

Transistores de Efecto de Campo

Rev. 1.1

Curso Electrónica Fundamental

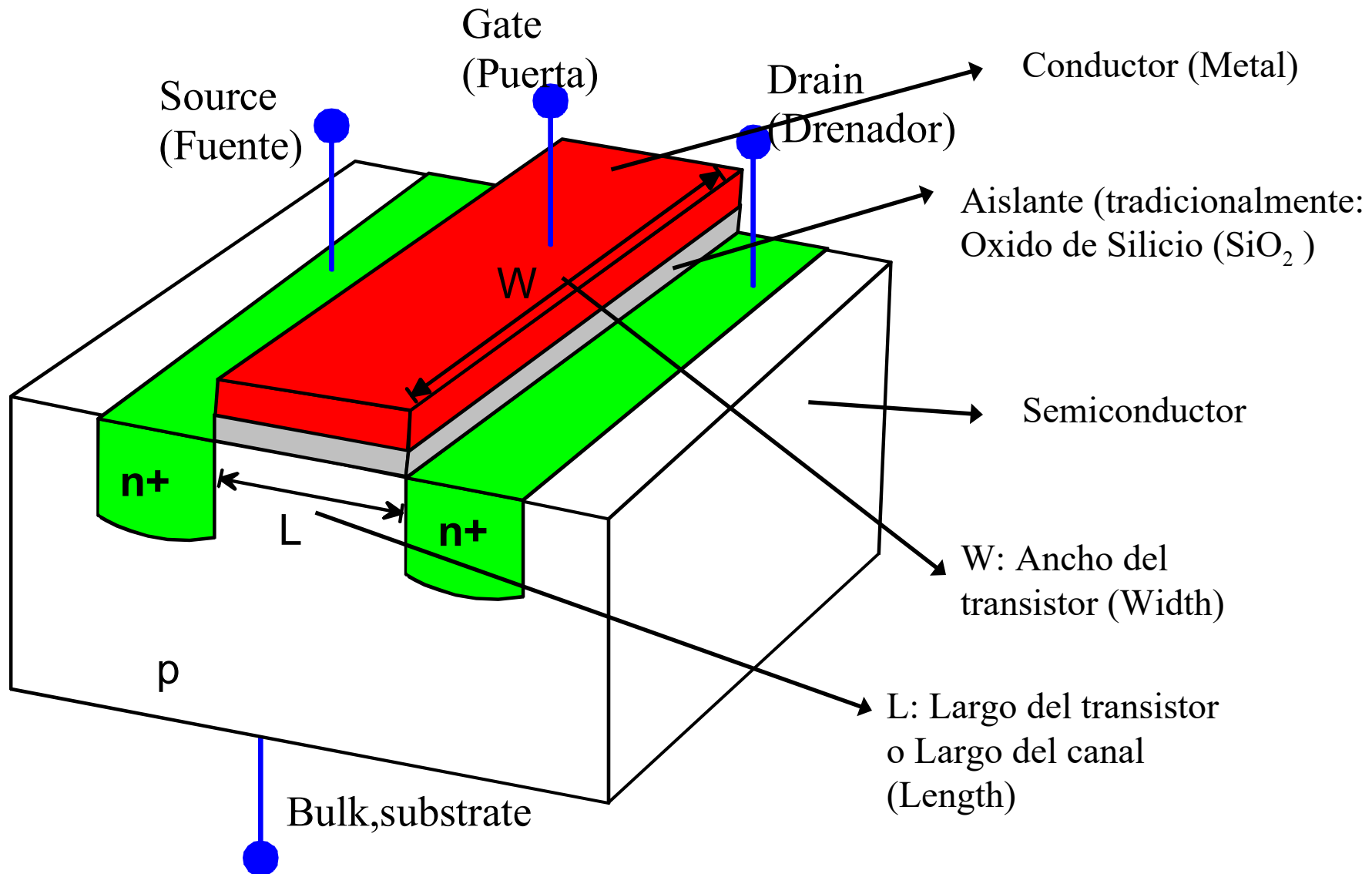
Fernando Silveira

Instituto de Ingeniería Eléctrica

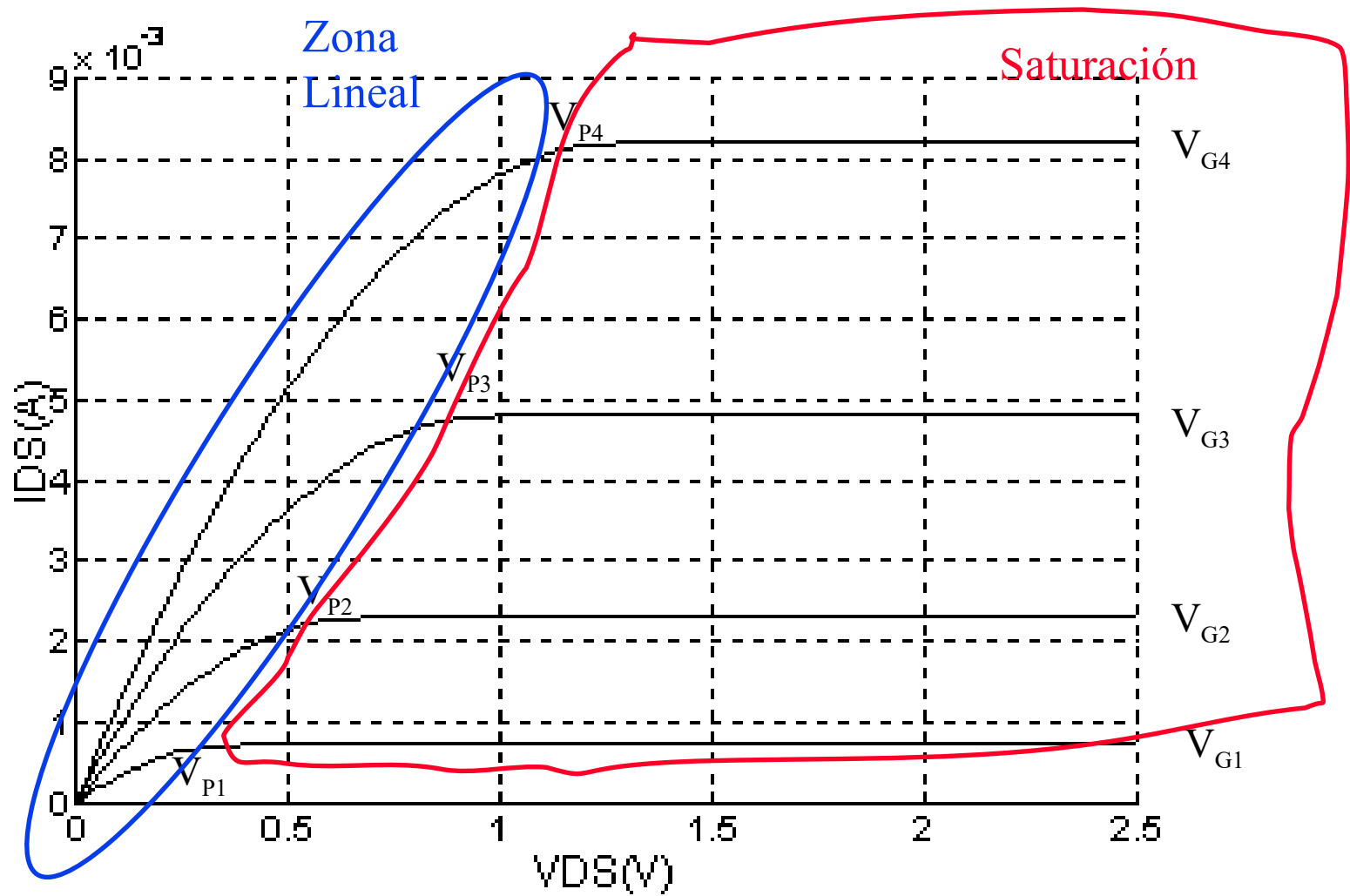
Field Effect Transistors (FETs)

- ◆ MOSFET: Metal-Oxide-Semiconductor FET
 - Enriquecimiento
 - Empobrecimiento
- ◆ JFET: Junction FET
- ◆ MOSFET:
 - Idea, principio: 1928
 - Implementación práctica: 1959
 - Circuitos Integrados MOS (CMOS) actualmente más del 90% del total de circuitos integrados.
 - Permitieron circuitos con “Very Large Scale of Integration” (VLSI)
 - Scaling
 - Más de mil millones de transistores en un chip

