. Más tarde tanto Lilienfeld (1930) como Heil (1935) registraron sendas patentes.

Ninguno de los dos fue capaz de construir dicho dispositivo.

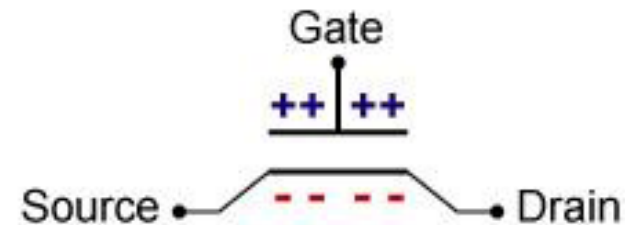
Conductancia nominal del canal: $G_0 = \frac{A}{L} \sigma = \frac{2aZ}{L} q\mu_n N_D$ (canal n)

EFEECTO CAMPO

Field effect in planar capacitor



Field effect transistor



¿Cómo podría construirse un FET a partir de un condensador de caras plano-paralelas?

¿Funcionaría bien?

¿Qué ocurre si cambiamos el aislante entre las placas por un semiconductor?

DISPOSITIVO UNIPOLAR: conducción por MAYORITARIOS

JFET de canal n

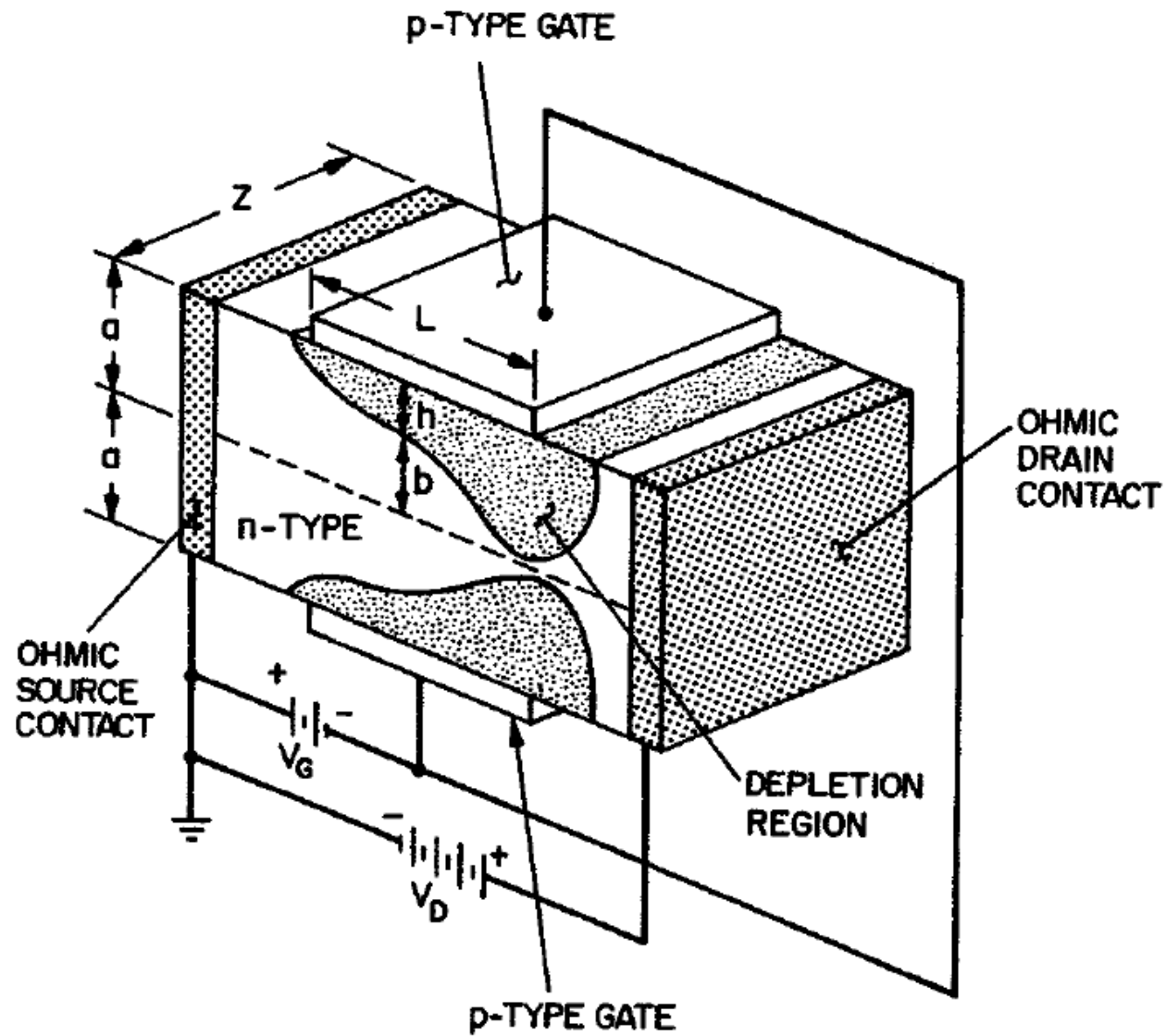
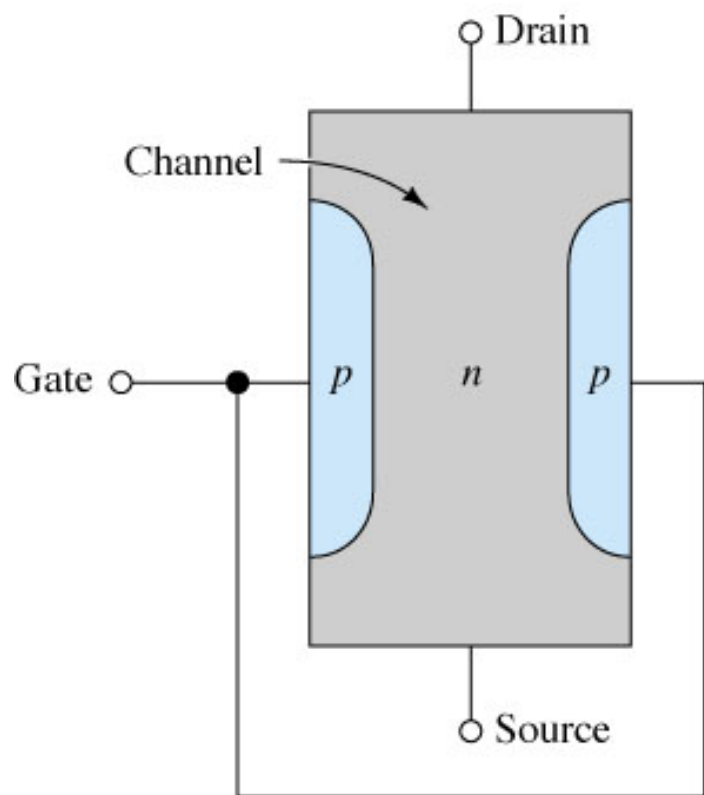


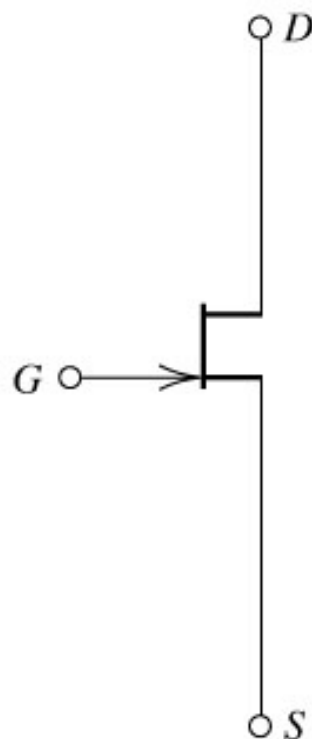
Fig. 2 Shockley's model of the junction field-effect transistor. (After Dacey and Ross, Ref. 2.)

JFET de canal n

Símbolo esquemático y símil hidráulico:



