
Modelando el Transistor de Efecto de Campo

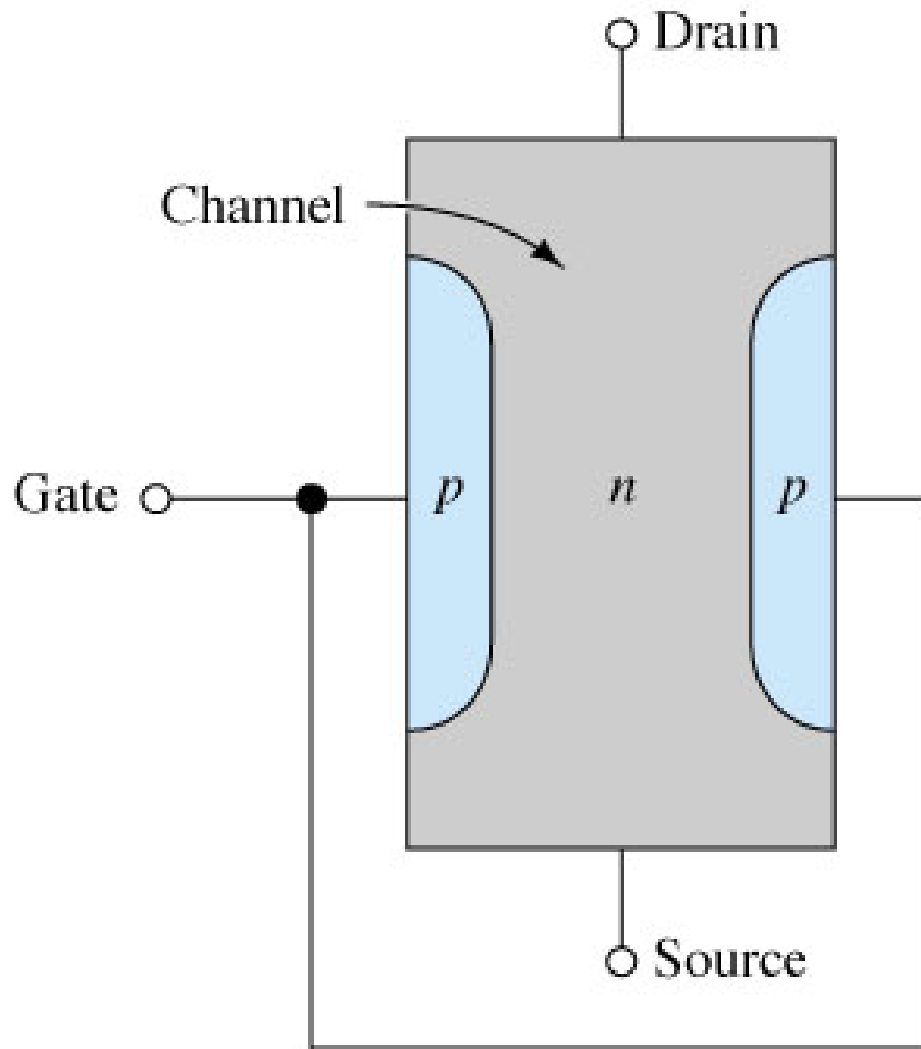
Algunas de las figuras de esta presentación fueron tomadas de las páginas de internet de los autores de los textos:

A.S. Sedra and K.C. Smith, *Microelectronic Circuits*. New York, NY: Oxford University Press, 1998.

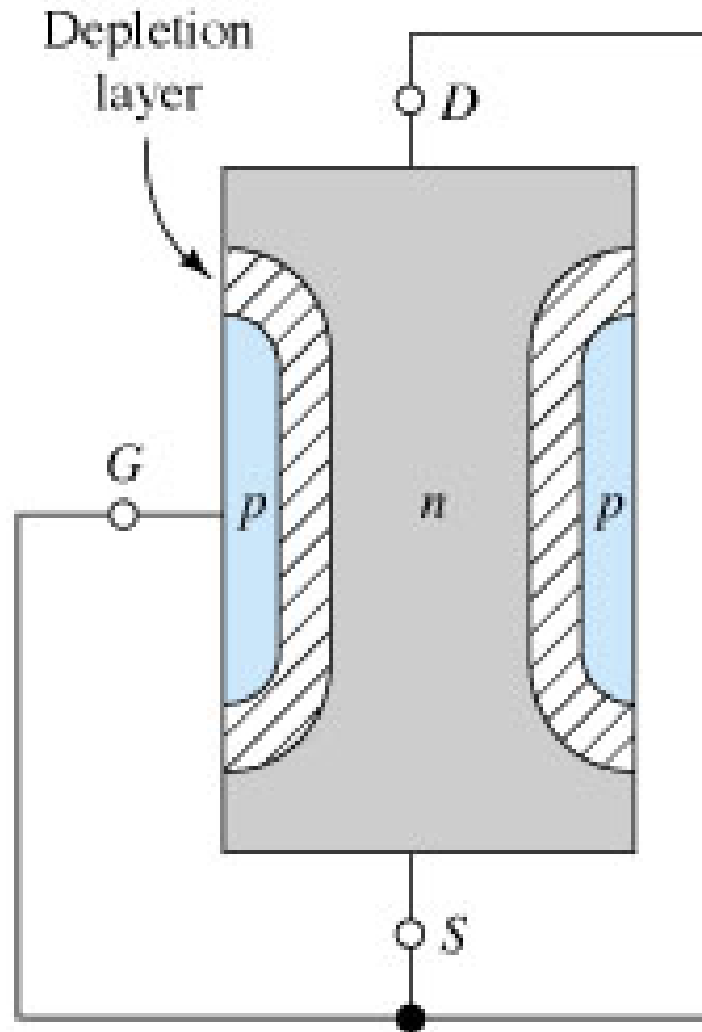
A.R. Hambley, *Electronics: A Top-Down Approach to Computer-Aided Circuit Design*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2000.

R.C. Jager, *Microelectronic Circuit Design*. New York, NY: McGraw Hill, 1997.

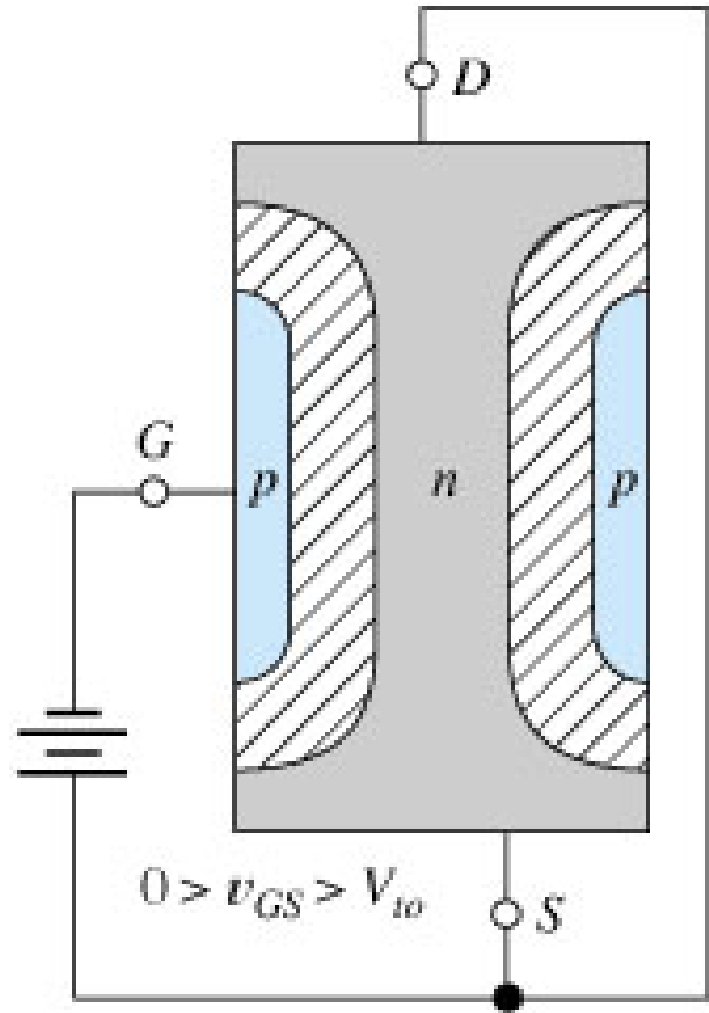
Estructura Simplificada del JFET



Operación del JFET ($v_{GS} = 0$, $v_{DS} = 0$)



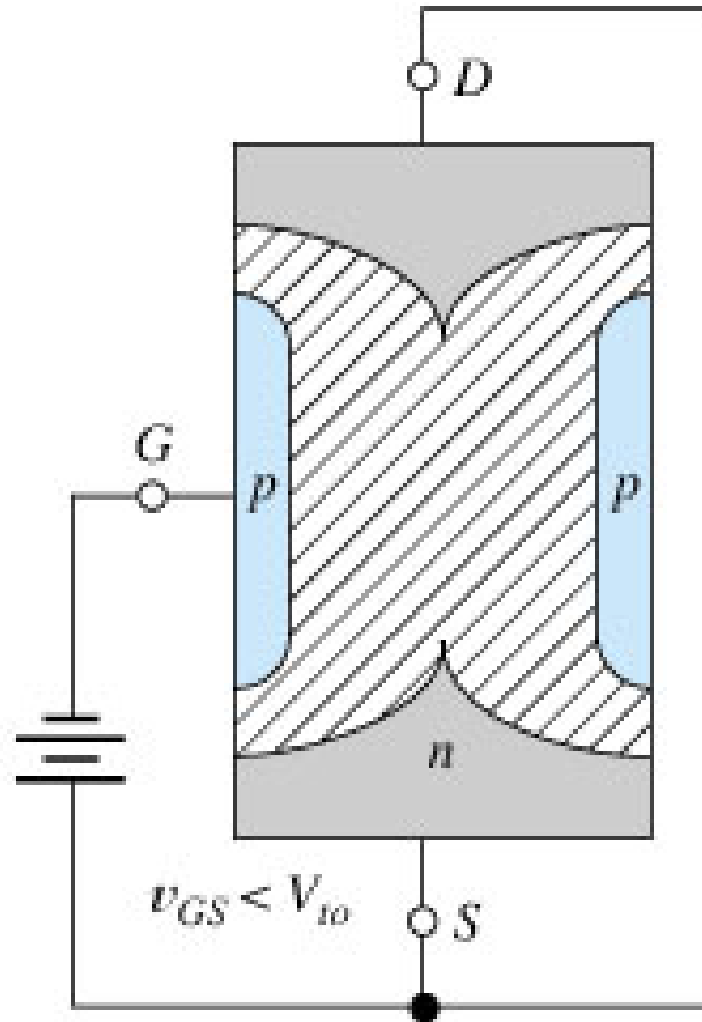
Operación del JFET ($0 > v_{GS} > V_P, v_{DS} = 0$)



$$V_{to} = V_P$$

Voltaje de estrangulamiento

Operación del JFET ($v_{GS} < V_P$, $v_{DS} = 0$)