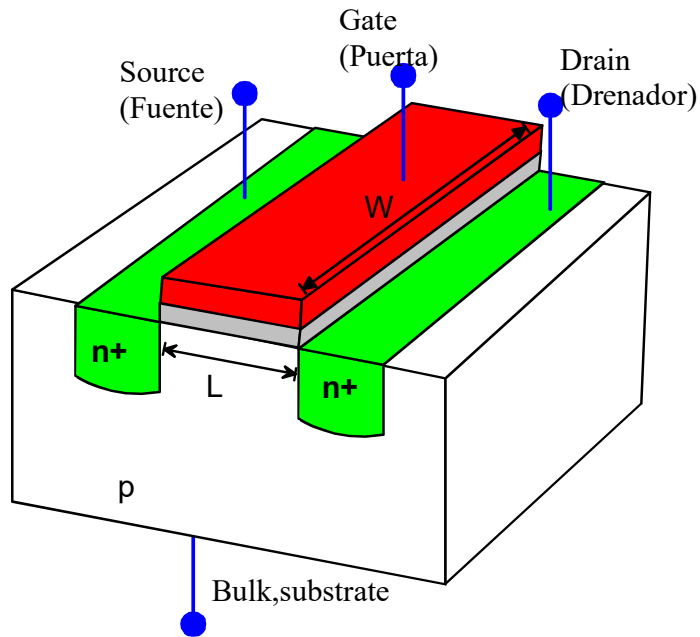
nMOS de Enriquecimiento (1)



El fin de la historia:



Tecnología MOS actual



- ◆ L a partir de 28 nm (22 nm 16nm, ...),
W a partir de valores levemente mayores.
- ◆ t_{ox} : Espesor del óxido algunos nm
 - 1nm = 10 Å = unas pocas capas atómicas \Rightarrow Límite por corriente de túnel en el óxido.
- ◆ Más de mil millones de transistores en un chip
- ◆ Número de transistores por chip se duplica cada aprox. 2 años (Ley de Moore)
- ◆ Capacidades \downarrow , $f \uparrow$, Tensión de alimentación \downarrow (últimas tecnos: 0.9V a 1V)

¿Cuánto es 1 nm ?

THE RELATIVE SIZE OF PARTICLES

From the COVID-19 pandemic to the U.S. West Coast wildfires, some of the biggest threats now are also the most microscopic.

A particle needs to be 10 microns (μm) or less before it can be inhaled into your respiratory tract. But just how small are these specks?

Here's a look at the relative sizes of some familiar particles >

HUMAN HAIR 50-180 μm >
FOR SCALE

FINE BEACH SAND 90 μm >

GRAIN OF SALT 60 μm >

WHITE BLOOD CELL 25 μm >

GRAIN OF POLLEN 15 μm >

DUST PARTICLE (PM₁₀) <10 μm >

RED BLOOD CELL 7-8 μm >

RESPIRATORY DROPLETS 5-10 μm >

DUST PARTICLE (PM_{2.5}) 2.5 μm >

BACTERIUM 1-3 μm >

WILDFIRE SMOKE 0.4-0.7 μm >

CORONAVIRUS 0.1-0.5 μm >

T4 BACTERIOPHAGE 0.225 μm >

ZIKA VIRUS 0.045 μm >



Pollen can trigger allergic reactions and hay fever—which 1 in 5 Americans experience every year.

Source: Harvard Health

The visibility limits for what the naked eye can see hovers around 10-40 μm .



Respiratory droplets have the potential to carry smaller particles within them, such as dust or coronavirus.



Wildfire smoke can persist in the air for several days, and even months.

SOURCES Clearstream, Daniel Lovetbey, EPA, Financial Times, News Medical, Science Direct, SCMP, Susan Sokolowski, Petroclear, U.S. Dept. of Energy

COLLABORATORS RESEARCH + WRITING Carmen Ang, Inan Ghosn | DESIGN + ART DIRECTION Harrison Schell