(a) Simplified physical structure



(b) Circuit symbol

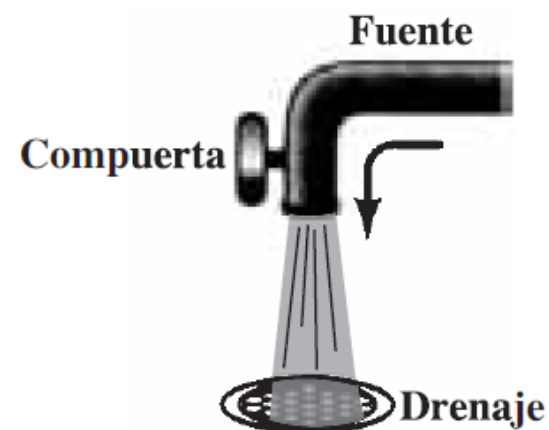
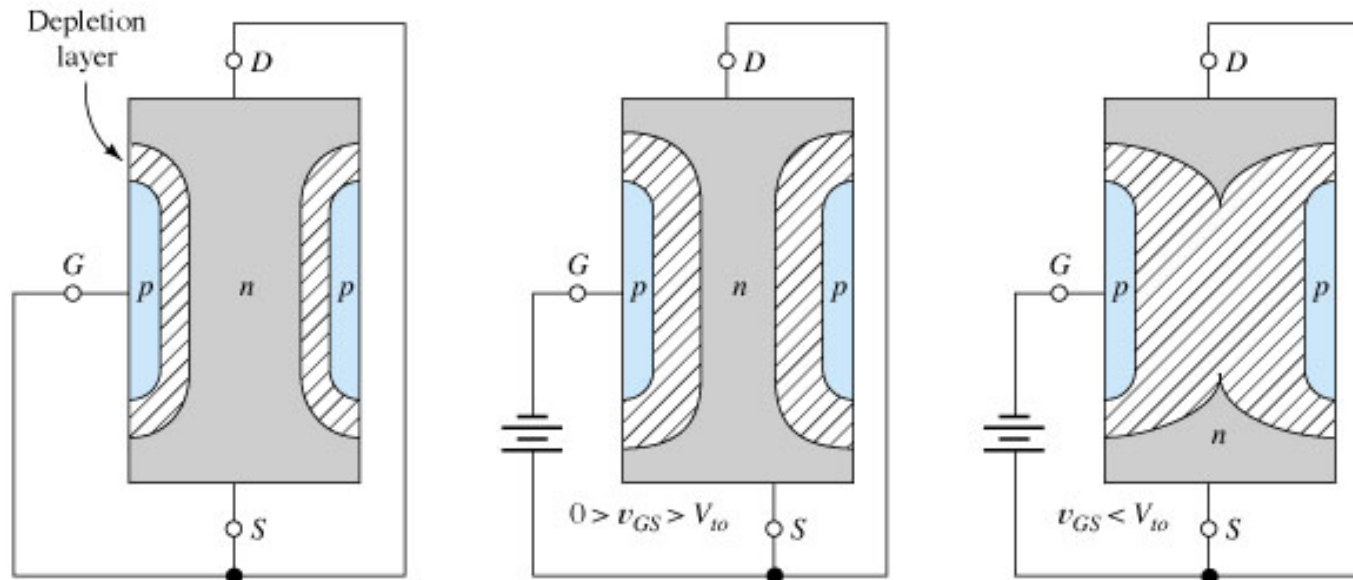


FIG. 6.4

Analogía del agua para el mecanismo de control de un JFET.

JFET de canal n

Efecto de la tensión de puerta, v_{GS} (con $v_{DS} \approx 0$):



$$N_A \gg N_D \Rightarrow W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} (V_{bi} - V_{GS})}$$

JFET de canal n

Efecto de la tensión de puerta, v_{GS} (con $v_{DS} \approx 0$):

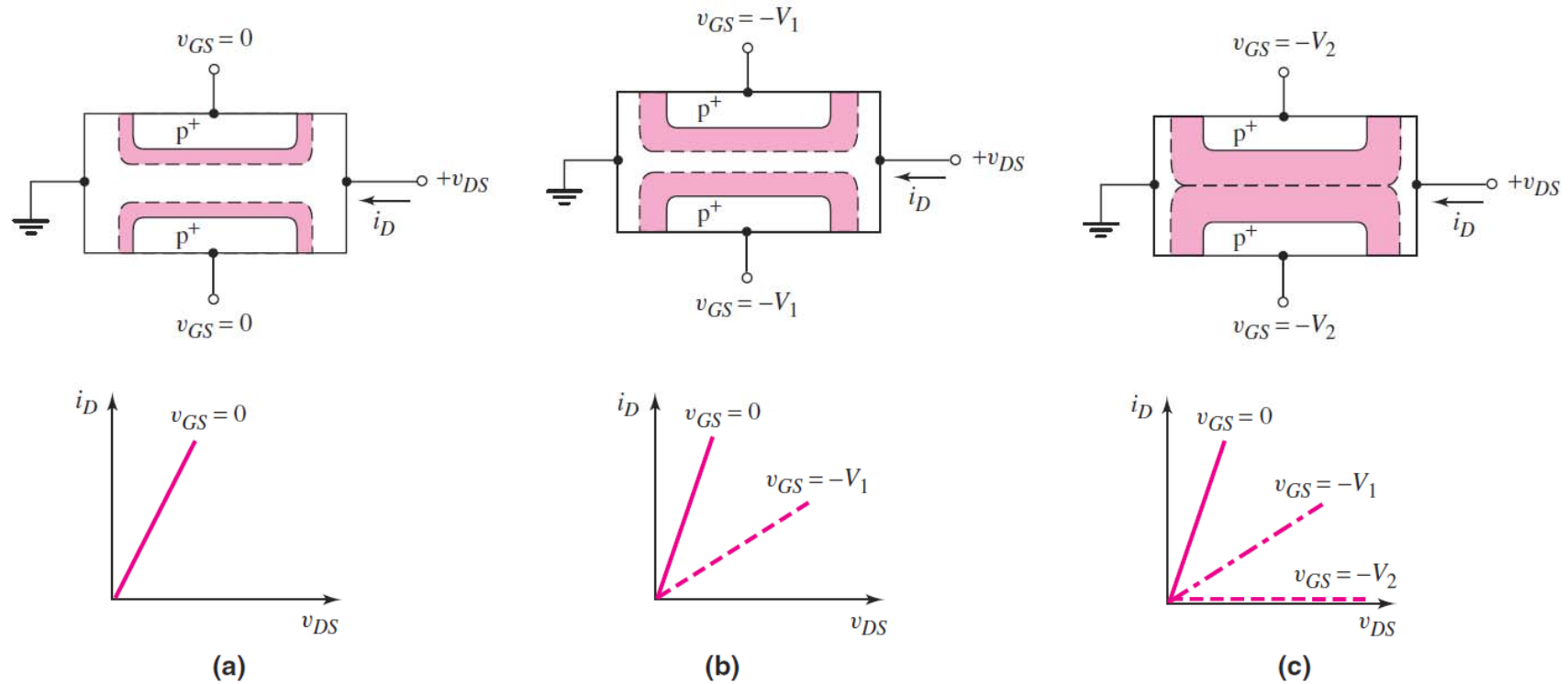


Figure 3.55 Gate-to-channel space-charge regions and current–voltage characteristics for small drain-to-source voltages and for: (a) zero gate voltage, (b) small reverse-biased gate voltage, and (c) a gate voltage that achieves pinchoff

JFET de canal n

Efecto de la tensión de puerta, v_{GS} (con $v_{DS} \approx 0$):

Anchura de la región vaciada:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} (V_{bi} - V_{GS})}$$

Semianchura del canal: $a - W$

tal que cuando: $W = a \Rightarrow$

Tensión de “*pinch-off*”
(estrangulamiento):

Externa: $V_{GS} = V_P$

Interna: $V_{bi} - V_P = \frac{qa^2N_D}{2\epsilon_s} = V_{P0}$

Por tanto: $V_P = V_{bi} - V_{P0}$

$(V_P < 0)$

JFET de canal n

Circuito de polarización, gobernando v_{GS} y v_{DS} :