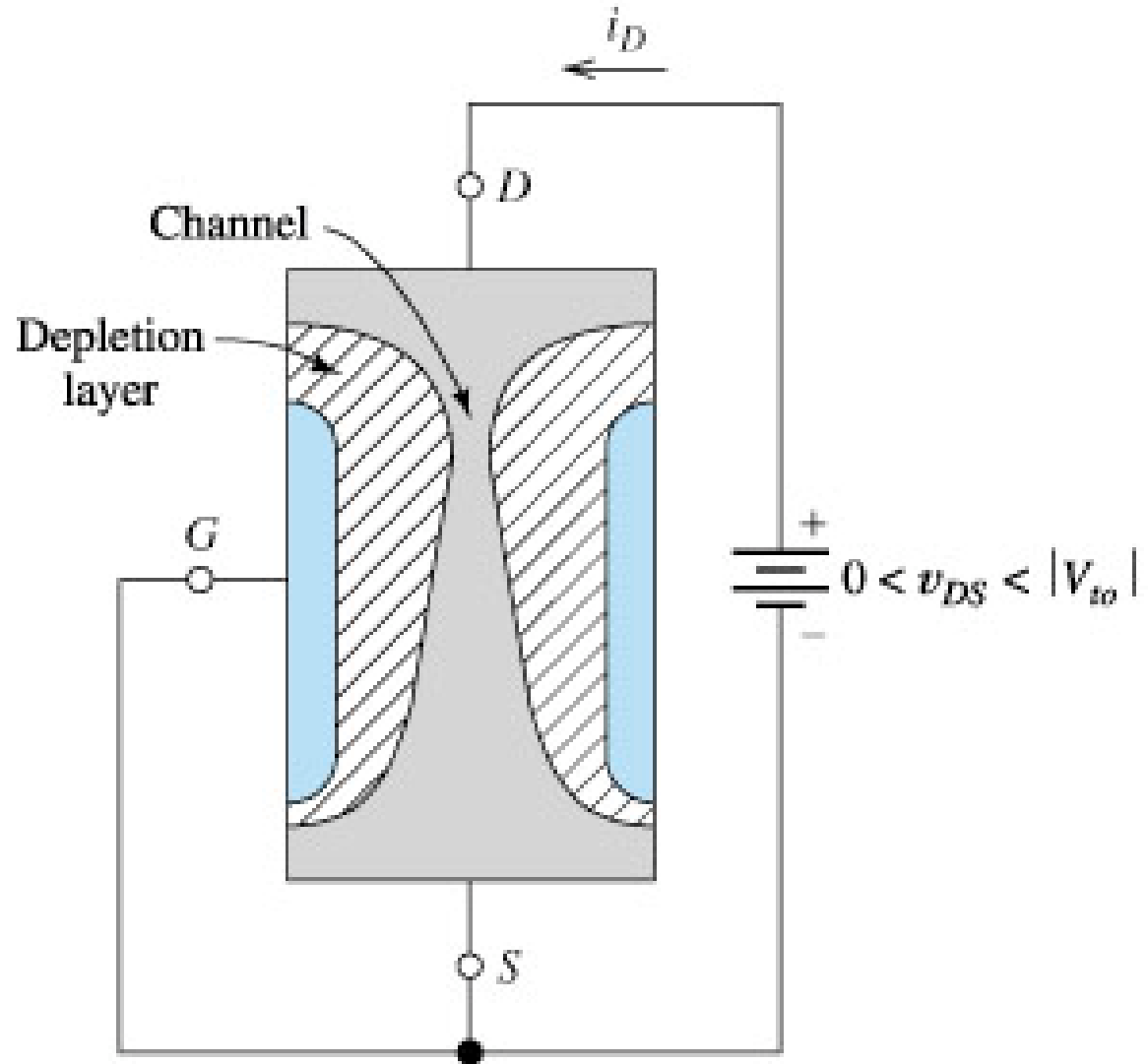
$$V_{to} = V_P$$

Voltaje de estrangulamiento

Operación del JFET ($v_{GS} = 0, 0 < v_{DS} < |V_P|$)

$$V_{to} = V_P$$

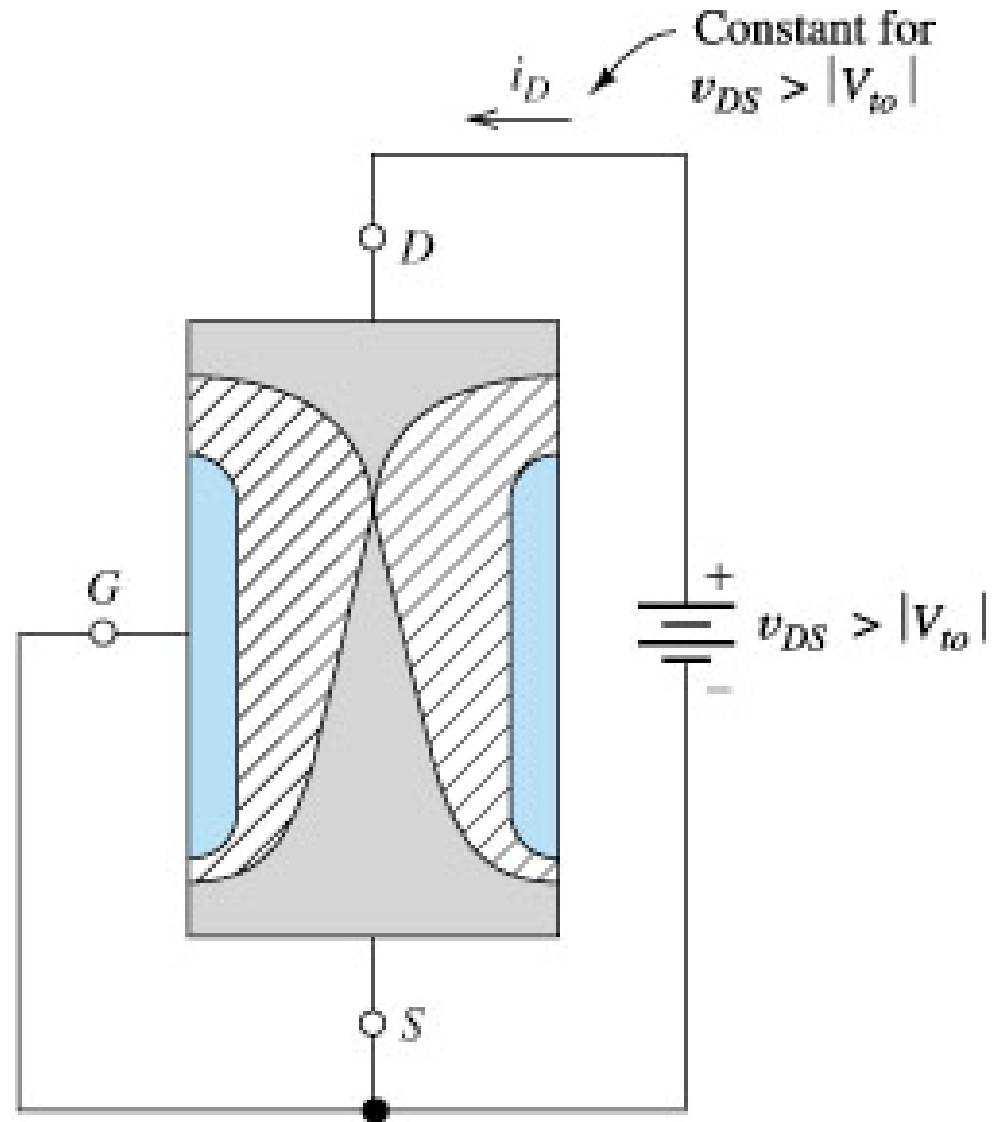
Voltaje de estrangulamiento



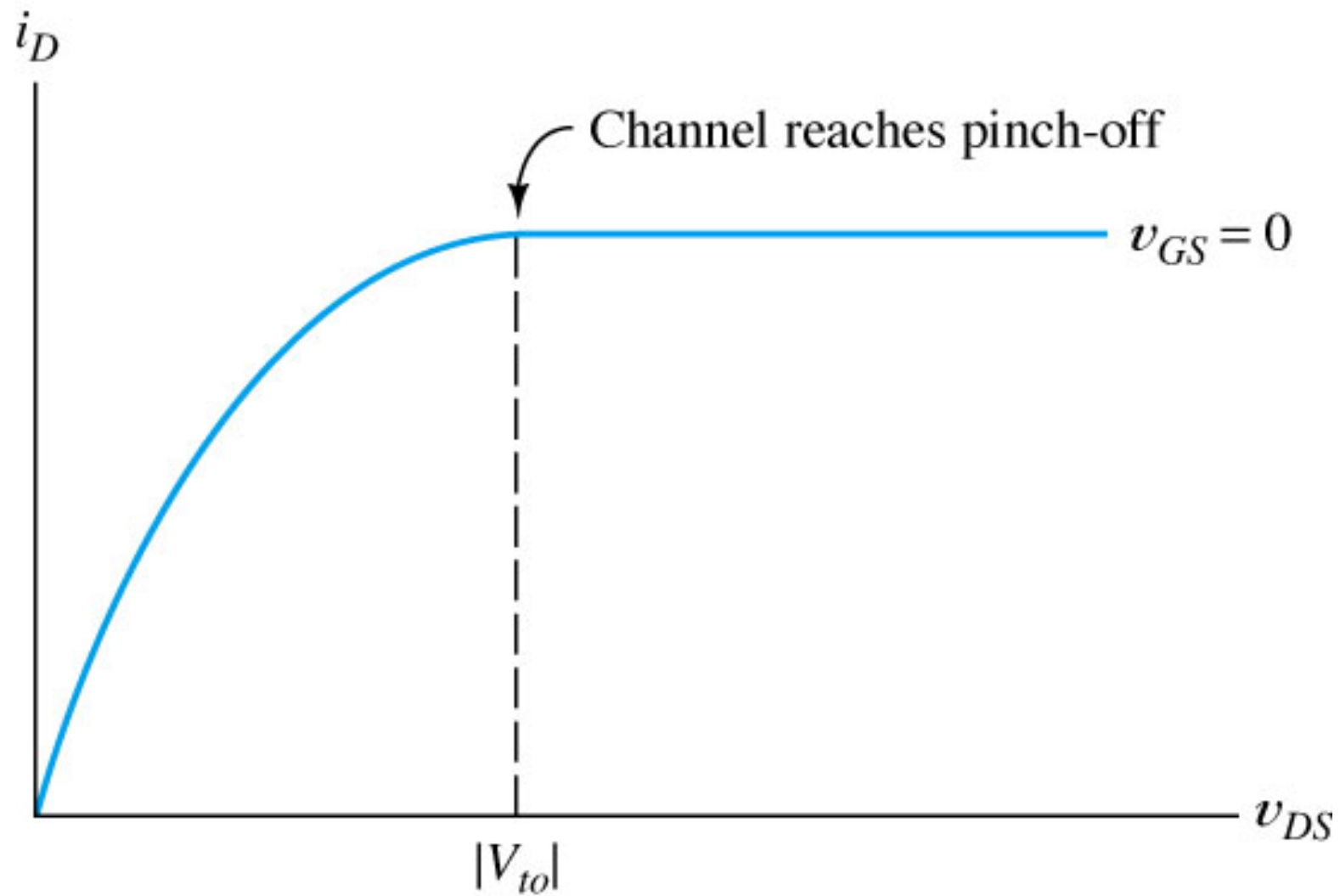
Operación del JFET ($v_{GS} = 0, v_{DS} > |V_P|$)