/visualcapitalist



@visualcap



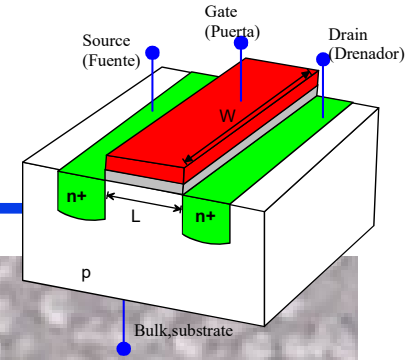
visualcapitalist.com

Para poder fabricar dispositivos de um y nm



Fuentes: Intel, ESA / ST, IEEE Spectrum

Transistor MOS: la realidad

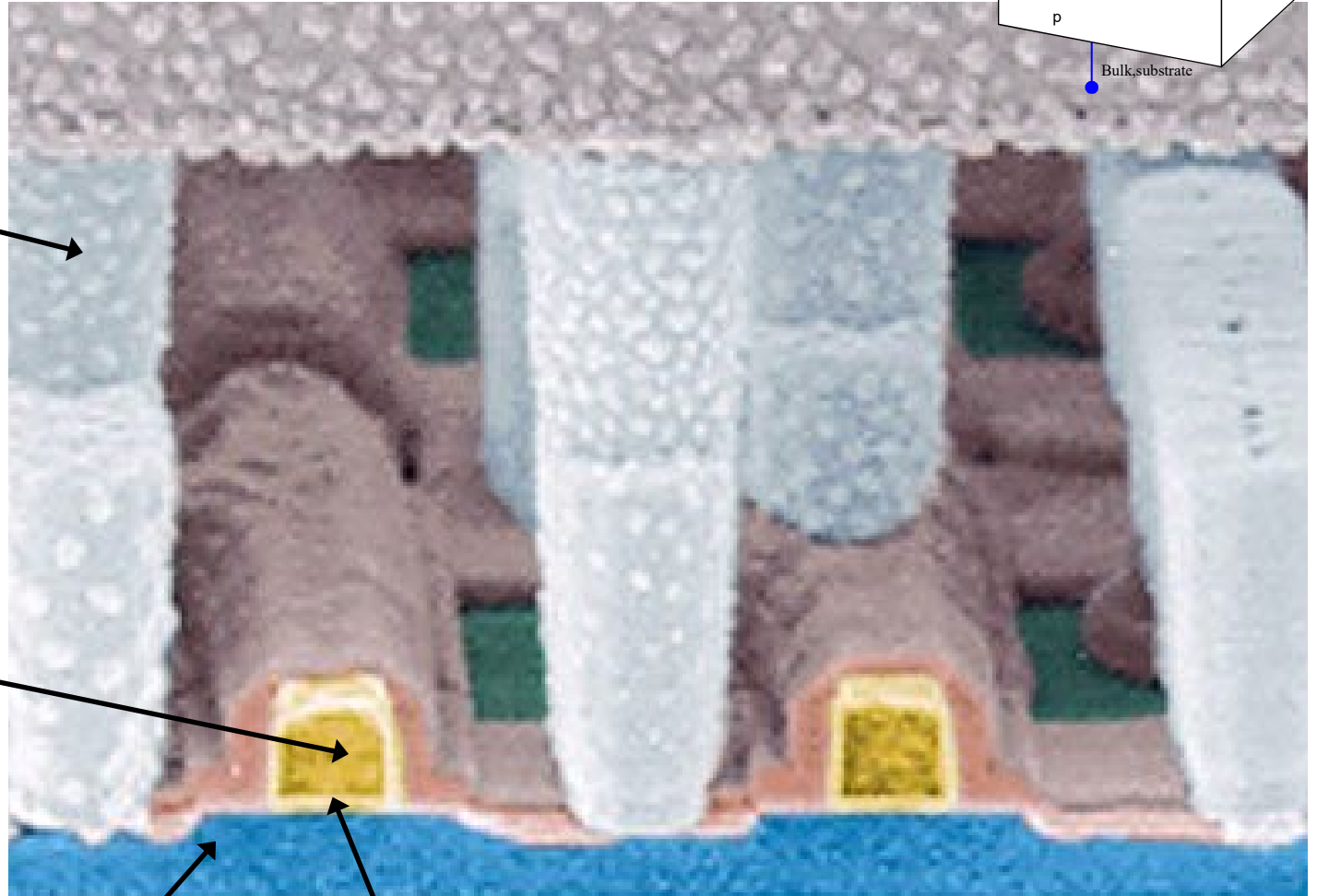


Conexiones

Gate

Sustrato

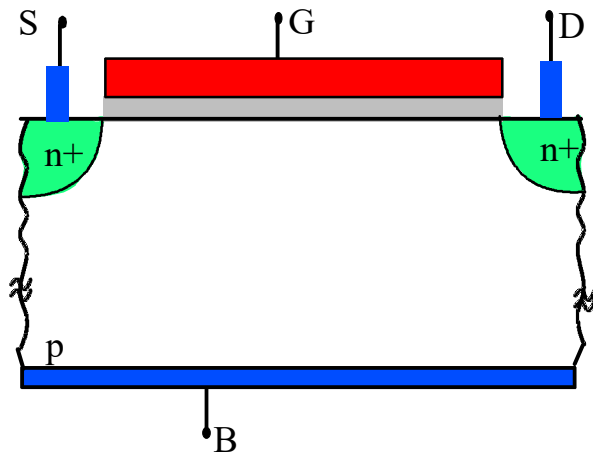