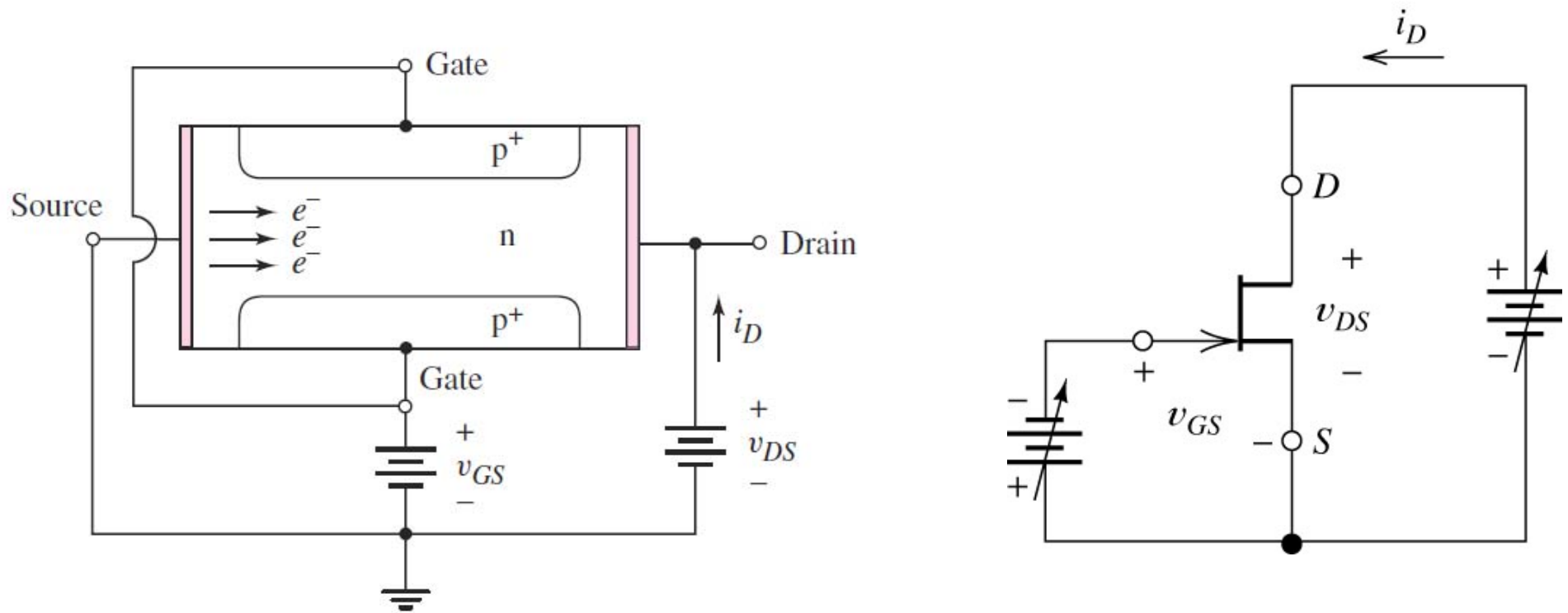
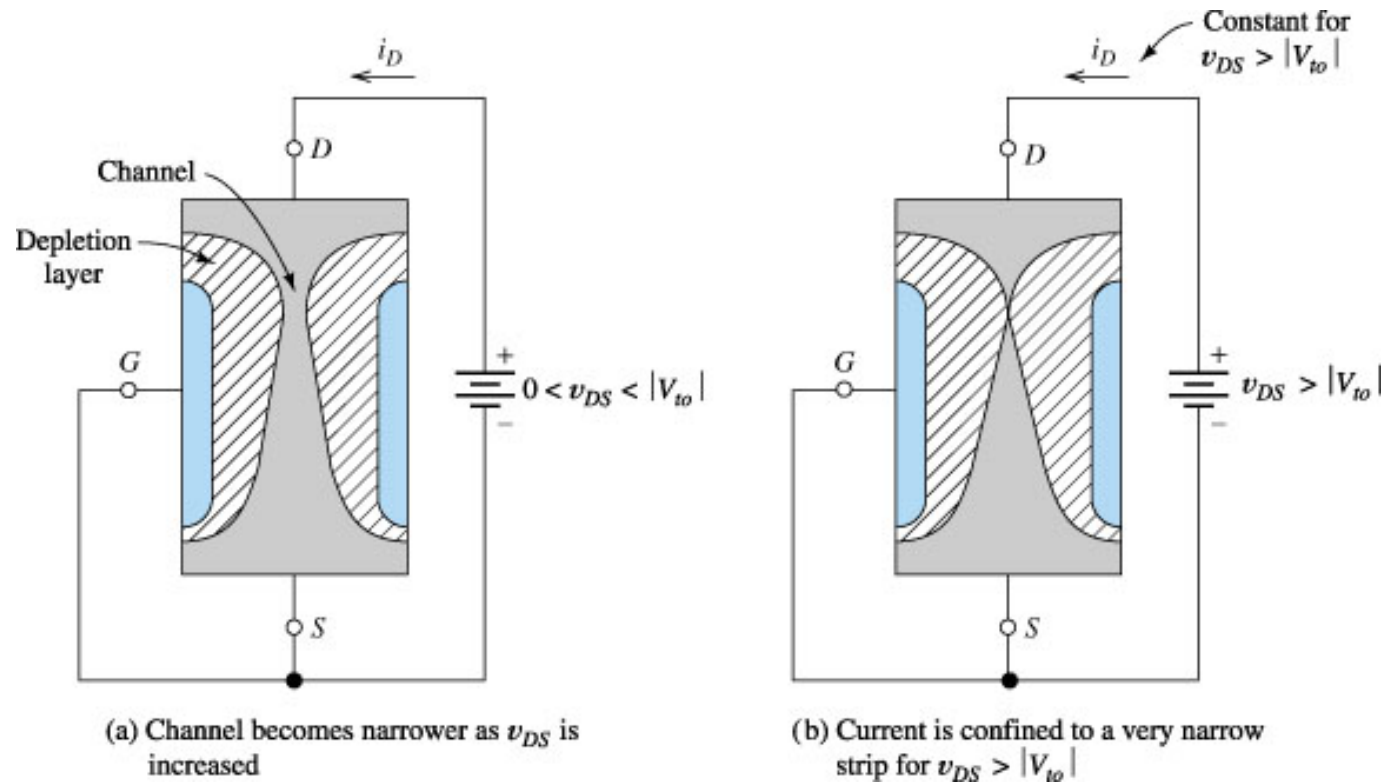


Figure 3.54 Cross section of a symmetrical n-channel pn junction field-effect transistor

JFET de canal n

Efecto de la tensión de drenador, v_{DS} (con $v_{GS} \approx 0$):



JFET de canal n

Efecto de la tensión de drenador, v_{DS} (con $v_{GS} \approx 0$):

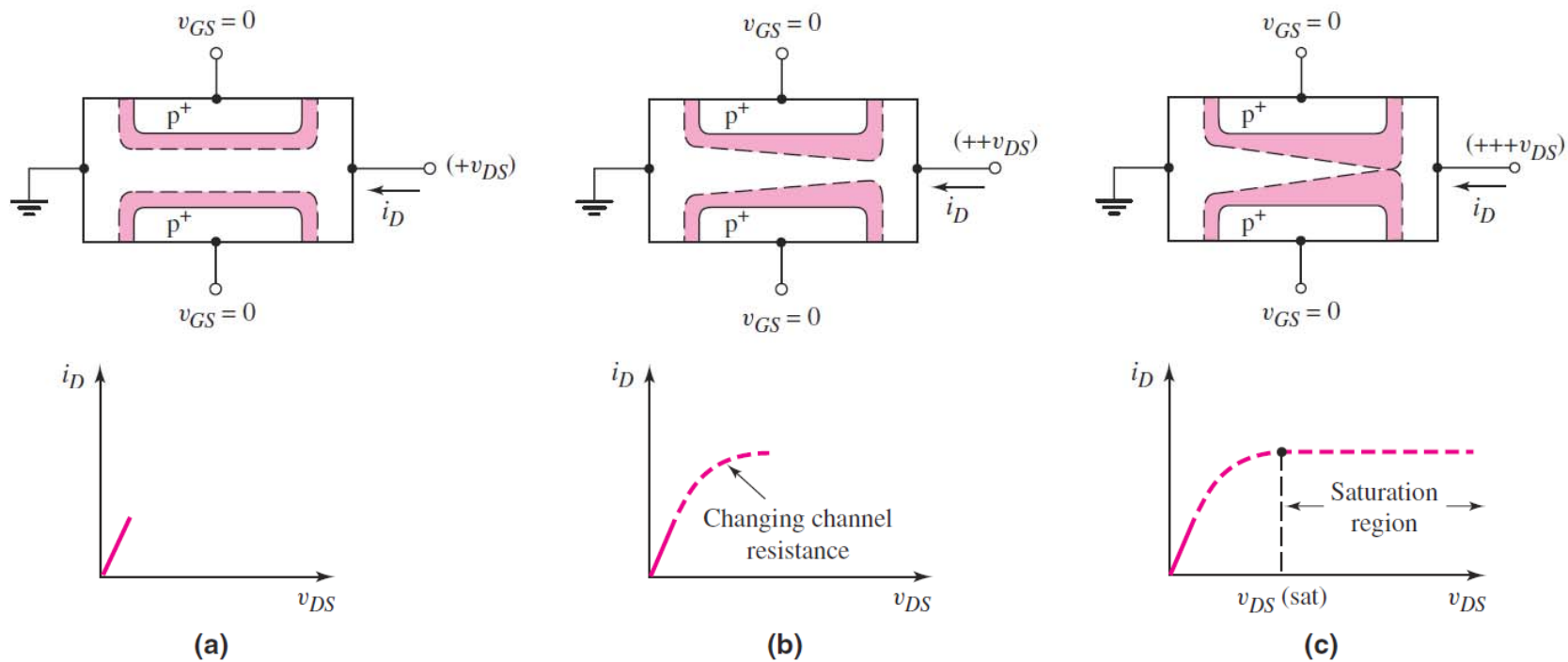


Figure 3.56 Gate-to-channel space-charge regions and current–voltage characteristics for zero gate voltage and for: (a) a small drain voltage, (b) a larger drain voltage, and (c) a drain voltage that achieves pinchoff at the drain terminal

Saturación:

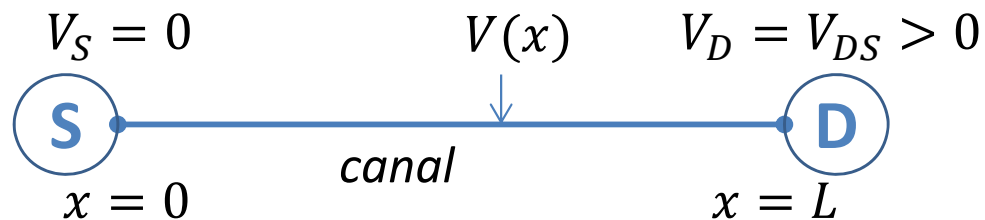
$$V_{Dsat} - V_{GS} = V_{P0} - V_{bi}$$

JFET de canal n

Efecto de la tensión de drenador, v_{DS} (con $v_{GS} \approx 0$):

- Para v_{DS} pequeñas \Rightarrow comportamiento óhmico del canal: $I_D \sim G_0 V_{DS}$

- Al aumentar $v_{DS} \Rightarrow$ variación del potencial a lo largo del canal:



$$W(x) = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} [V_{bi} + V(x)]}$$

- Al alcanzar v_{DS} un valor $v_{DS} = v_{DSat}$ tal que (en $x = L$) se hace: $W(L) = a \Rightarrow$ estrangulamiento (“*pinch-off*”):

$$V_{DS} = V_{DSat} \Rightarrow I_D = I_{DSat}$$

Saturación: $V_{DSat} = V_{GS} - V_P$

$$V_{DSat} = V_{P0} - (V_{bi} - V_{GS})$$

JFET de canal n

Efecto de la tensión de drenador, v_{DS} (con $v_{GS} \approx 0$):

- Para valores $v_{DS} > v_{Dsat}$, el estrangulamiento se produce en algún $x_p < L$:

• Entre $x = 0$ y x_p , v_{Dsat} es responsable de I_{Dsat} .