$$V_{to} = V_P$$

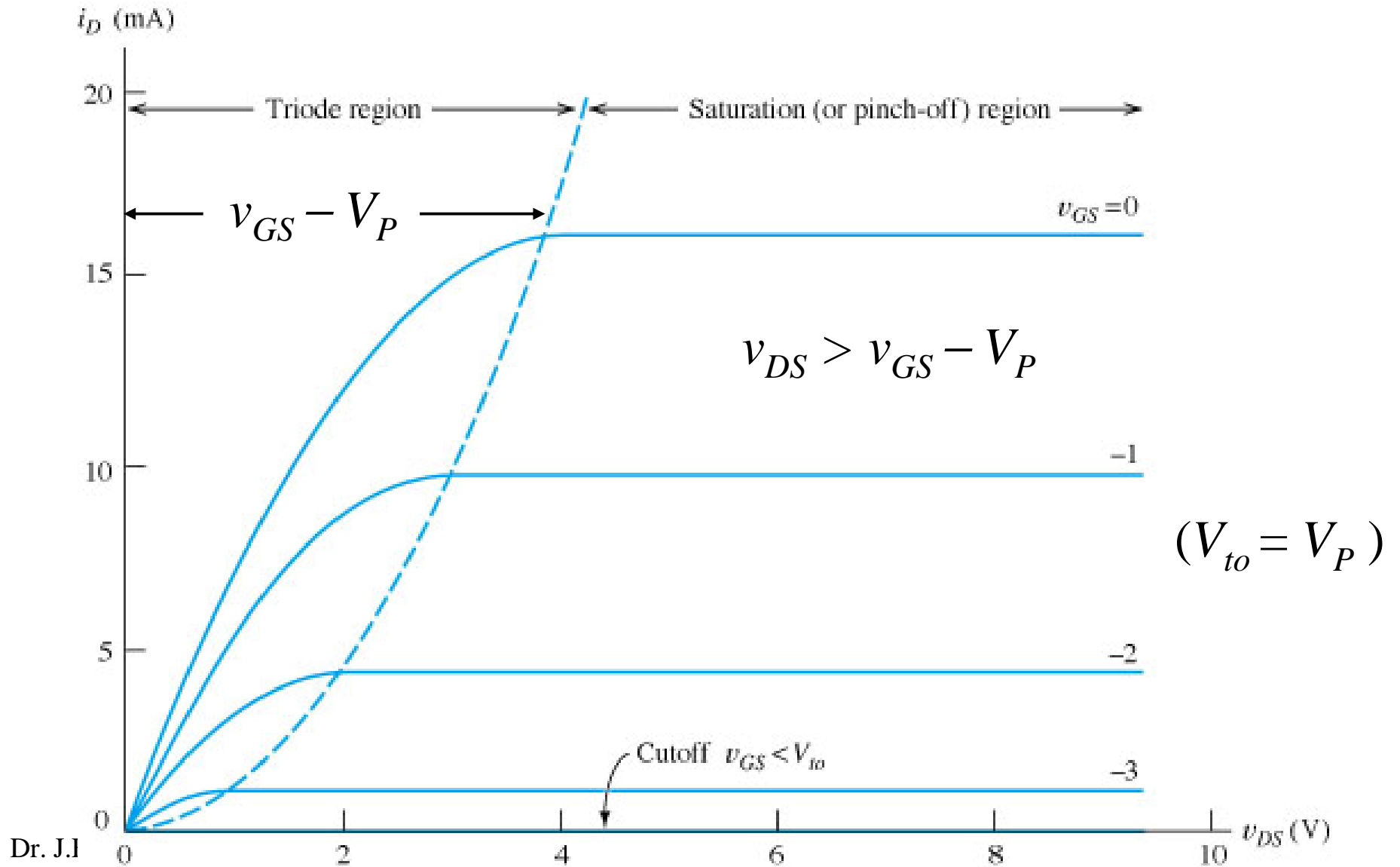
Voltaje de estrangulamiento



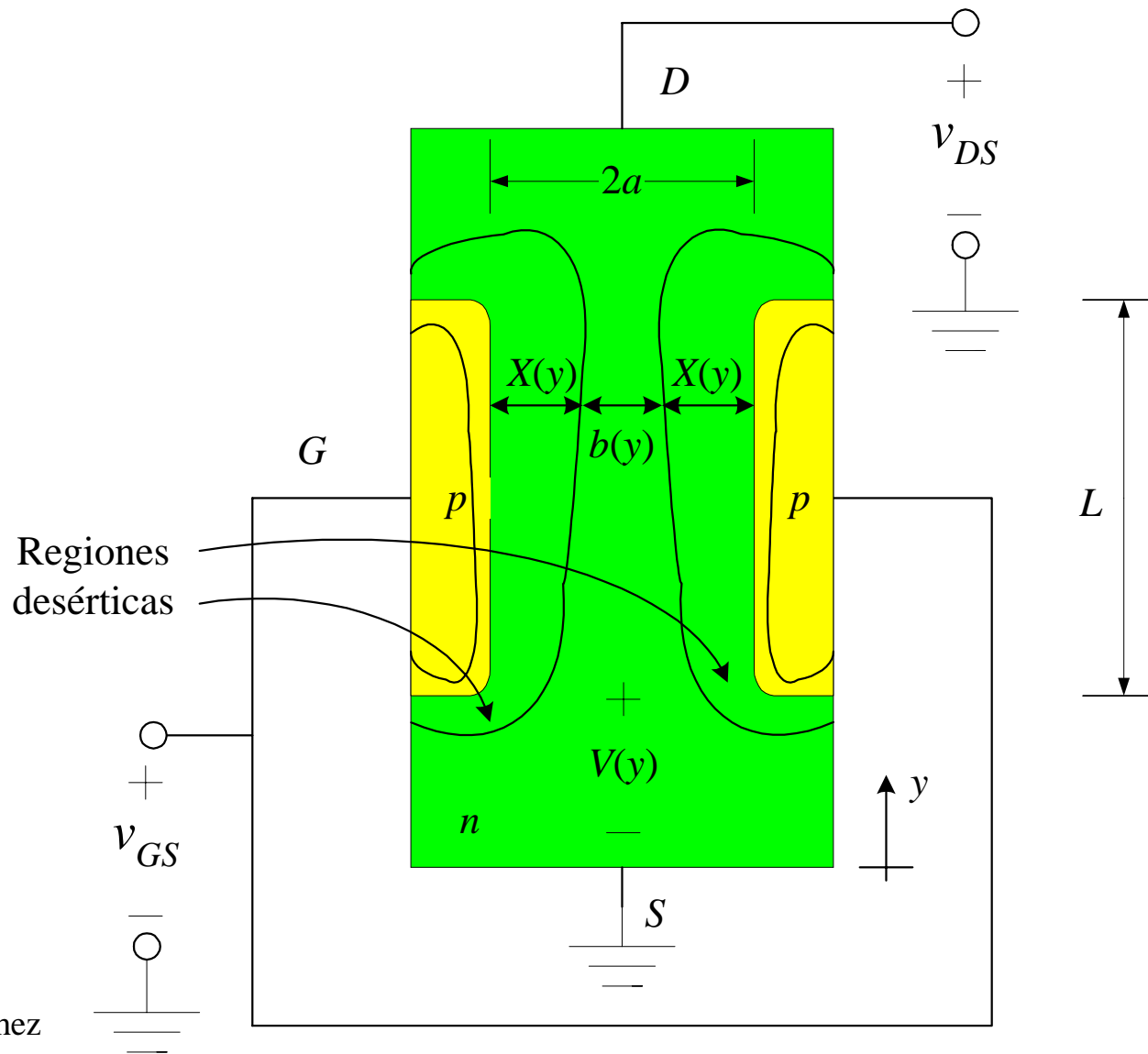
i_{DS} VS v_{DS} cuando $v_{GS} = 0$



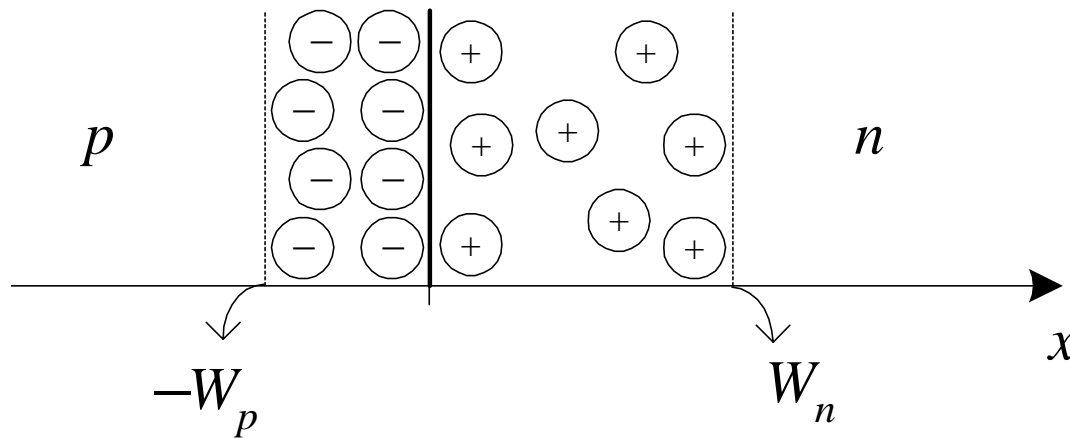
Curvas de Salida de un JFET Canal N



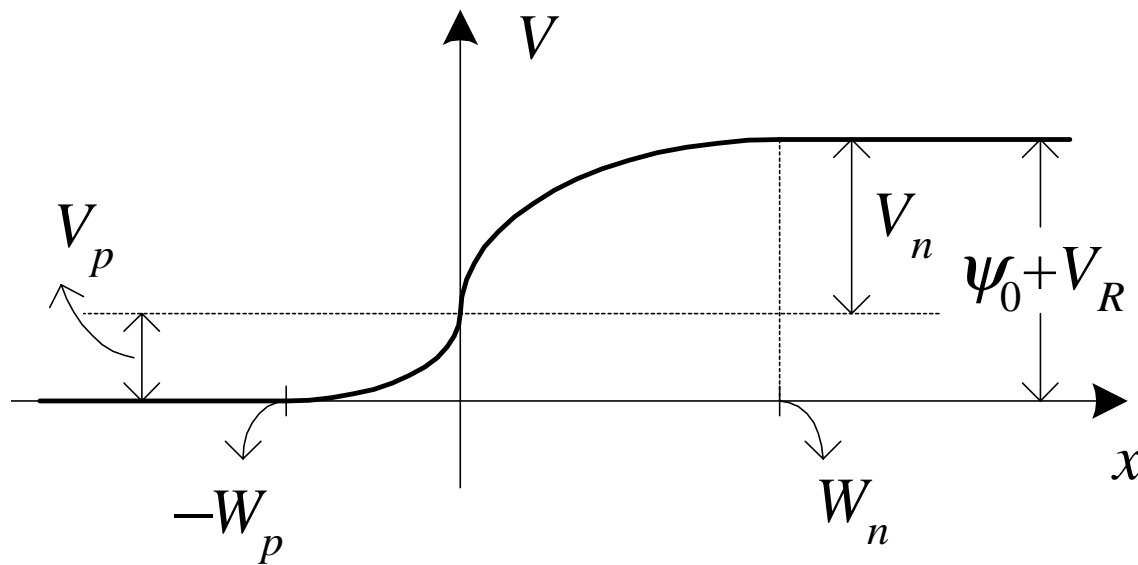
Análisis de la Operación del JFET



Unión P-N Polarizada Inversamente (repasso)



$$W_p = \sqrt{\frac{2\epsilon(\psi_0 + V_R)}{qN_A \left(1 + \frac{N_A}{N_D}\right)}}$$



$$W_n = \sqrt{\frac{2\epsilon(\psi_0 + V_R)}{qN_D \left(1 + \frac{N_D}{N_A}\right)}}$$

$$\psi_0 = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

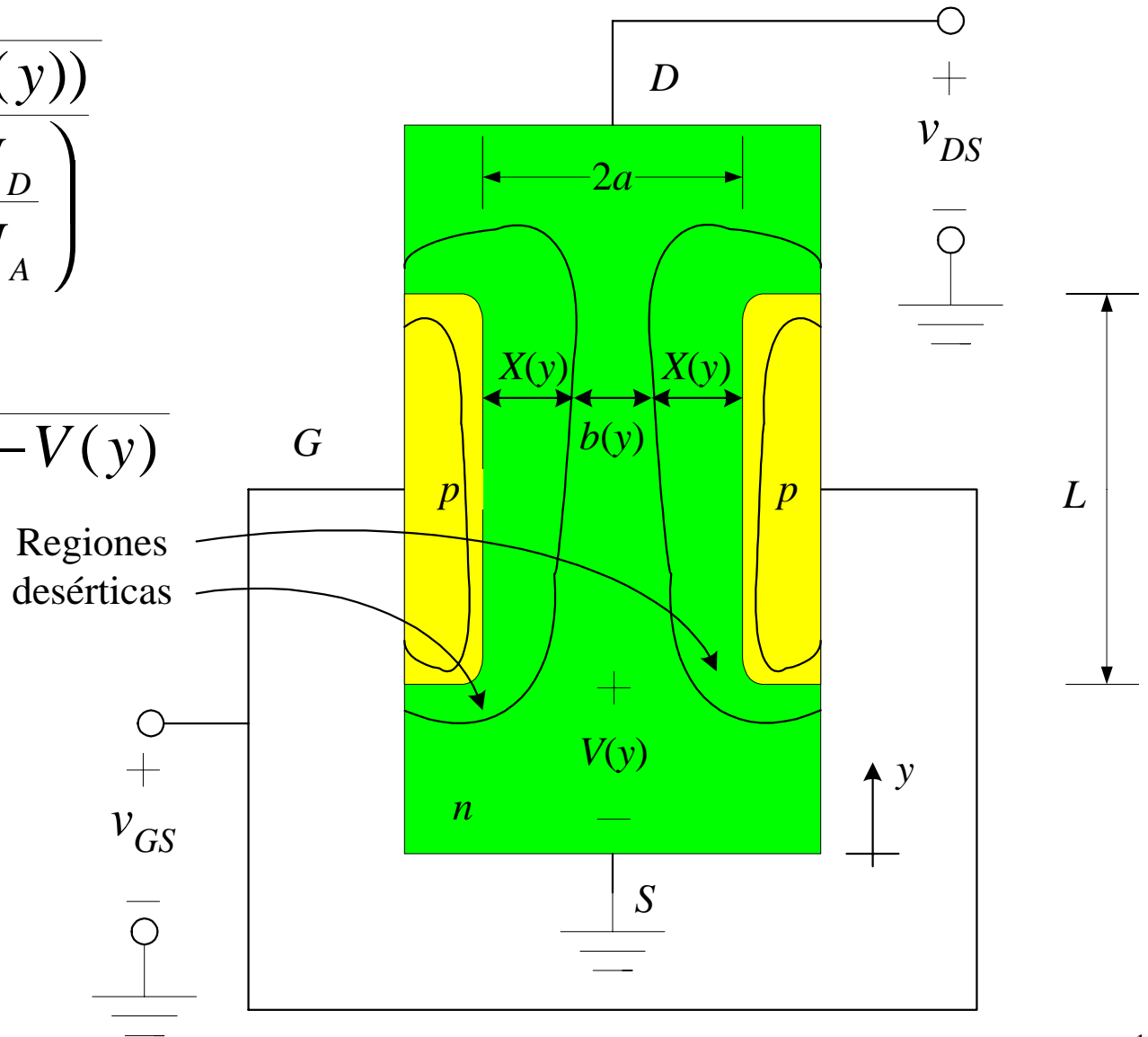
Análisis de la Operación del JFET (cont.)

$$X(y) = \sqrt{\frac{2\epsilon(\psi_0 + V_R(y))}{qN_D \left(1 + \frac{N_D}{N_A}\right)}}$$

$$V_R(y) = v_{GS} - V(y)$$

$$X(y) = K_1 \sqrt{\psi_0 + v_{GS} - V(y)}$$

$$K_1 = \sqrt{\frac{2\epsilon}{qN_D \left(1 + \frac{N_D}{N_A}\right)}}$$



Análisis de la Operación del JFET (cont.)