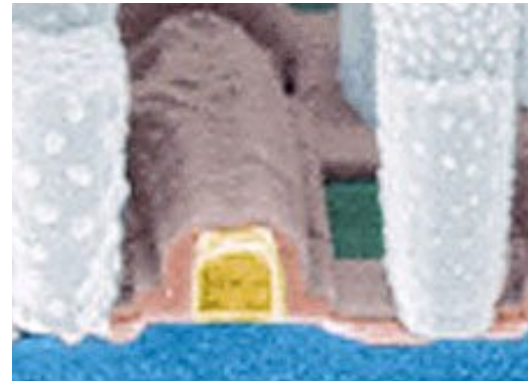
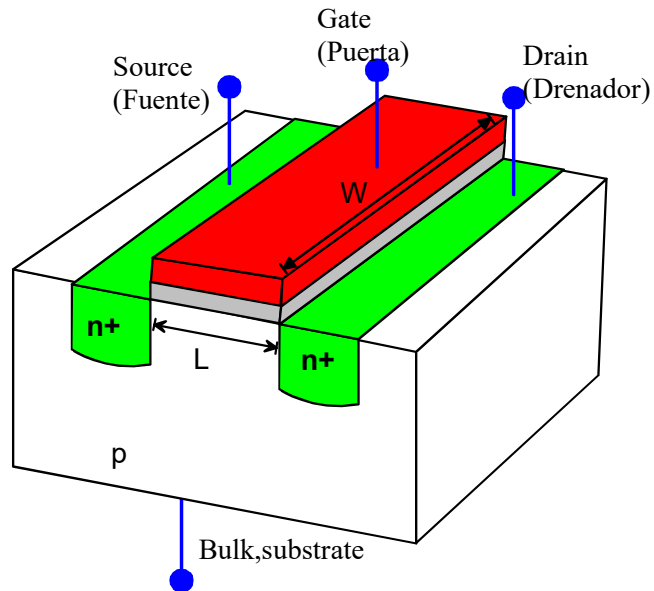
Oxido



Fuente: IBM

Transistor MOS:

Dispositivo Simétrico, 4 terminales

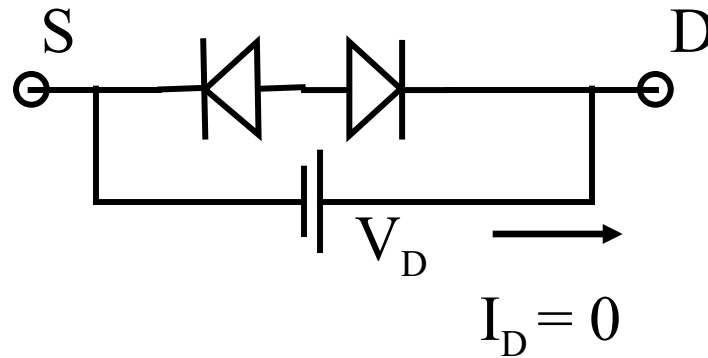
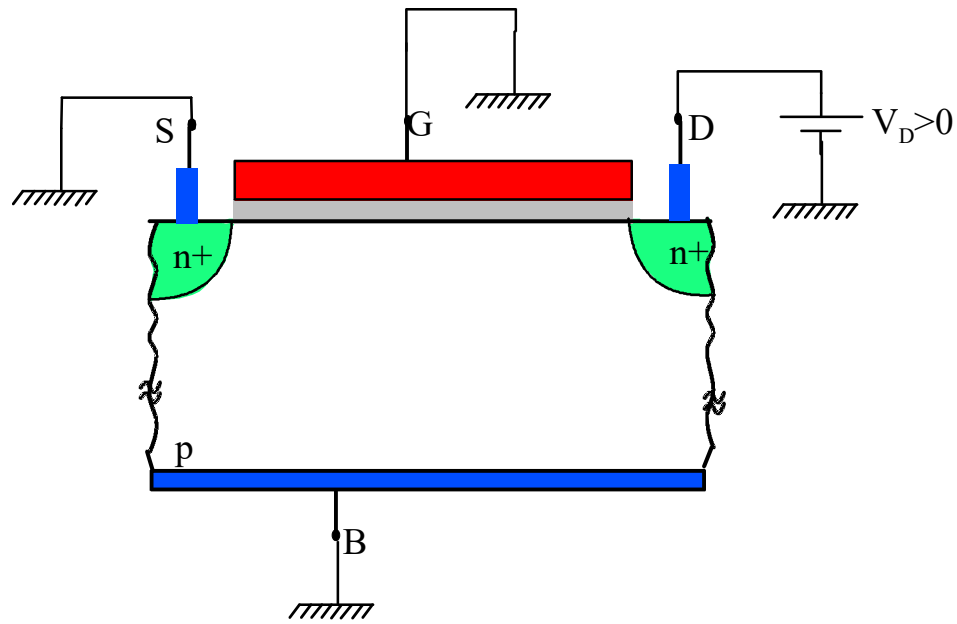


Source: Terminal del que parten los portadores.