• Entre x_p y $x = L$, $v_{DS} - v_{Dsat}$ se emplea en transportar la carga móvil a través de la región estrangulada.

JFET de canal n

Efecto combinado de v_{GS} y v_{DS} :

- Entonces $v_{GS} - V(x)$ es la 'polarización directa' de la unión p⁺-n:

$$W(x) = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} [V_{bi} - V_{GS} + V(x)]}$$

- El estrangulamiento ocurre si: $V_{GS} - V(x) = V_P$

- Siendo la v_{DS} mínima (para la que $x = L$): $V_{DS} = V_{DSat}$

donde: $V_{DSat} = V_{GS} - V_P = V_{P0} - V_{bi} + V_{GS}$

JFET de canal n

Efecto de la tensión de drenador, v_{DS} : saturación (*pinch-off*)

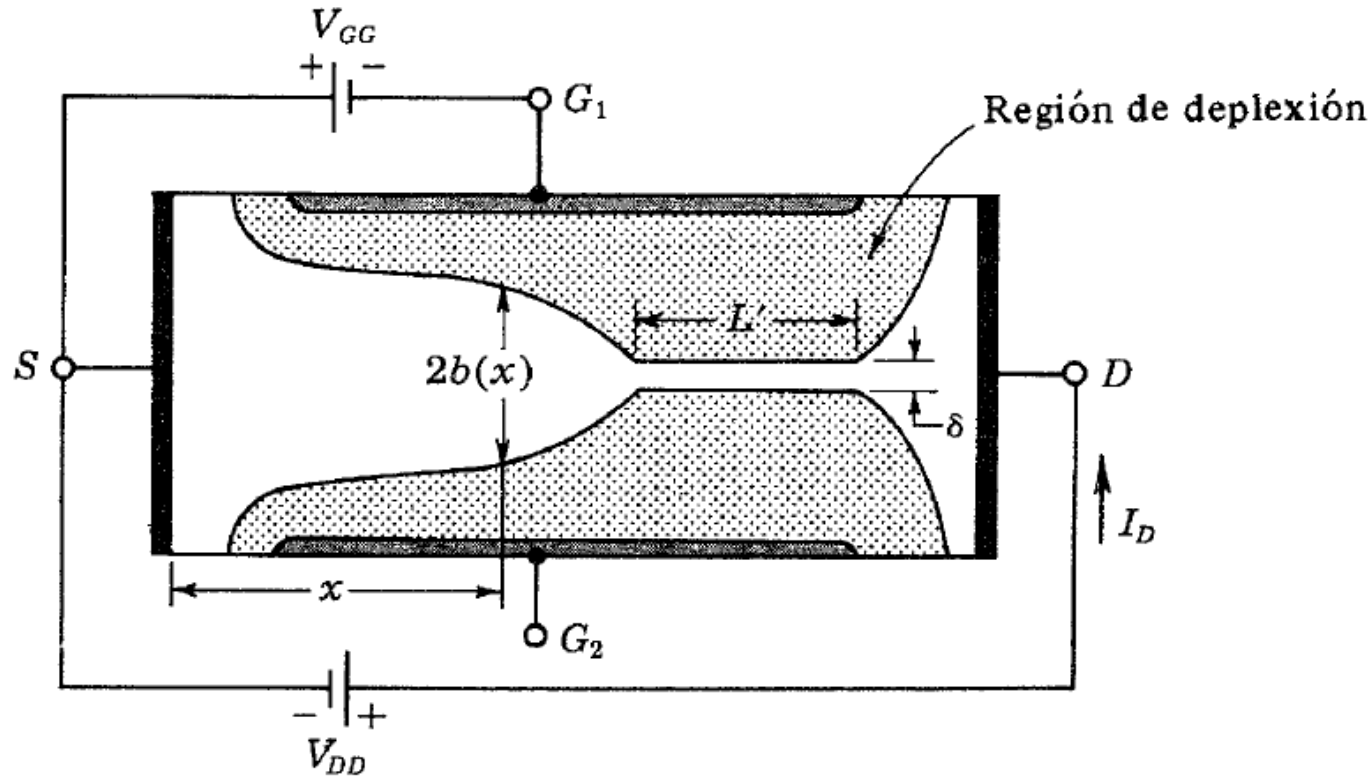


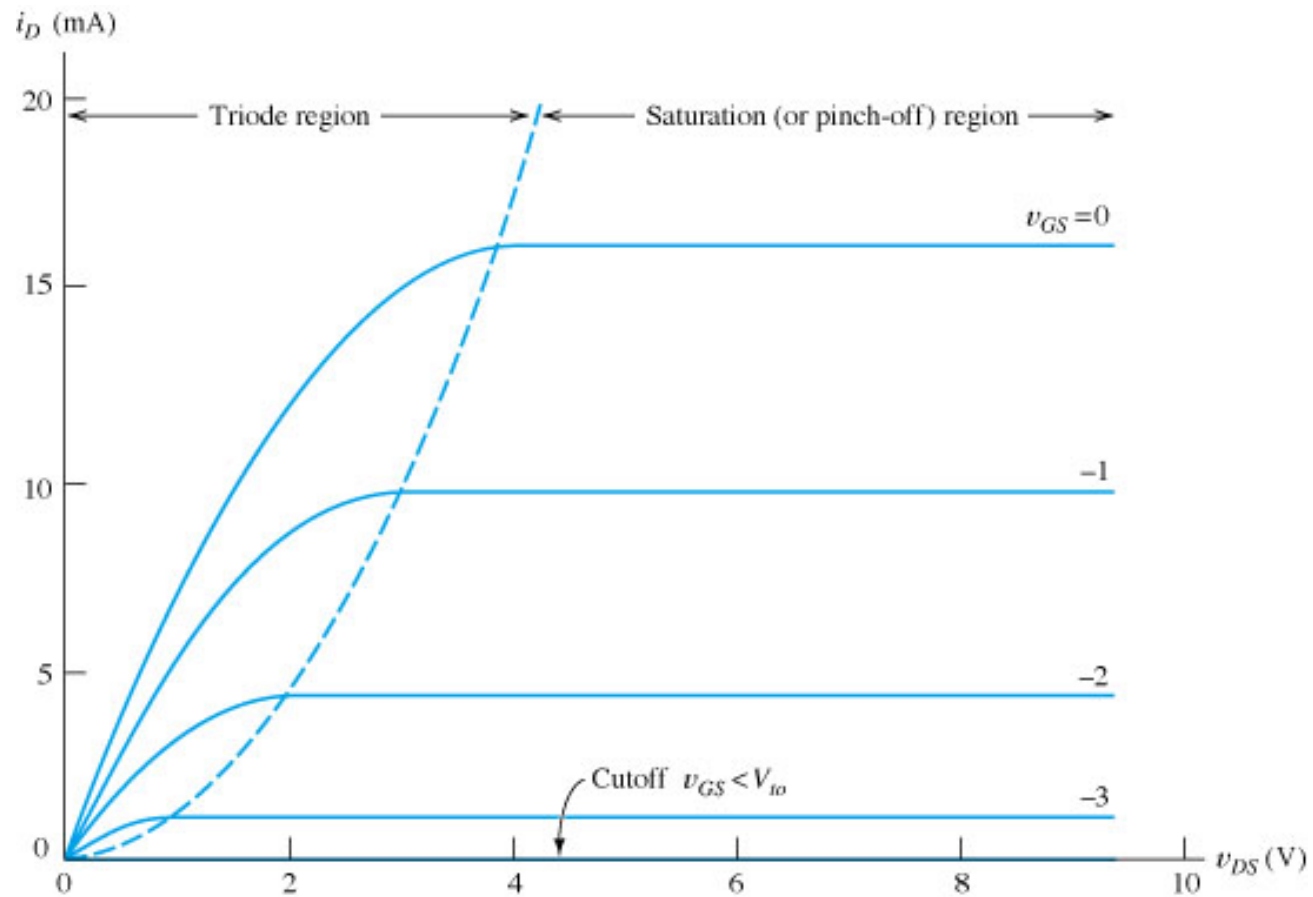
Fig. 10-5. Después del estrangulamiento, cuando V_{DS} aumenta, L' aumenta también pero δ e I_D permanecen fundamentalmente constantes. (G_1 y G_2 están conectados juntos.)