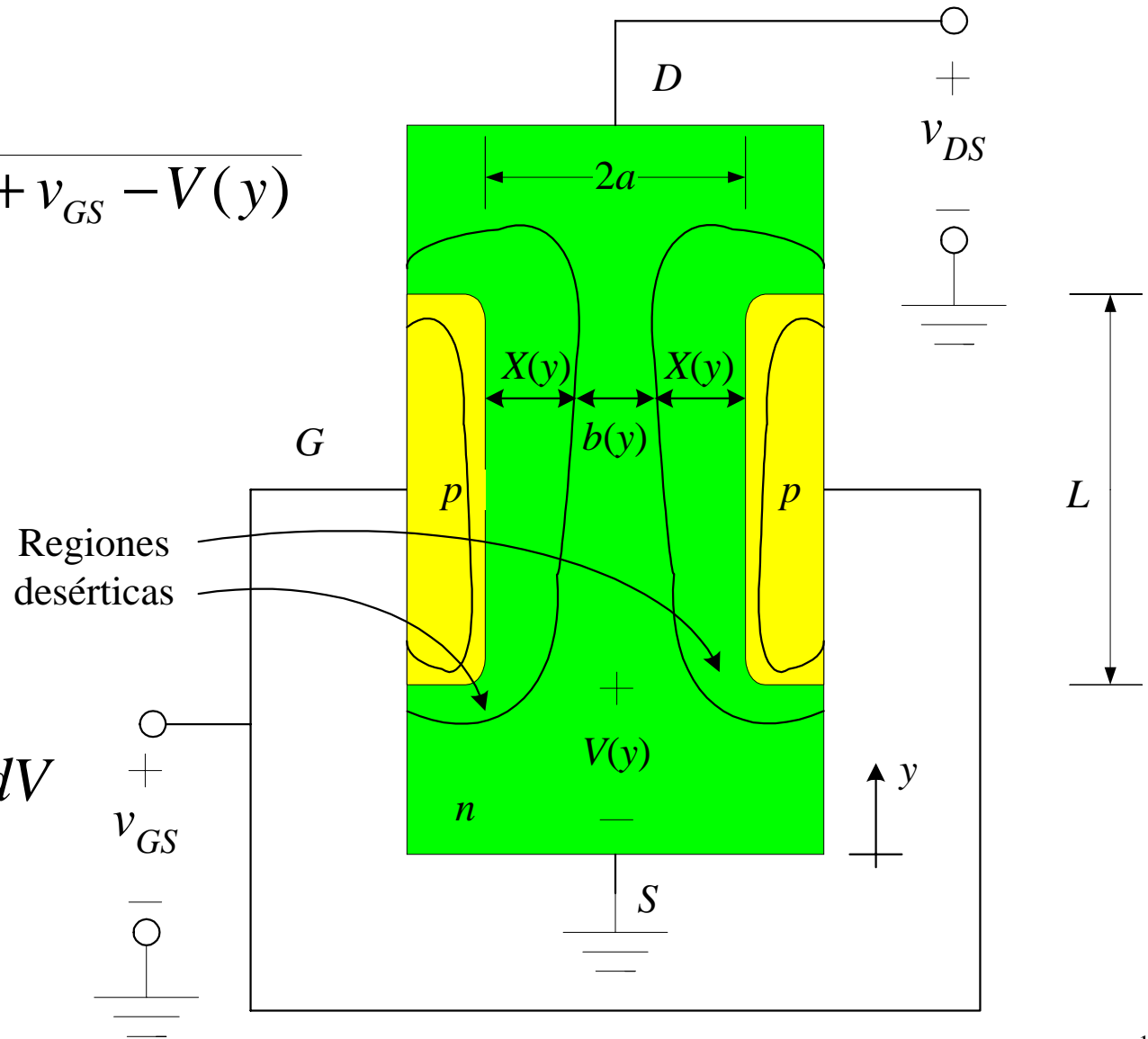
$$b(y) = 2a - 2X(y)$$

$$b(y) = 2a - 2K_1 \sqrt{\psi_0 + v_{GS} - V(y)}$$

$$J_y = \sigma E_y$$

$$\frac{-i_{DS}}{Wb(y)} = -\sigma \frac{dV(y)}{dy}$$

$$i_{DS} \int_0^L dy = \sigma W \int_0^{V(L)} b(y) dV$$



Análisis de la Operación del JFET (cont.)

$$b(y) = 2a - 2K_1 \sqrt{\psi_0 + v_{GS} - V(y)}$$

$$i_{DS} \int_0^L dy = \sigma W \int_0^{V(L)} b(y) dV$$

$$V(L) \equiv V'_{DS}$$

$$i_{DS} = G_0 \left[V'_{DS} + \frac{2K_1}{3a} (\psi_0 + v_{GS} - V'_{DS})^{3/2} - \frac{2K_1}{3a} (\psi_0 + v_{GS})^{3/2} \right]$$

donde $G_0 = \frac{2a\sigma W}{L}$

Como $X(y) = a$ cuando $V_R = V_P$

y como $X(y) = K_1 \sqrt{\psi_0 + V_R}$

entonces $\frac{K_1}{a} = \frac{1}{\sqrt{\psi_0 + V_P}}$

Análisis de la Operación del JFET (cont.)

$$i_{DS} = G_0 \left[V'_{DS} + \frac{2(\psi_0 + v_{GS} - V'_{DS})^{3/2} - (\psi_0 + v_{GS})^{3/2}}{(\psi_0 + V_P)^{1/2}} \right]$$

Para causar el estrangulamiento: $V_{GD} = V_P = V_{GS} - V'_{DS}$

$$V'_{DS} = -V_P + V_{GS}$$

$$i_{DS} = G_0 \left[-V_P + V_{GS} + \frac{2(\psi_0 + V_P)^{3/2} - (\psi_0 + v_{GS})^{3/2}}{(\psi_0 + V_P)^{1/2}} \right]$$

Como $I_{DSS} = I_{DS}$ cuando $v_{GS} = 0$

$$I_{DSS} = G_0 \left[-V_P + \frac{2(\psi_0 + V_P)^{3/2} - (\psi_0)^{3/2}}{(\psi_0 + V_P)^{1/2}} \right]$$

Análisis de la Operación del JFET (cont.)

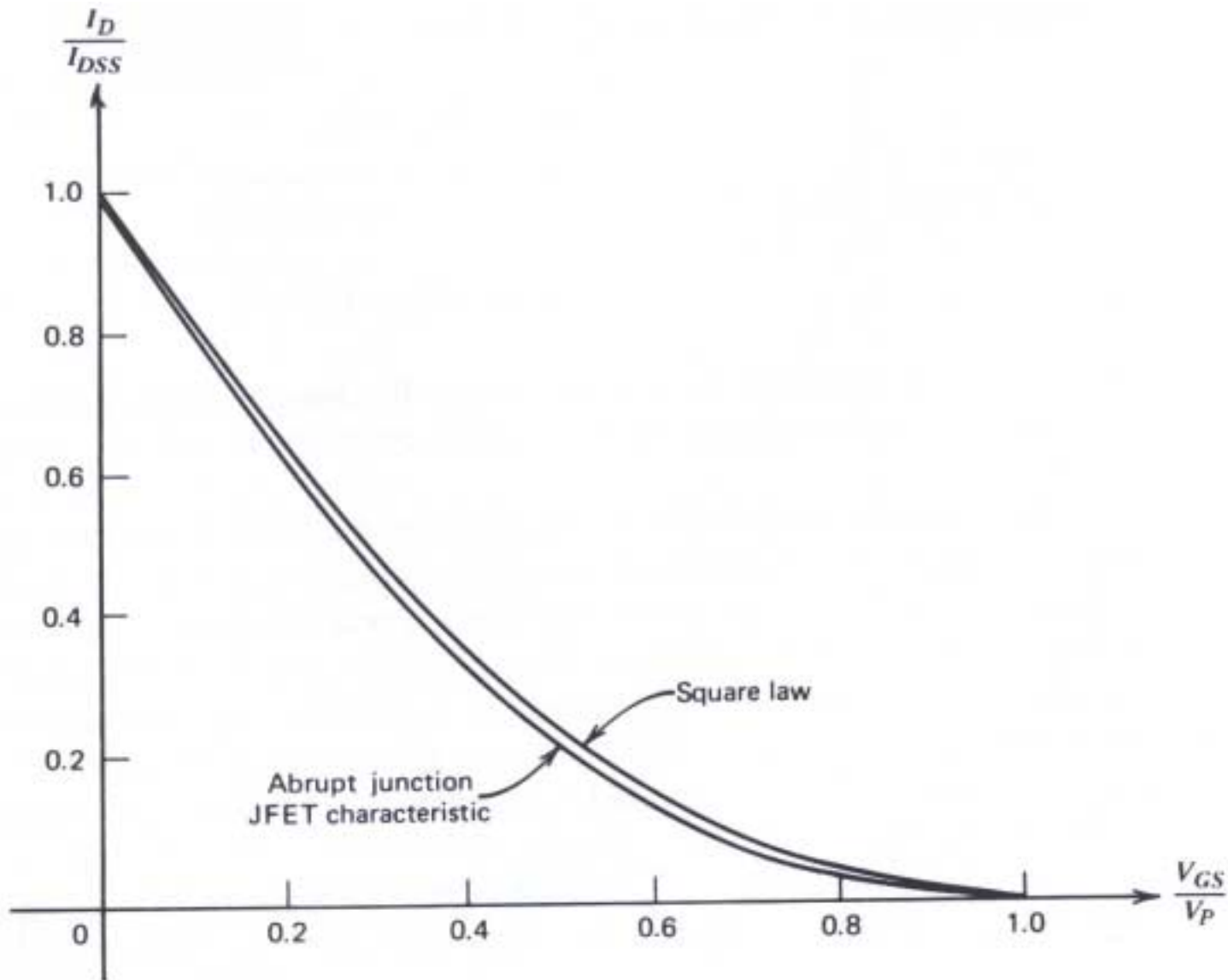
$$i_{DS} = G_0 \left[-V_P + V_{GS} + \frac{2(\psi_0 + V_P)^{3/2} - (\psi_0 + v_{GS})^{3/2}}{3(\psi_0 + V_P)^{1/2}} \right]$$

Puede aproximarse mediante

$$i_{DS} = I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_P} \right)^2 = K (v_{GS} - V_t)^2 \quad (\text{Ley Cuadrática})$$

$$K = \frac{I_{DSS}}{V_t^2} \quad V_{to} = V_P$$

Análisis de la Operación del JFET (cont.)