Drain: Terminal al que llegan los portadores

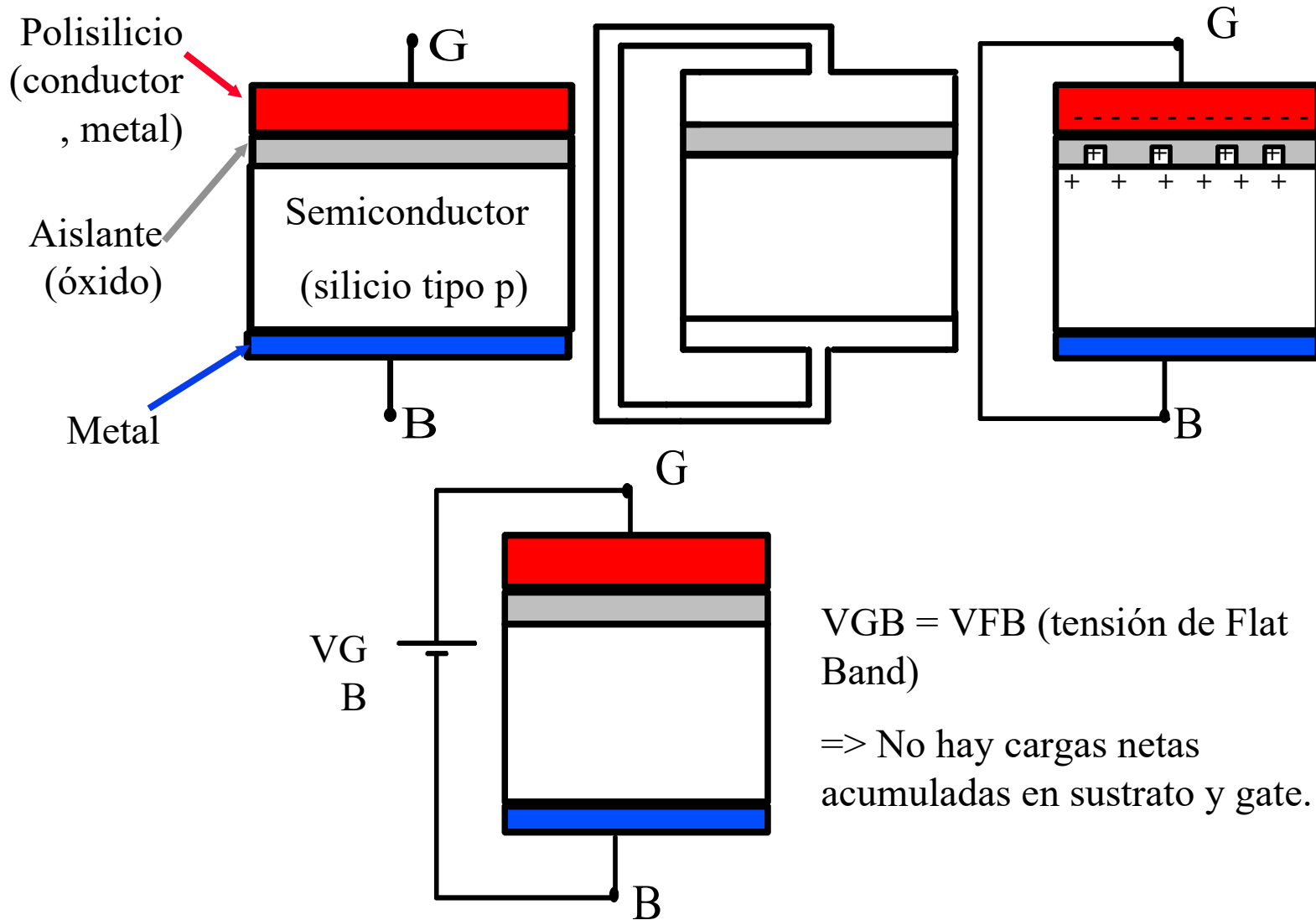
nMOS \Rightarrow portadores: $e^- \Rightarrow$ portadores de S a D y corriente de D a S