Saturación:

$$V_{Dsat} = V_{GS} - V_P = V_{P0} - V_{bi} + V_{GS}$$

JFET de canal n

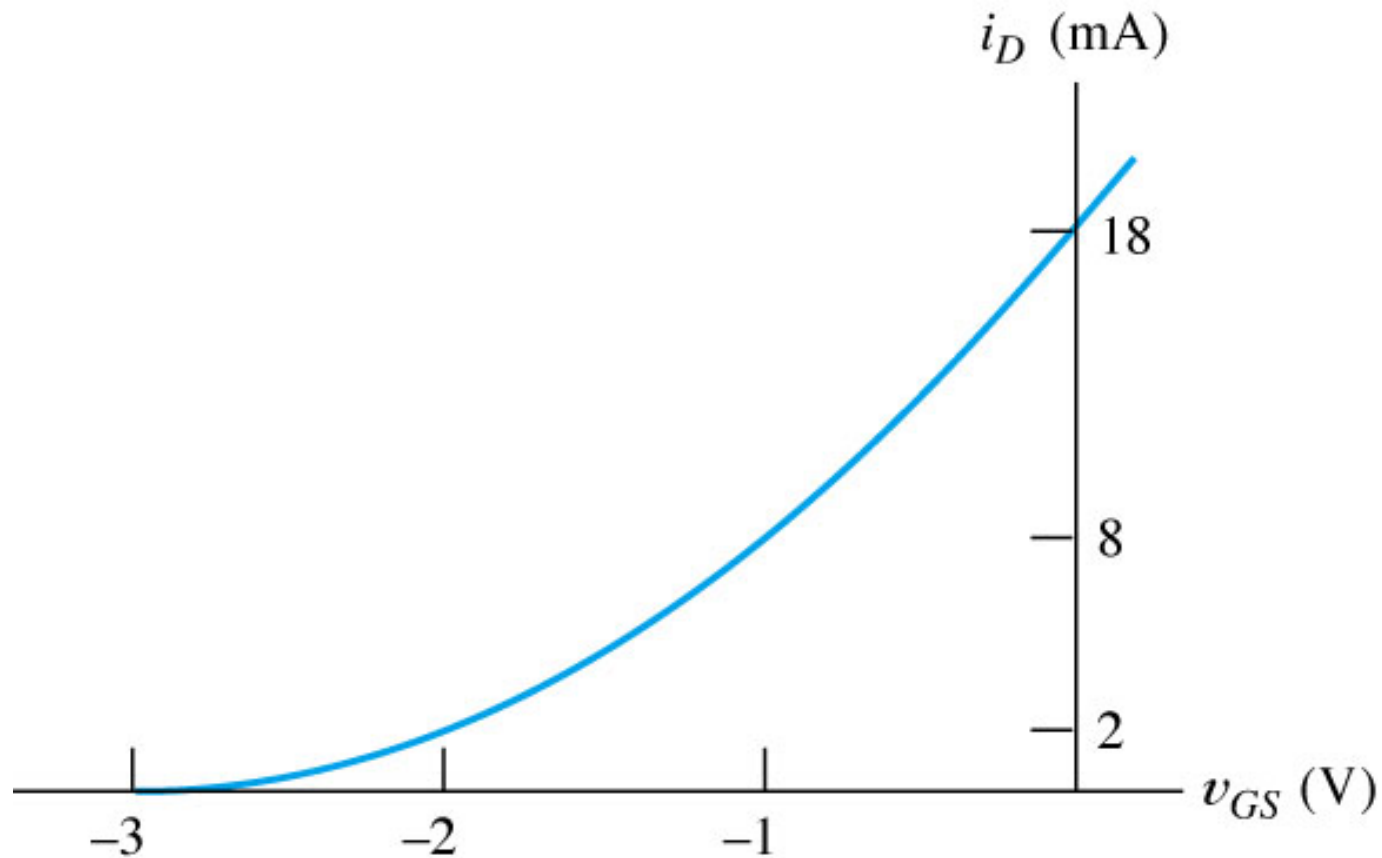
Característica de drenador: i_D vs. v_{DS}



JFET de canal n

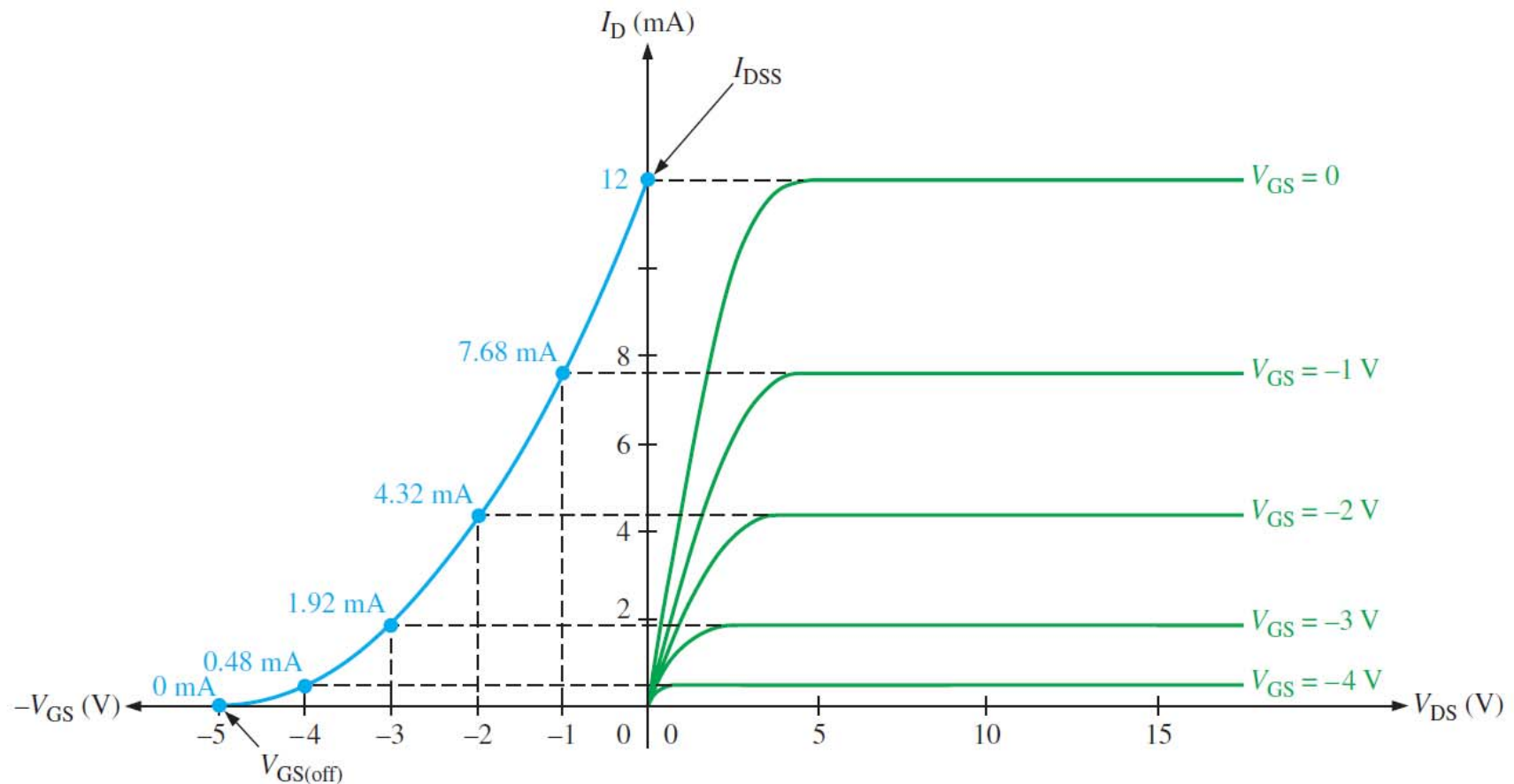
Curva de transferencia (o transconductancia): i_D vs. v_{GS}

(en saturación)



JFET de canal n

Curva de transferencia, i_D vs. v_{GS} , construida a partir de la familia de curvas características de drenador, i_D vs. v_{DS} :



▲ FIGURE 8-13

Example of the development of an n -channel JFET transfer characteristic curve (blue) from the JFET drain characteristic curves (green).

JFET de canal n

Modelo empírico para i_D vs. v_{GS} en saturación:

(curva de transferencia)

$$V_{Dsat} = V_{GS} - V_P$$

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

$$I_{DSS} \equiv I_{Dsat}(V_{GS} = 0)$$

JFET frente a BJT

<i>JFET</i>		<i>BJT</i>
$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$	\Leftrightarrow	$I_C = \beta I_B$
$I_D = I_S$	\Leftrightarrow	$I_C \cong I_E$
$I_G \cong 0 \text{ A}$	\Leftrightarrow	$V_{BE} \cong 0.7 \text{ V}$

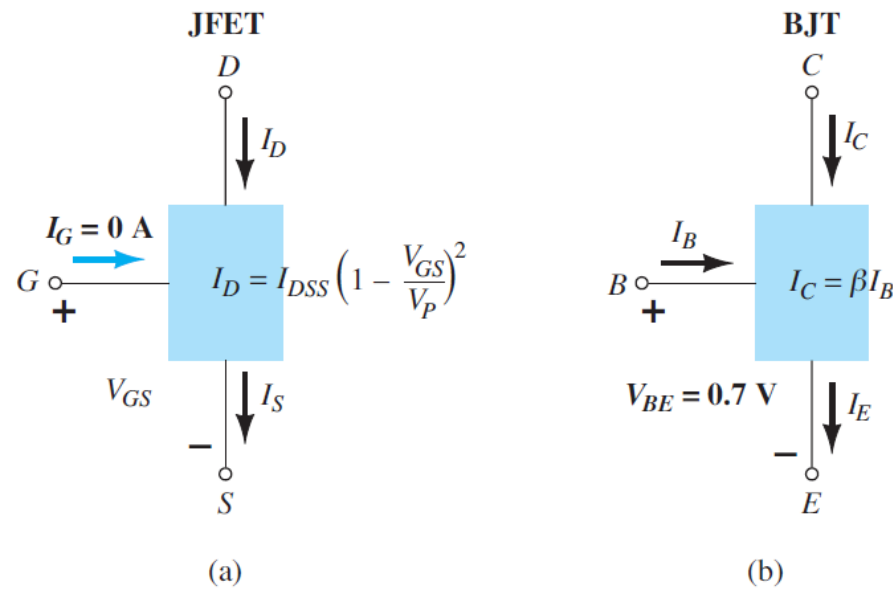


FIG. 6.26

(a) *JFET* contra (b) *BJT*.