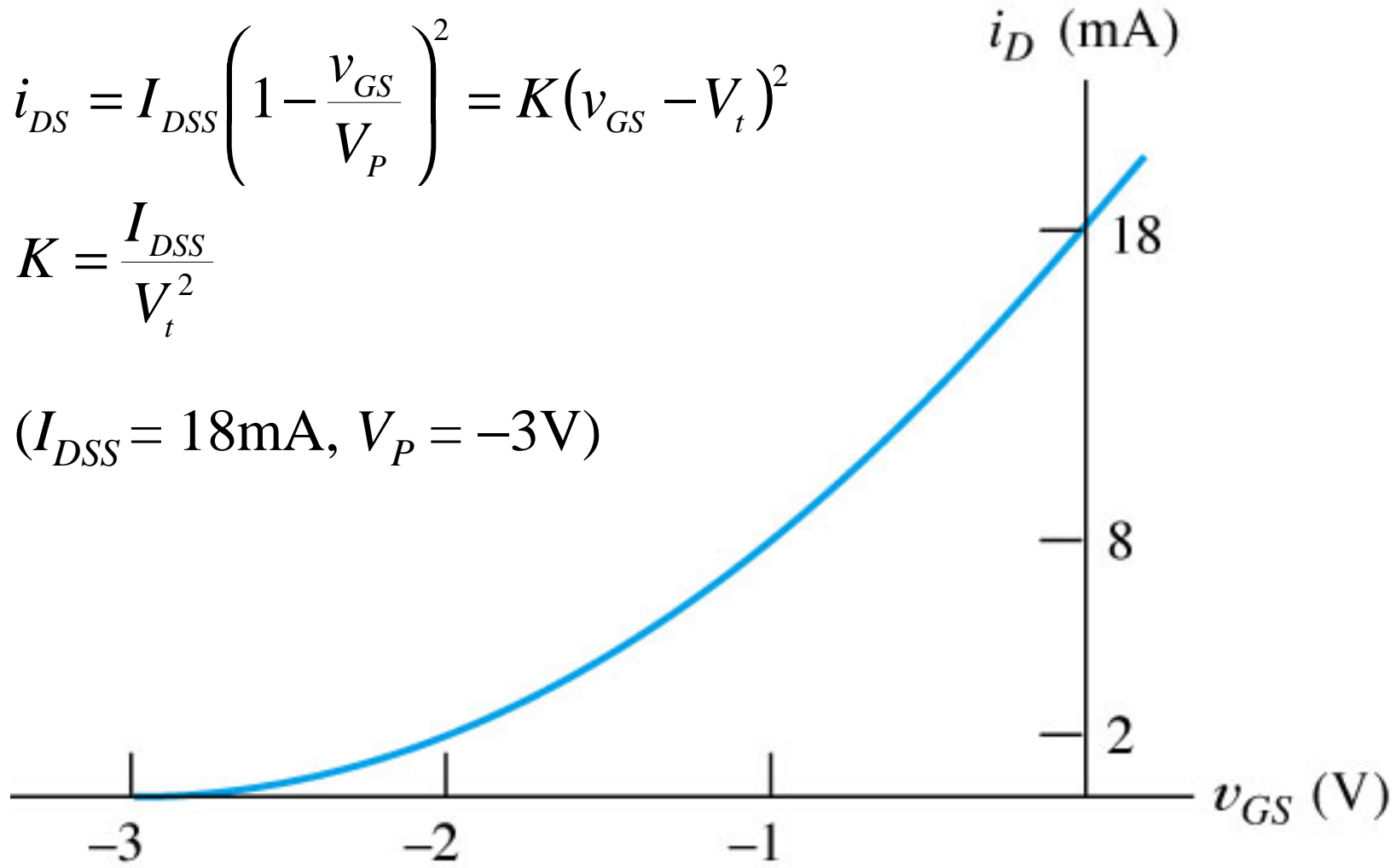


Curva de Transconductancia de un JFET Canal N

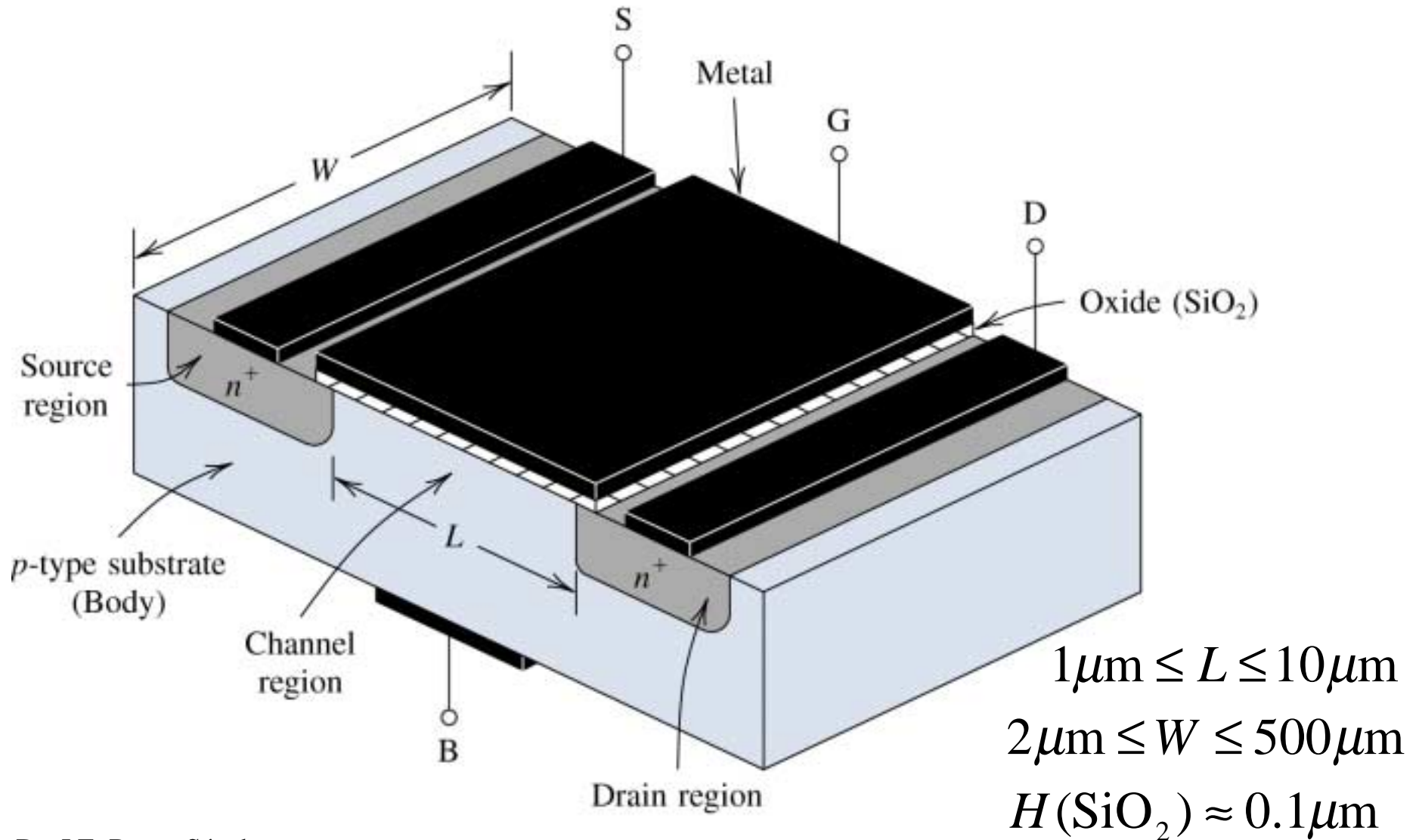
$$i_{DS} = I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_P} \right)^2 = K (v_{GS} - V_t)^2$$

$$K = \frac{I_{DSS}}{V_t^2}$$

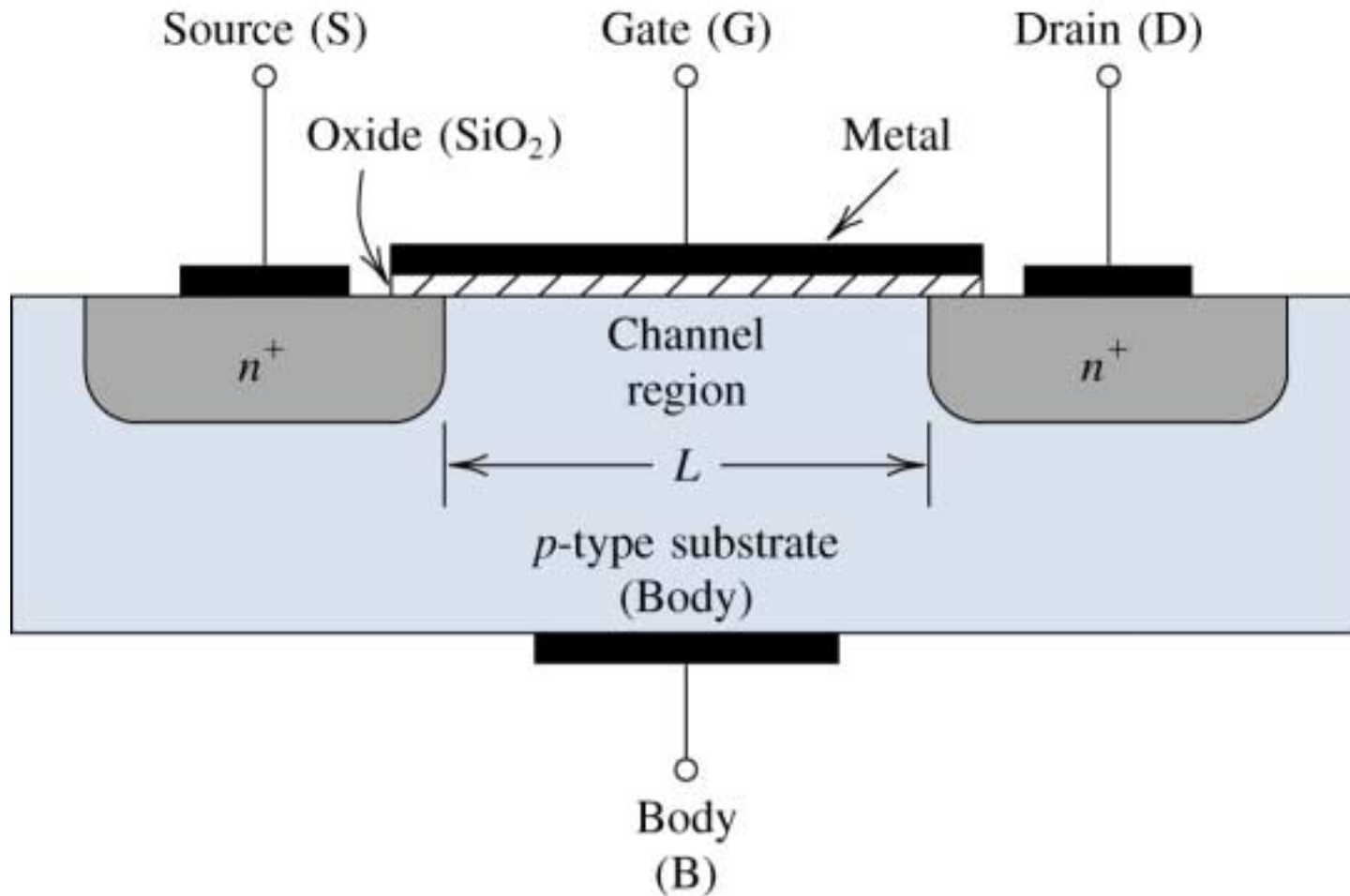
$$(I_{DSS} = 18\text{mA}, V_P = -3\text{V})$$