Transistor nMOS: Zona de Corte

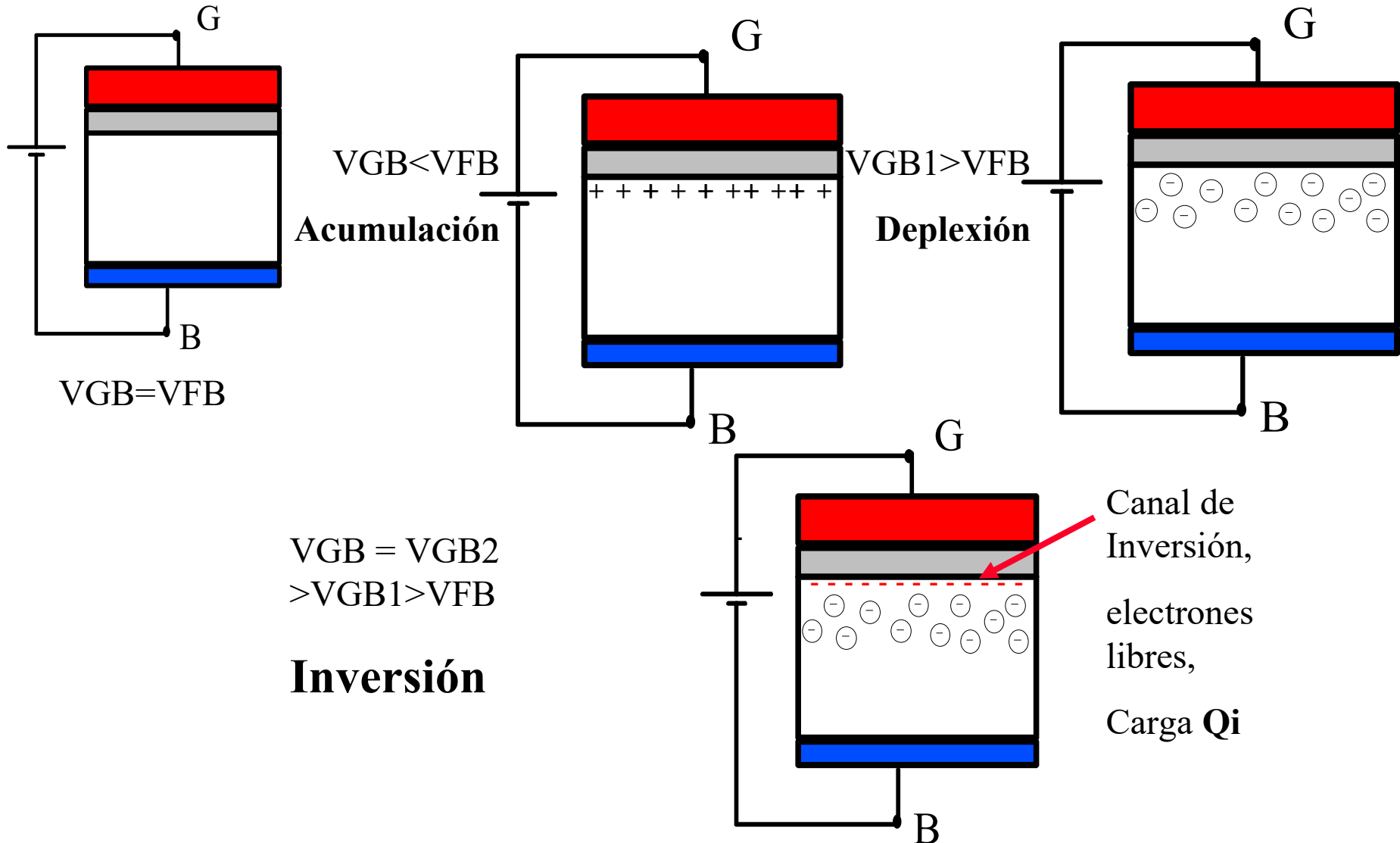


Transistor cortado

Estructura MOS de Dos Terminales: Tensión de Banda Plana (“Flat Band”)