MESFET de vaciamiento (de canal n)

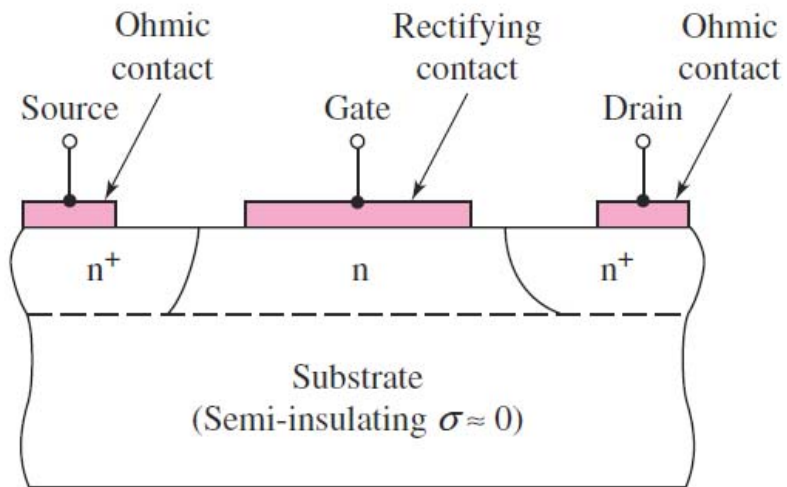


Figure 3.57 Cross section of an n-channel MESFET with a semi-insulating substrate

MESFET de enriquecimiento

Control del canal n:

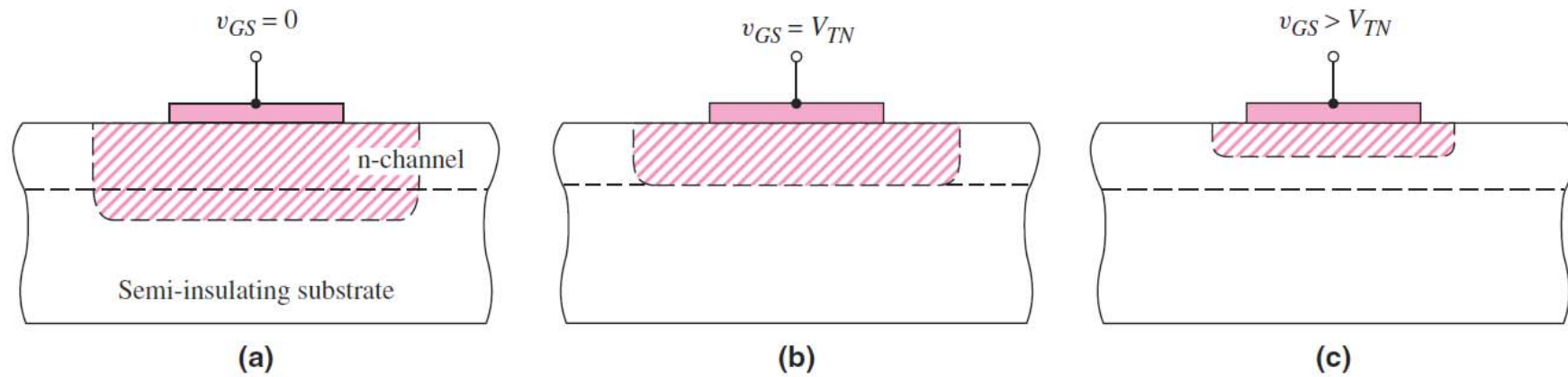


Figure 3.58 Channel space-charge region of an enhancement-mode MESFET for: (a) $v_{GS} = 0$, (b) $v_{GS} = V_{TN}$, and (c) $v_{GS} > V_{TN}$

Tipos de JFET y MESFET

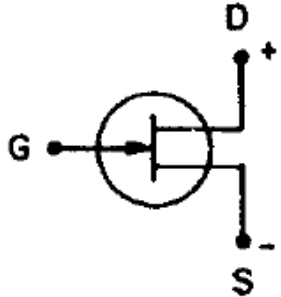
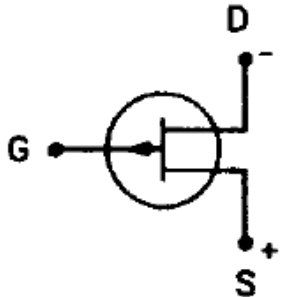
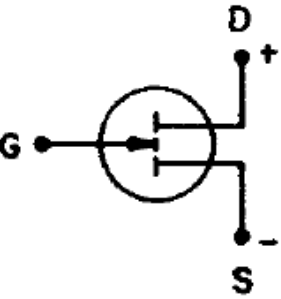
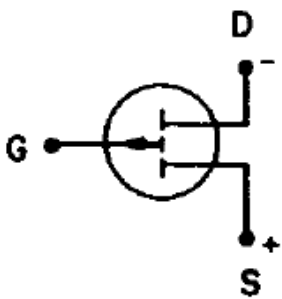
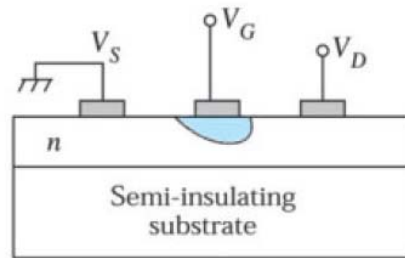
TYPE MODE	n TYPE	p TYPE
NORMALLY ON (DEPLETION)		
NORMALLY OFF (ENHANCEMENT)		

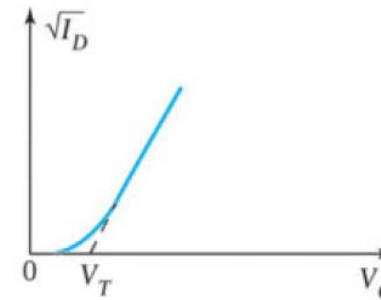
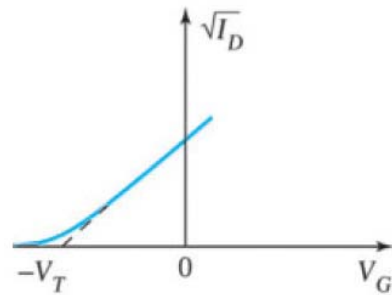
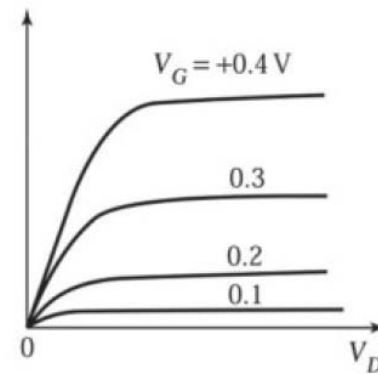
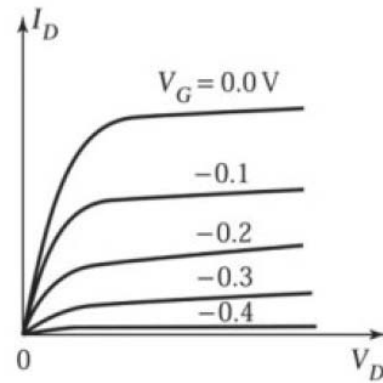
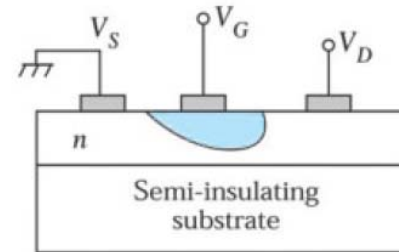
Fig. 5 Symbols for *n*-type and *p*-type normally-on and normally-off JFET and MESFET.