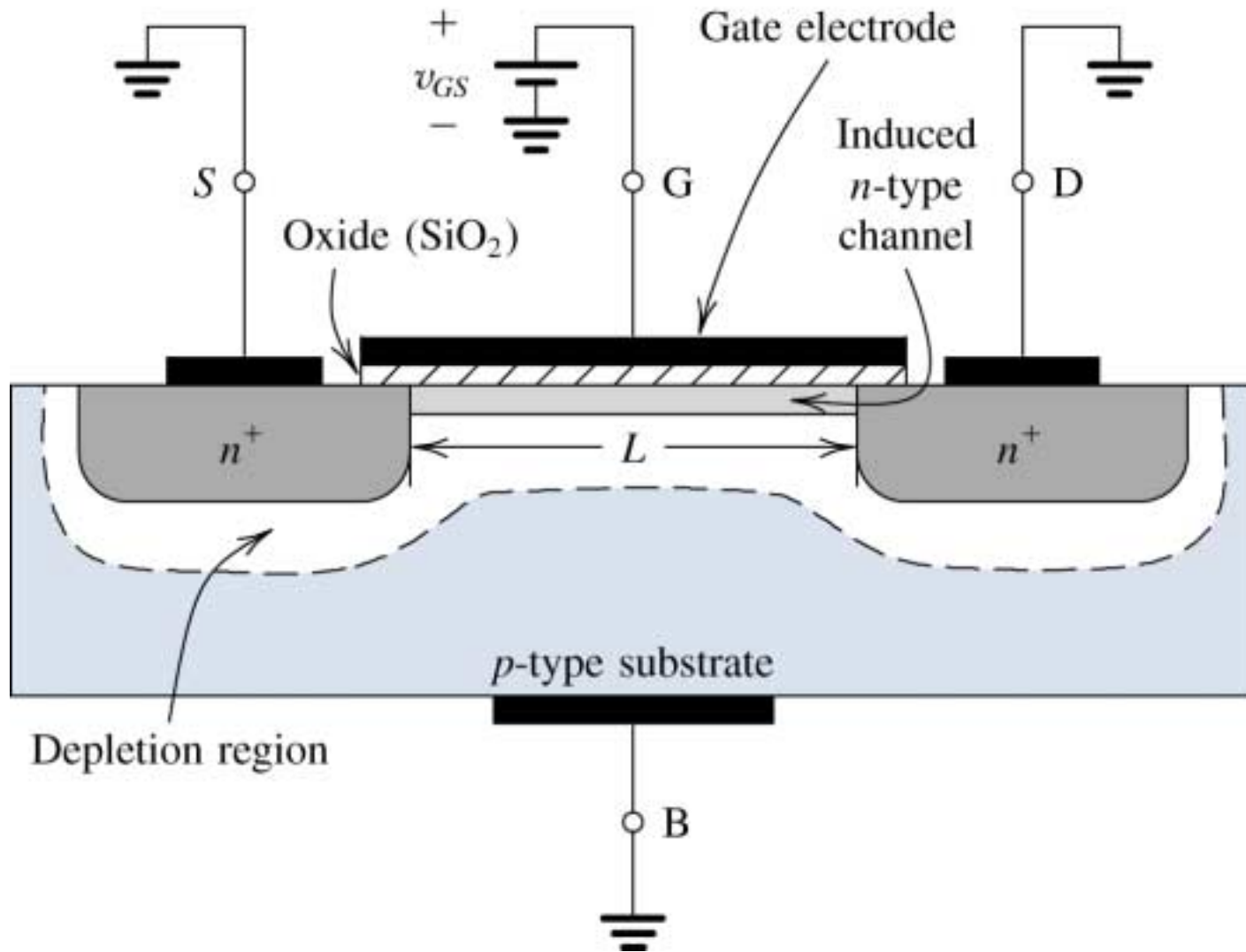
Estructura Física del E-MOSFET



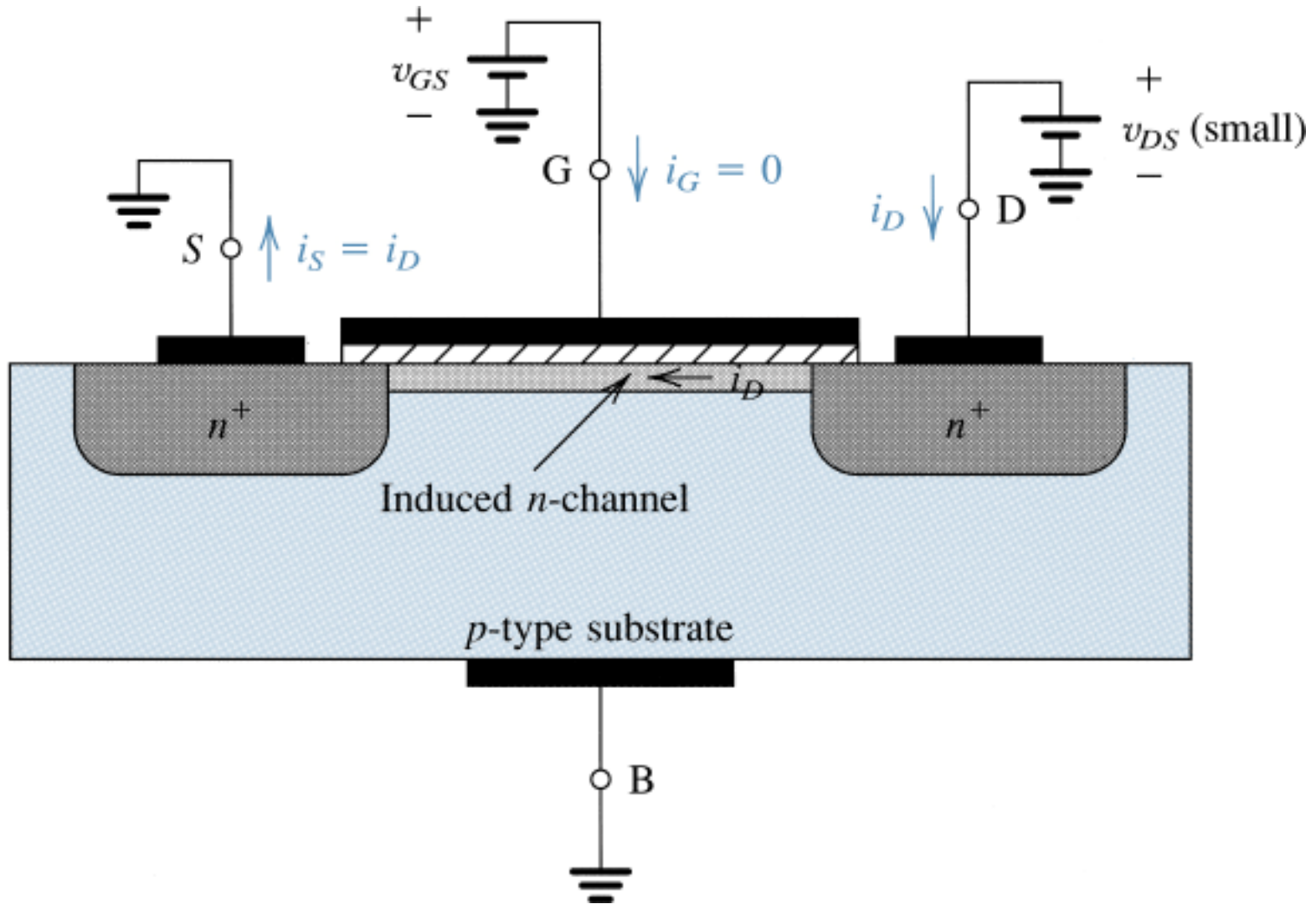
Estructura Física del E-MOSFET (cont.)



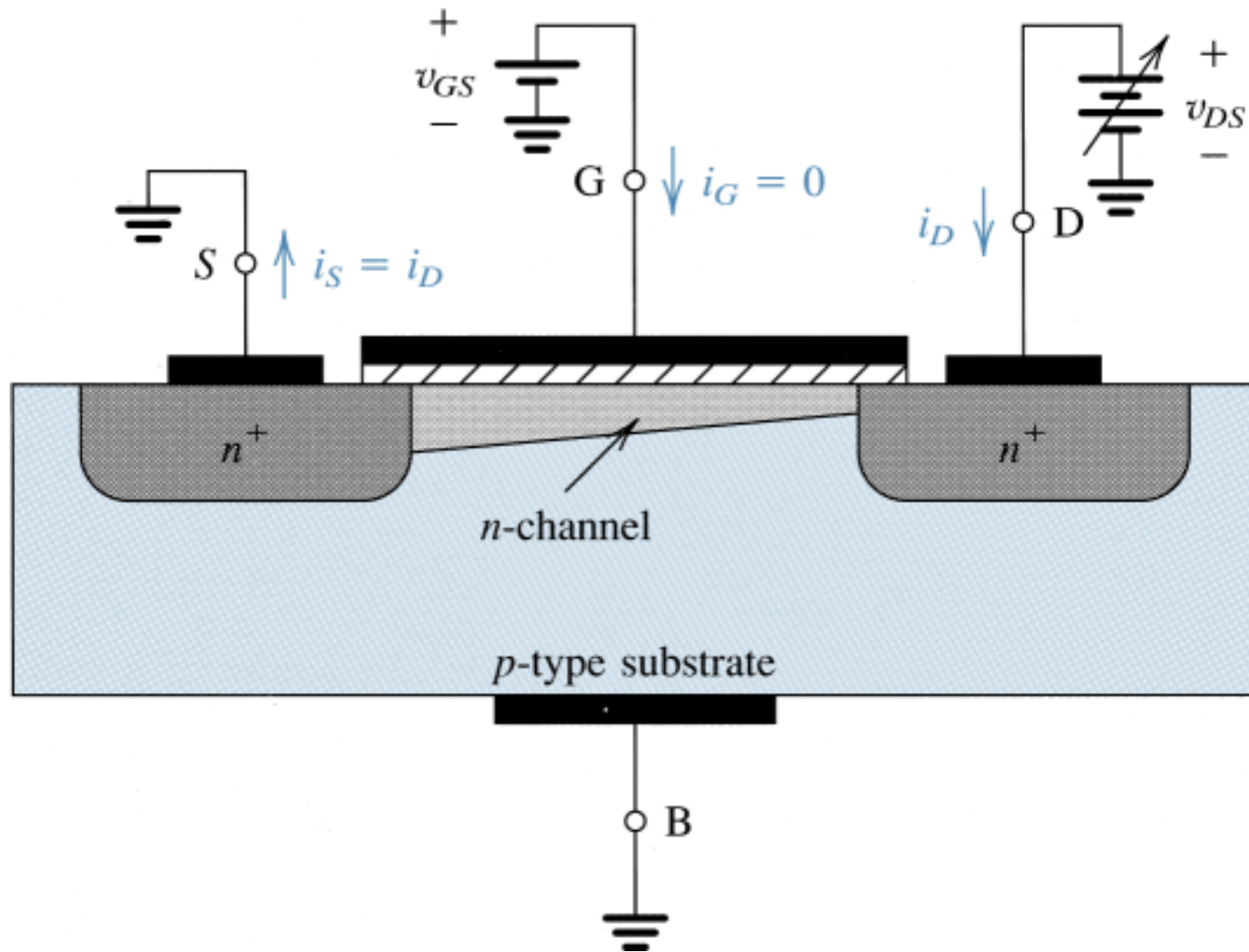
Operación del E-MOSFET ($v_{GS} > V_t$, $v_{DS} = 0$)



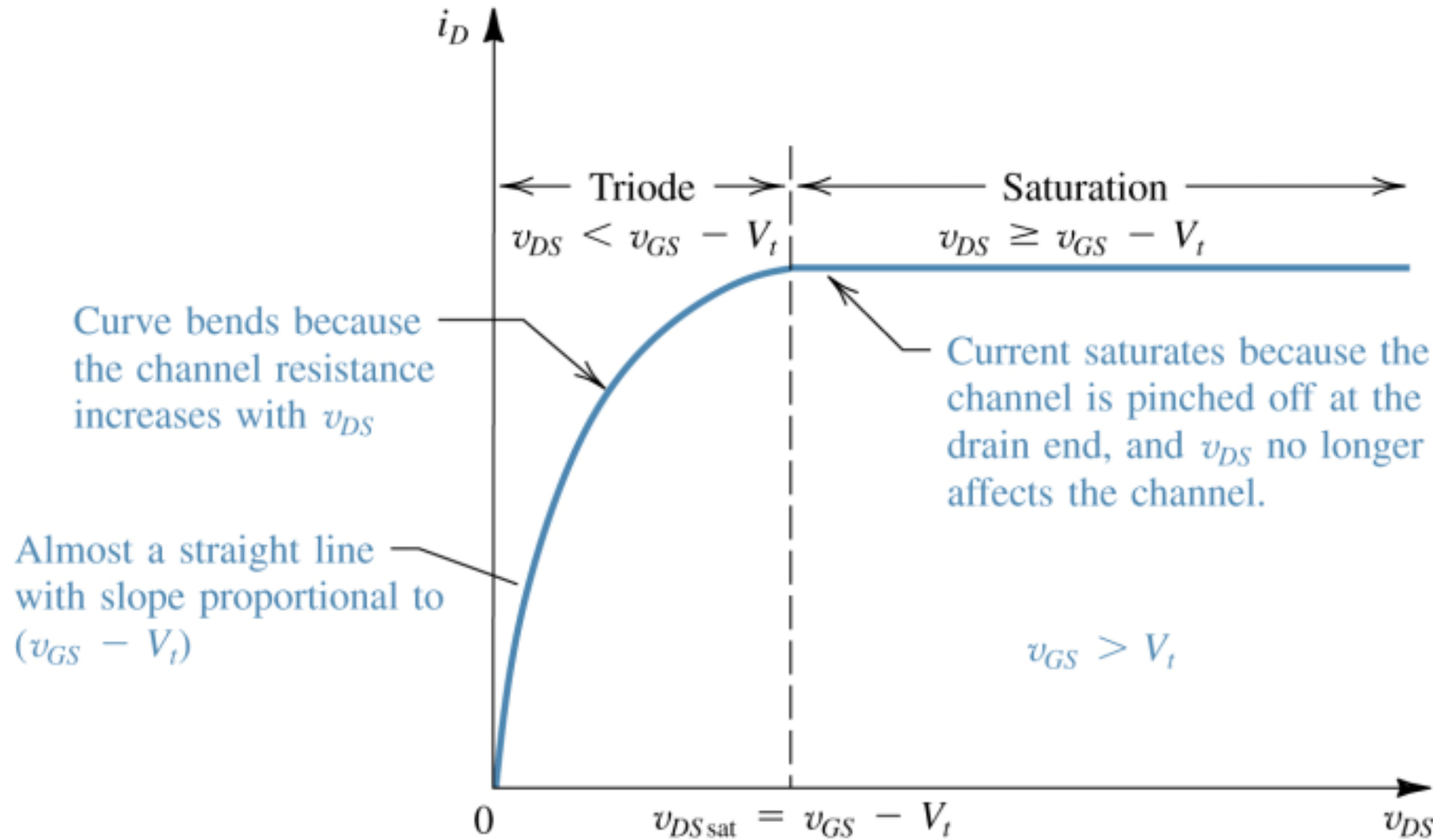
Op. del E-MOSFET ($v_{GS} > V_t$, v_{DS} pequeño)