Tipos de JFET y MESFET

De vaciamiento
(*depletion*) →



De enriquecimiento
← (*enhancement*)

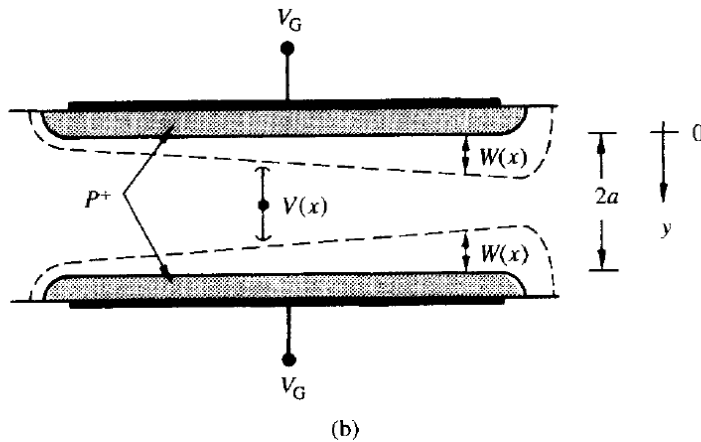
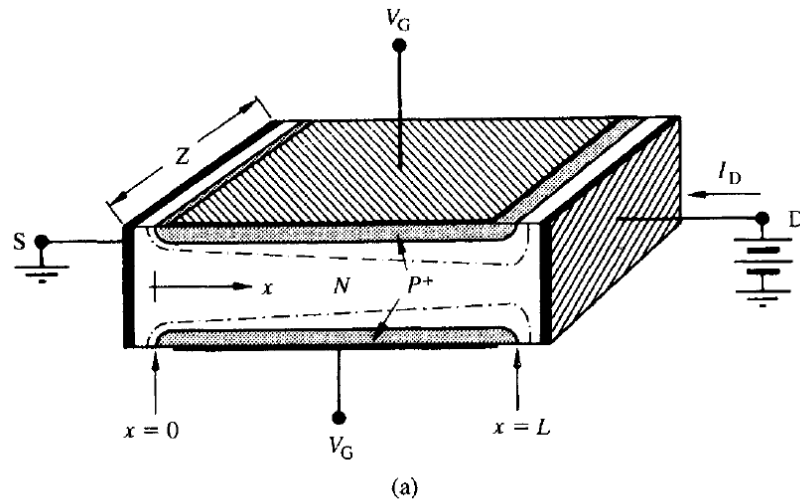


(a)

(b)

Fig. 14 Comparison of I-V characteristics. (a) Normally on MESFET. (b) Normally off MESFET.

Corriente de arrastre en el canal



$$W(x) = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} [V_{bi} - V_{GS} + V(x)]}$$

$$\begin{aligned} I_D &= -q\mu_n n \cdot E_x \cdot A \\ &= -q\mu_n N_D \cdot \left(-\frac{dV}{dx}\right) \cdot 2(a - W)Z \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_D &= 2q\mu_n N_D Z (a - W) \frac{dV}{dx} \\ &= 2q\mu_n N_D Z a \left[1 - \frac{W(x)}{a}\right] \frac{dV(x)}{dx} \end{aligned}$$

Figure 15.15 Device structure, dimensions, and coordinate orientations assumed in the quantitative analysis. (a) Overall diagram. (b) Expanded view of the channel region.

Corriente de arrastre en el canal

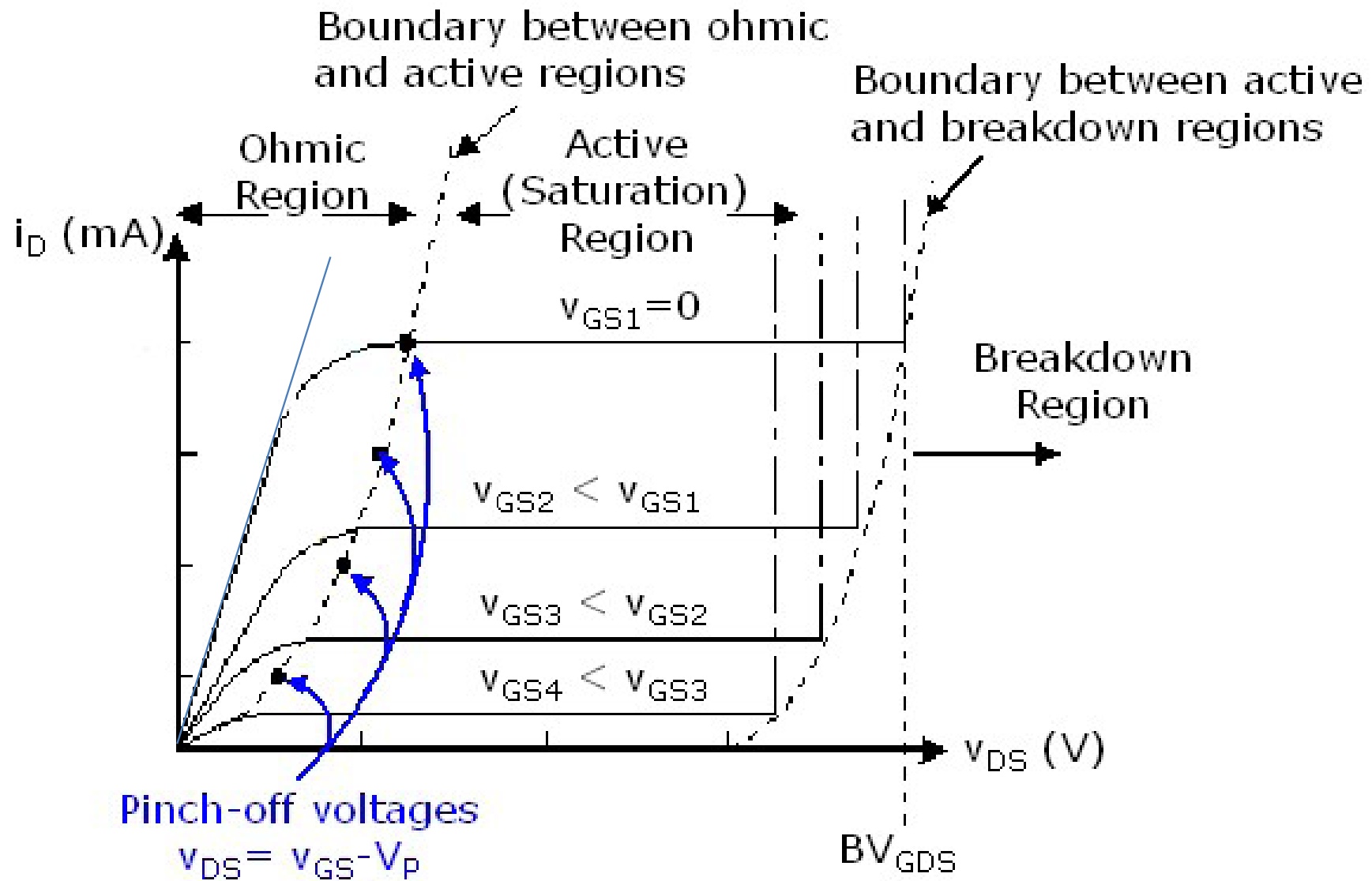
$$I_D dx = 2q\mu_n N_D Z a \left[1 - \frac{W(V)}{a} \right] dV$$

$$\int_0^L I_D dx = 2q\mu_n N_D Z a \int_0^{V_{DS}} \left[1 - \frac{W(V)}{a} \right] dV$$

Siendo la conductancia nominal del canal: $G_0 = \frac{2q\mu_n N_D Z a}{L}$ (canal n) \Rightarrow

Expresión general de la corriente en el canal: $I_D = G_0 \int_0^{V_{DS}} \left[1 - \frac{W(V)}{a} \right] dV$

Características I-V



Características I-V (región lineal)

- Región lineal (óhmica):

$$V_{DS} \ll V_{bi} - V_{GS}$$

$$V_{DS} \approx 0 \Rightarrow W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} [V_{bi} - V_{GS} + V(x)]} \approx \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} (V_{bi} - V_{GS})} \equiv \text{cte.}$$

$$I_D = G_0 \int_0^{V_{DS}} \left[1 - \frac{W(V)}{a} \right] dV = G_0 \left[1 - \frac{W}{a} \right] \int_0^{V_{DS}} dV = G_0 \left(1 - \frac{W}{a} \right) V_{DS}$$

Utilizando (estrangulamiento):

$$W = a \Leftrightarrow V_{GS} = V_P$$

de donde se obtiene:

$$V_{bi} - V_P = V_{P0} = \frac{qN_D a^2}{2\epsilon_s}$$

Entonces:

$$V_{bi} - V_{GS} = V_{P0} \frac{W^2}{a^2} \Rightarrow$$

$$I_D = G_0 \left(1 - \sqrt{\frac{V_{bi} - V_{GS}}{V_{P0}}} \right) V_{DS}$$

Características I-V (saturación)_{1/2}

- Región de saturación:

$$V_{DS} > V_{Dsat} = V_{GS} - V_P$$

Integrando I_D para el caso general:

$$I_D = G_0 \int_0^{V_{DS}} \left[1 - \frac{W(V)}{a} \right] dV = G_0 \int_0^{V_{DS}} \left[1 - \frac{1}{a} \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} (V_{bi} - V_{GS} + V)} \right] dV$$
$$I_D = G_0 \left\{ V_{DS} - 0 - \frac{2}{3} \left(\frac{2\epsilon_s}{qN_D a^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left[(V_{bi} - V_{GS} + V_{DS})^{\frac{3}{2}} - (V_{bi} - V_{GS})^{\frac{3}{2}} \right] \right\}$$

En saturación:

$$I_D = I_{Dsat} \approx cte.$$

con:

$$V_{DS} \geq V_{Dsat}$$

luego, utilizando:

$$V_{P0} = \frac{qN_D a^2}{2\epsilon_s}$$

\Rightarrow ...