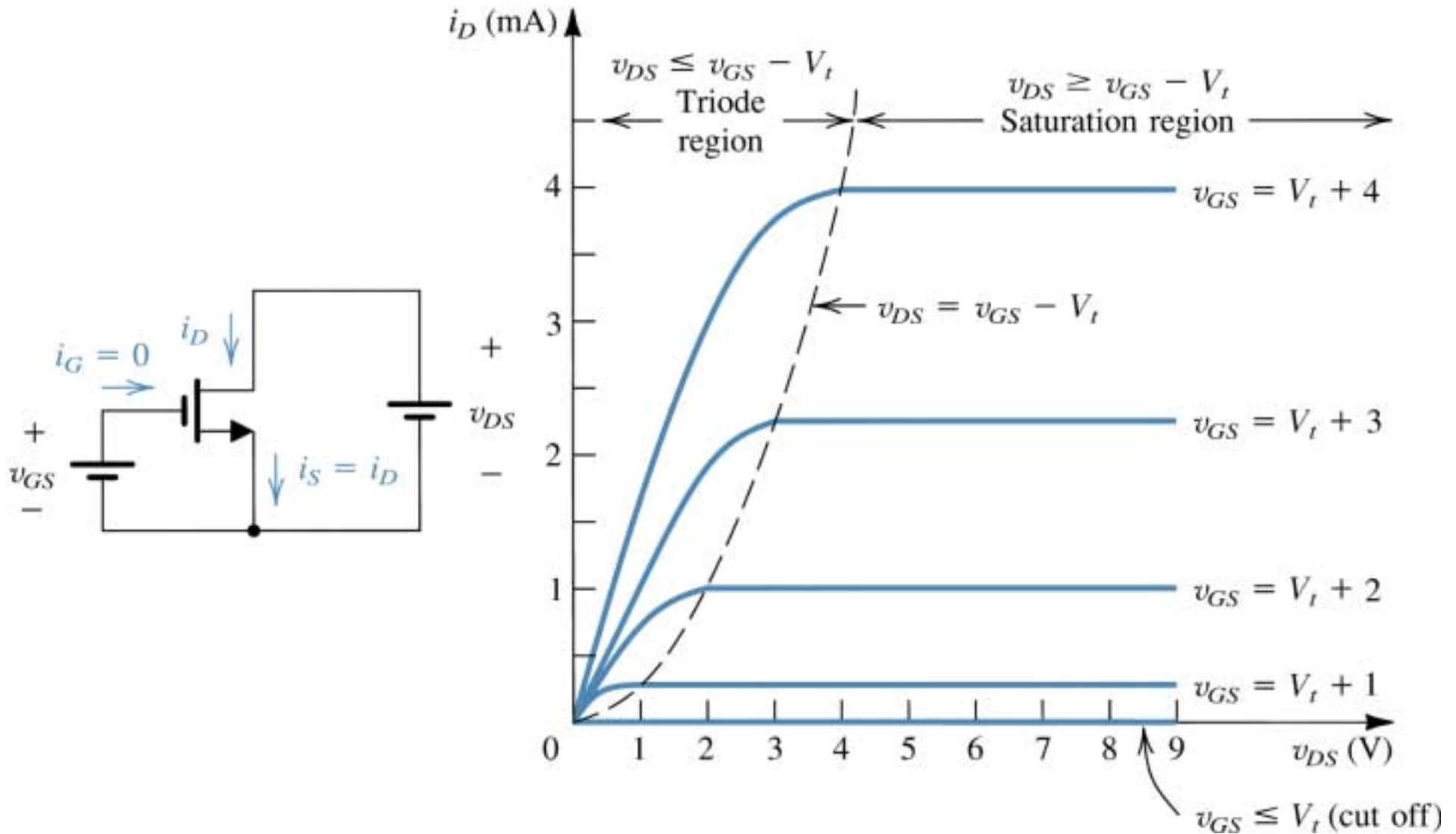
Op. del E-MOSFET ($v_{GS} > V_t$, v_{DS} grande)



Operación del E-MOSFET ($v_{GS} > V_t$)



Curvas Características del E-MOSFET



Ecuaciones del E-MOSFET

- En la región óhmica (triode region), $v_{DS} < v_{GS} - V_t$

$$i_{DS} = K[2(v_{GS} - V_t)v_{DS} - v_{DS}^2] \quad K = \frac{1}{2}\mu_n C_{OX} \left(\frac{W}{L}\right)$$

μ_n movilidad de los electrones

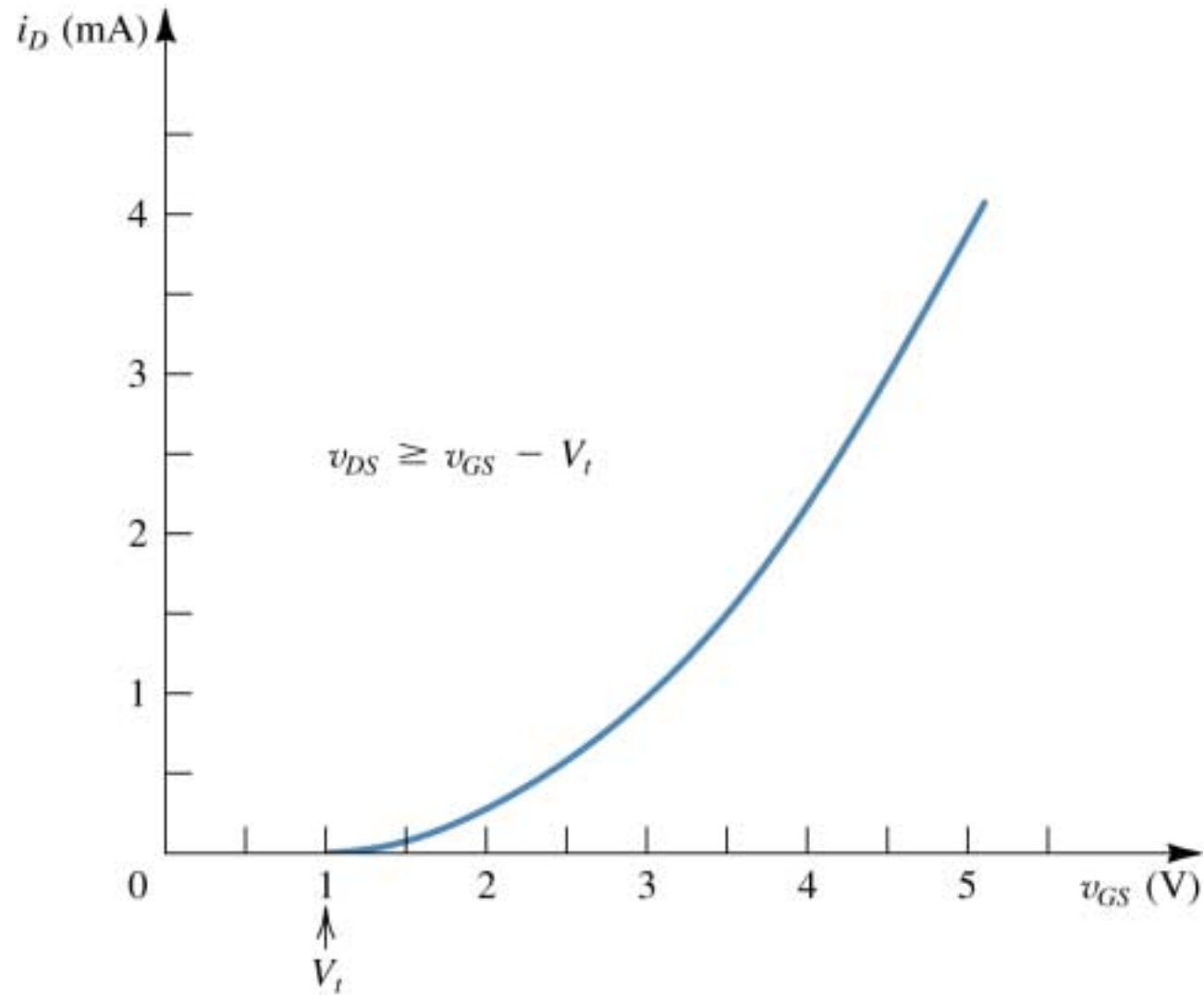
C_{OX} capacitancia parásita de G-B por unidad de área

$$r_{DS} = \frac{v_{DS}}{i_{DS}} \approx [2K(v_{GS} - V_t)]^{-1} \quad \text{para } v_{DS} \text{ pequeño}$$

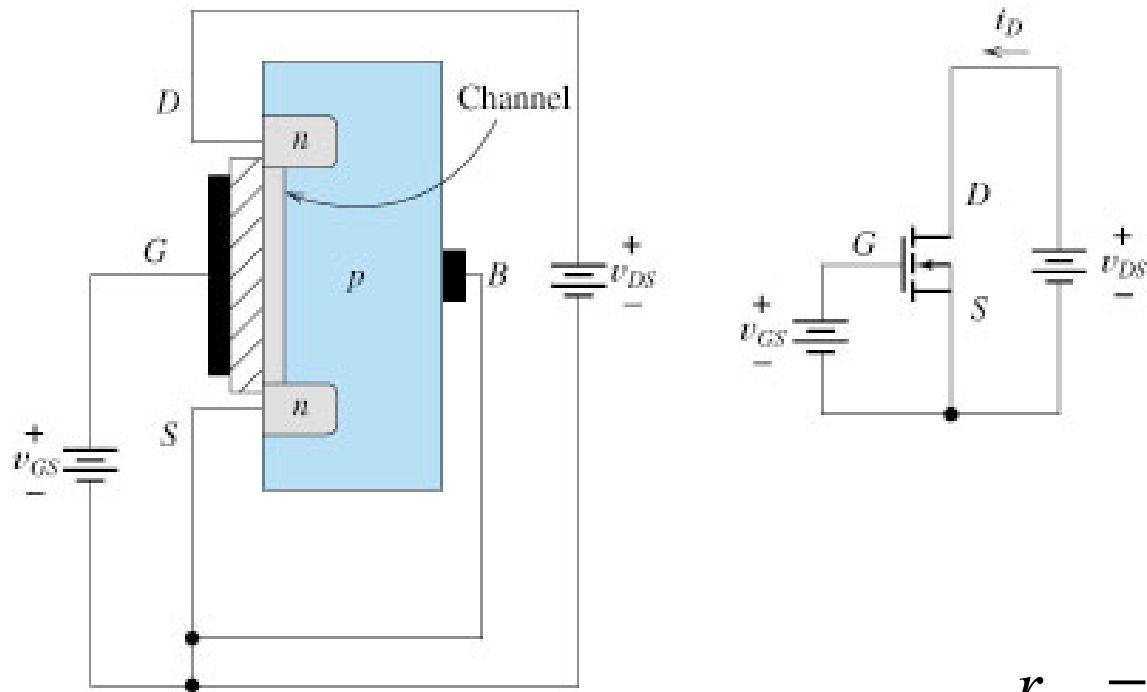
- En la región de saturación, $v_{DS} \geq v_{GS} - V_t$