Características I-V (saturación)_{2/2}

- Región de saturación (continuación):

$$V_{DS} > V_{Dsat} = V_{GS} - V_P$$

$$I_{Dsat} = G_0 \left\{ V_{Dsat} - \frac{2}{3} \frac{1}{\sqrt{V_{P0}}} \left[(V_{bi} - V_{GS} + V_{Dsat})^{\frac{3}{2}} - (V_{bi} - V_{GS})^{\frac{3}{2}} \right] \right\}$$

Puesto que:

$$V_{Dsat} = V_{GS} - V_P$$

y:

$$V_P = V_{bi} - V_{P0}$$

resulta:

$$V_{Dsat} = V_{P0} - V_{bi} + V_{GS}$$

Substituyendo:

$$I_{Dsat} = G_0 \left\{ V_{P0} - V_{bi} + V_{GS} - \frac{2}{3} \frac{1}{\sqrt{V_{P0}}} \left[(V_{P0})^{\frac{3}{2}} - (V_{bi} - V_{GS})^{\frac{3}{2}} \right] \right\}$$

Operando:

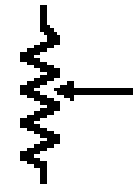
$$I_{Dsat} = G_0 (V_{bi} - V_{GS}) \left(\frac{2}{3} \sqrt{\frac{V_{bi} - V_{GS}}{V_{P0}}} - 1 \right) + \frac{G_0 V_{P0}}{3}$$

Características I-V

- Región lineal: $V_{DS} \ll V_{bi} - V_{GS}$

$$I_D = G_0 \left(1 - \sqrt{\frac{V_{bi} - V_{GS}}{V_{P0}}} \right) V_{DS} \quad , \quad G_0 = \frac{2q\mu_n N_D Z a}{L}$$

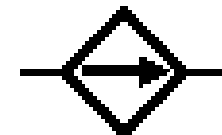
Resistencia controlada por tensión



- Región de saturación: $V_{DS} > V_{Dsat} = V_P + V_{GS}$

$$I_{Dsat} = G_0 (V_{bi} - V_{GS}) \left(\frac{2}{3} \sqrt{\frac{V_{bi} - V_{GS}}{V_{P0}}} - 1 \right) + \frac{G_0 V_{P0}}{3}$$

Fuente de corriente controlada por tensión



Parámetros del modelo de pequeña señal

- Región lineal:

- conductancia:

$$g_{dl} \equiv \left. \frac{dI_D}{dV_{DS}} \right|_{V_{GS}} = G_0 \left(1 - \sqrt{\frac{V_{bi} - V_{GS}}{V_{P0}}} \right)$$

- transconductancia:

$$g_{ml} \equiv \left. \frac{dI_D}{dV_{GS}} \right|_{V_{DS}} = \frac{G_0}{2} \frac{V_{DS}}{\sqrt{V_{P0}(V_{bi} - V_{GS})}}$$

- Región de saturación:

- conductancia:

$$g_{ds} \equiv \left. \frac{dI_D}{dV_{DS}} \right|_{V_{GS}} \approx 0$$

- transconductancia:

$$g_{ms} \equiv \left. \frac{dI_D}{dV_{GS}} \right|_{V_{DS}} = G_0 \left(1 - \sqrt{\frac{V_{bi} - V_{GS}}{V_{P0}}} \right)$$

Resistencias de fuente y drenador

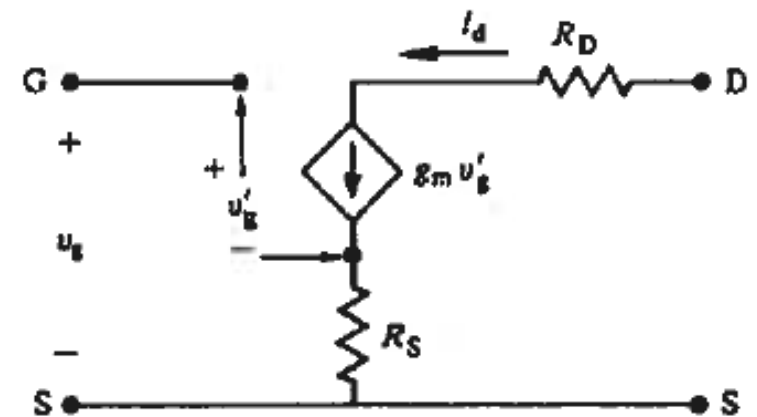
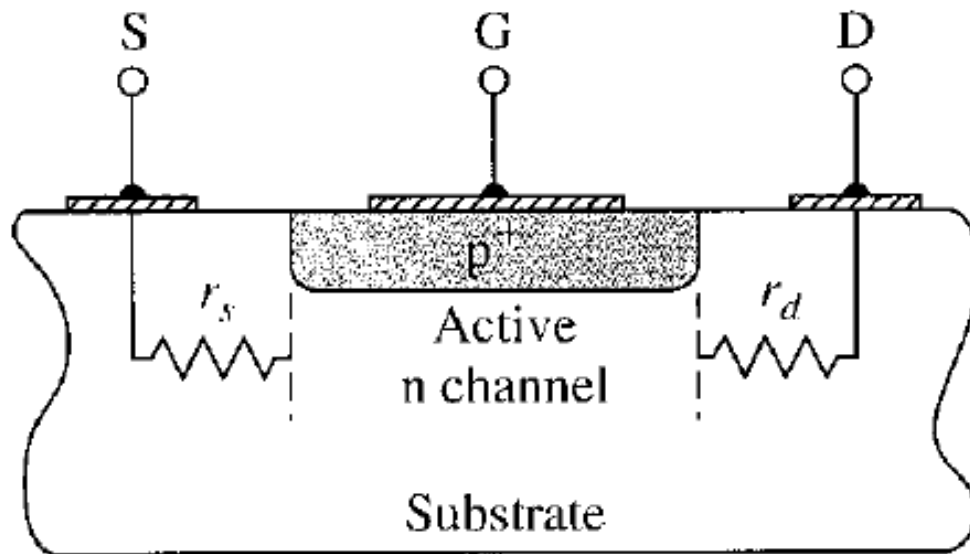


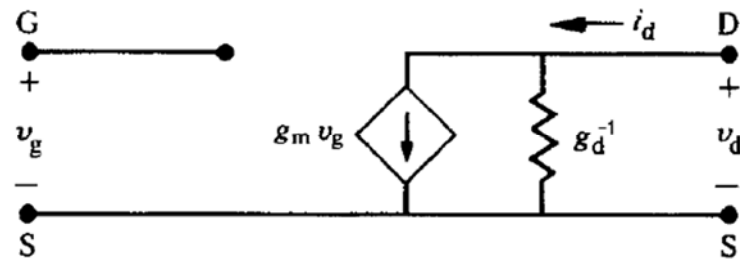
Figure 13.18 | Cross section of JFET with source and drain series resistance.

Modelo de pequeña señal (en saturación)

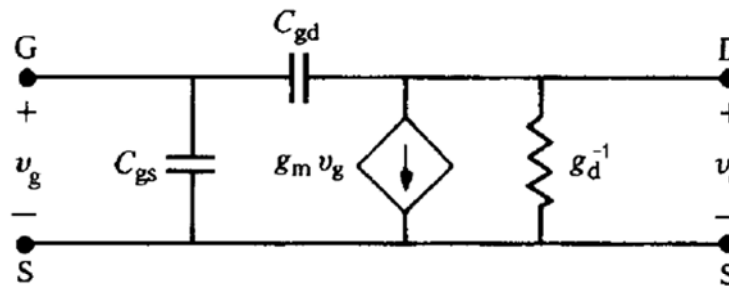


(a)

(frecuencias
bajas y medias)



(b)

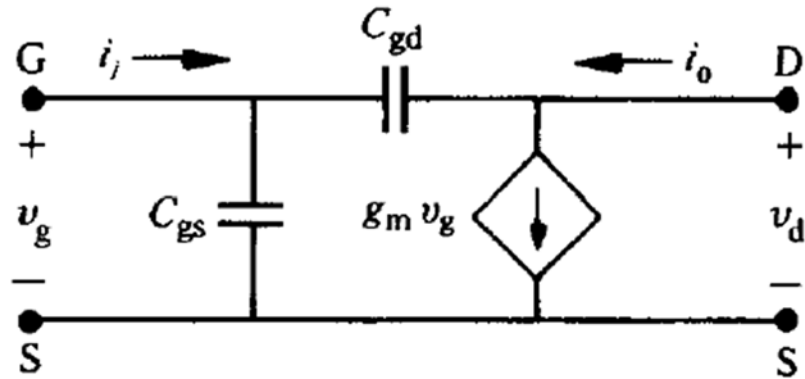


(c)

(altas frecuencias)

Figure 15.19 (a) The J-FET viewed as a two-port network. (b) Low-frequency and (c) high-frequency small-signal equivalent circuits characterizing the a.c. response of the J-FET.

Modelo de pequeña señal (altas frecuencias)



Limitación en frecuencia:

$$\left. \frac{i_o}{i_i} \right|_{v_d=0} = 1$$

$$i_o = g_m v_g$$

$$v_d = 0; \quad i_i = 2\pi f_{co} (C_{gs} + C_{gd}) v_g = 2\pi f_{co} C_G v_g$$

$$C_g = 2ZL \frac{\epsilon}{a/2} = 4ZL \frac{\epsilon}{a}$$

Frecuencia de corte:

$$f_{co} = \frac{g_m}{2\pi C_G} \leq \frac{q a^2 \mu_n N_D}{4\pi \epsilon L^2}$$