$$i_{DS} = K(v_{GS} - V_t)^2$$

Curva de Transconductancia del E-MOSFET

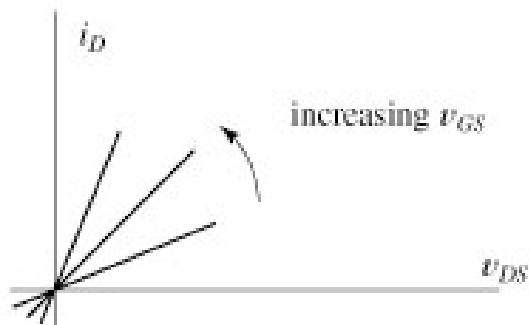


Región Óhmica del E-MOSFET

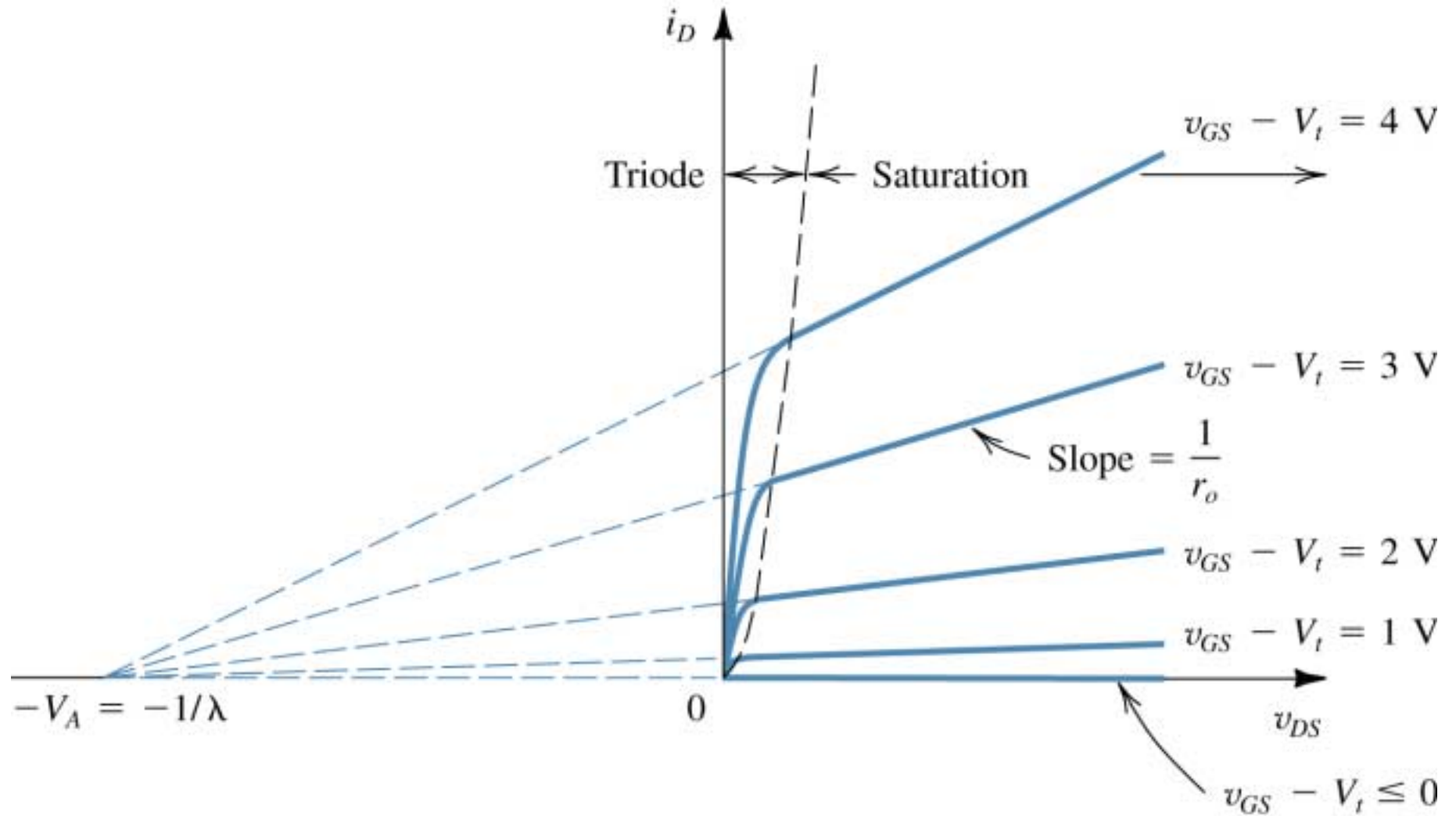


$$r_{DS} = \frac{v_{DS}}{i_{DS}} \approx [2K(v_{GS} - V_t)]^{-1}$$

para v_{DS} pequeño

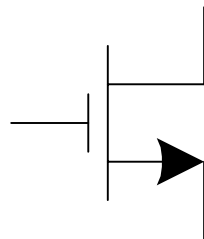


Modulación de la Longitud del Canal

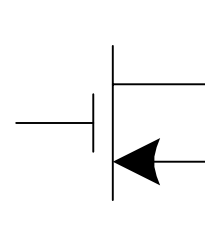


Símbolos de FETs

- E-MOSFET



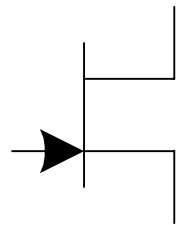
canal *n*



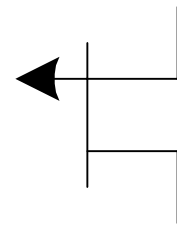
canal *p*

$$K = \frac{1}{2} \mu_n C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right)$$

- JFET



canal *n*

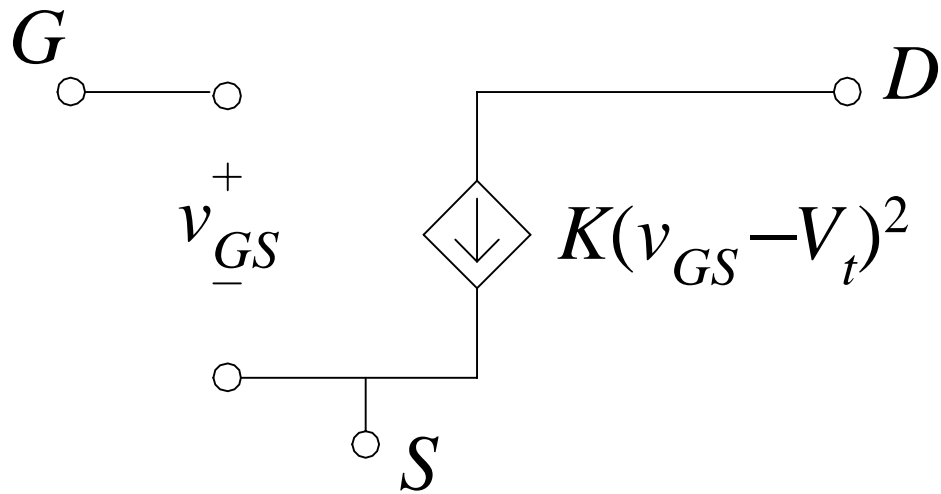


canal *p*

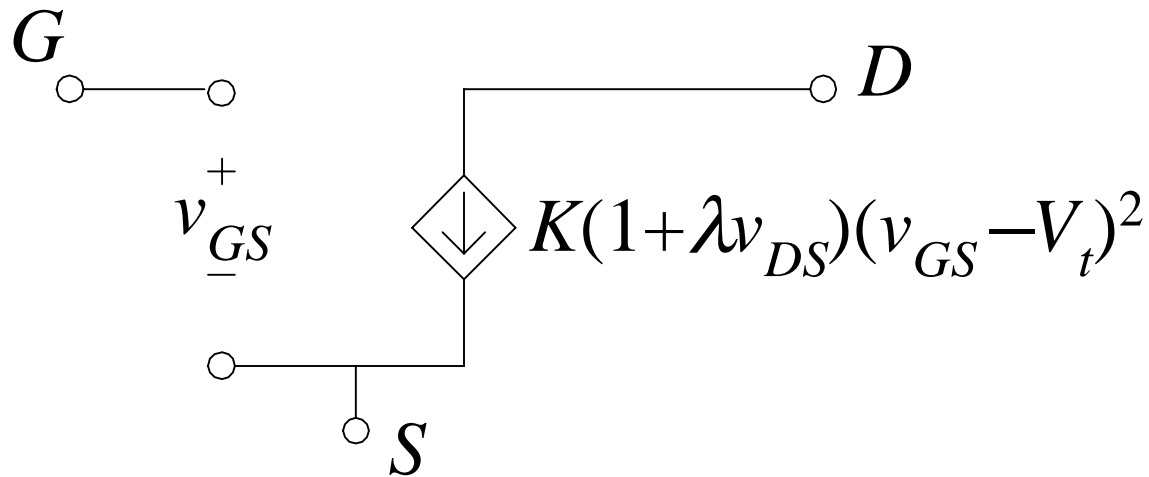
$$K = I_{DSS} / V_P^2$$

$$V_t = V_P$$

Modelo del FET para Señal Grande

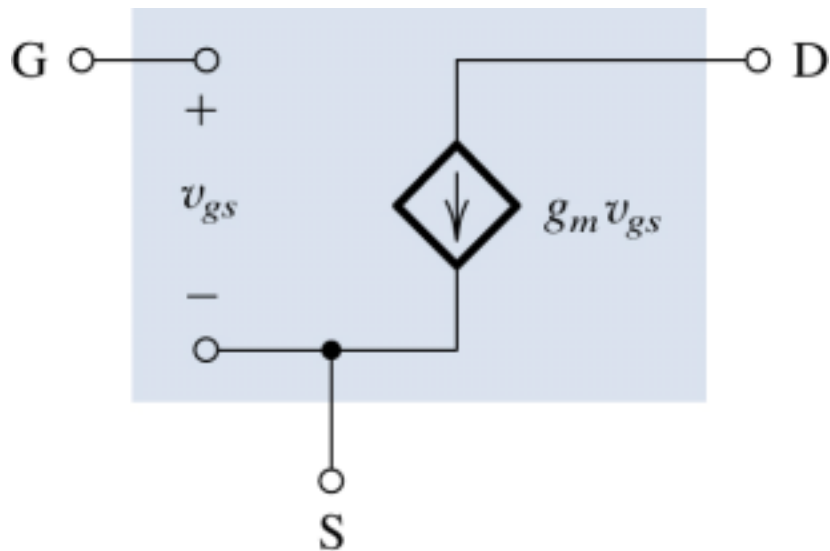


Modelo del FET para Señal Grande (cont.)



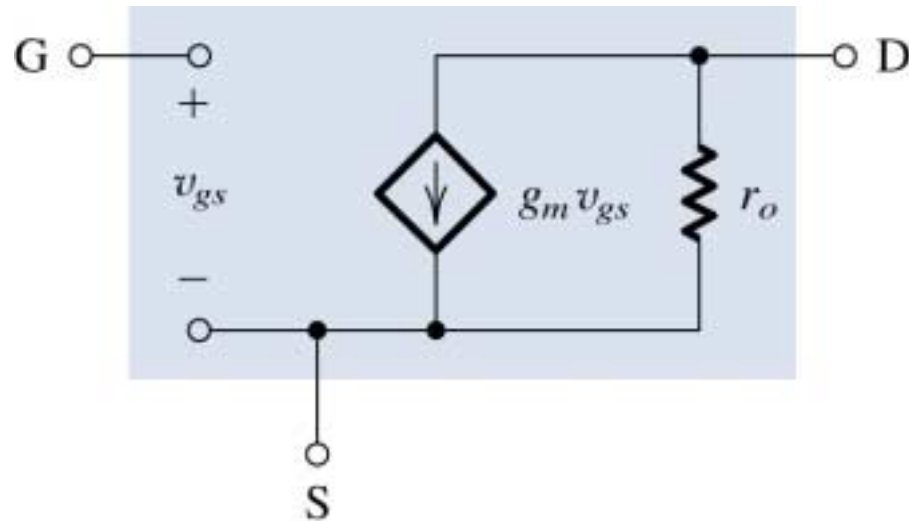
λ : factor de modulación de la longitud del canal

Modelo del FET para Señal Pequeña



$$g_m = 2K(V_{GS} - V_t)$$

Modelo del FET para Señal Pequeña (cont.)



$$g_m = 2K(V_{GS} - V_t)$$

$$r_o = \frac{|V_A|}{I_{DS}}$$

$$V_A = 1/\lambda$$

λ : factor de modulación de la longitud del canal

tip. $10\text{K}\Omega \leq r_o \leq 1\text{M}\Omega$