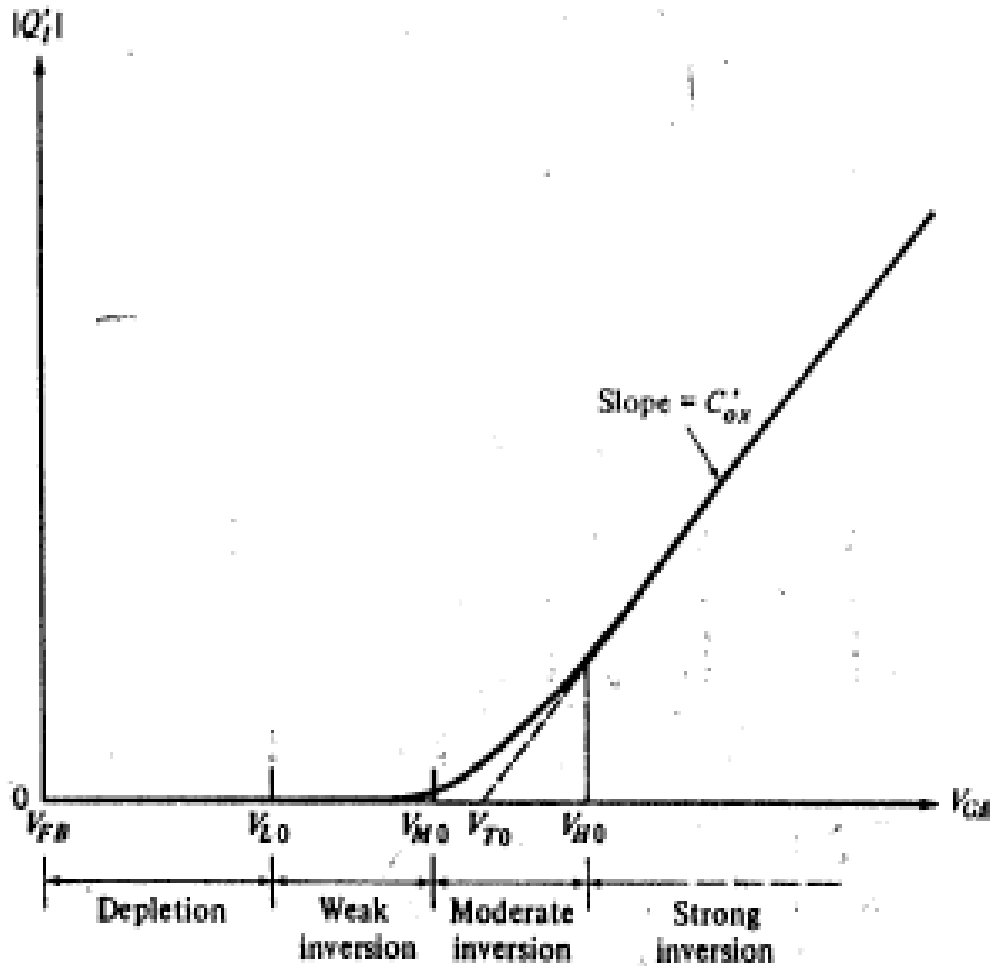


Estructura MOS de Dos Terminales: Acumulación, Deplexión, Inversión



Estructura MOS de Dos Terminales:

Carga de Inversión Q_i



Aproximación usual
(inversión fuerte):

$$Q'_i = C'_{ox} \cdot (V_{GB} - V_{T0})$$

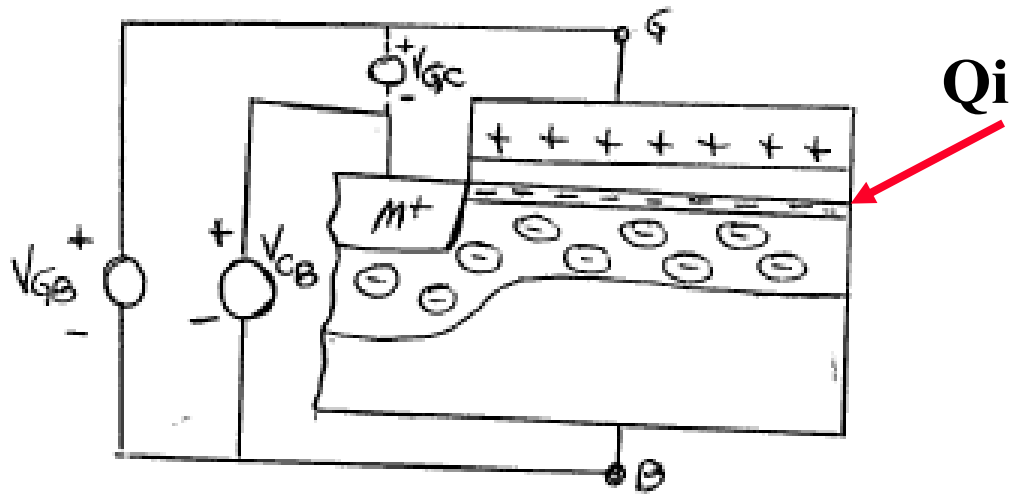
$Q'_i = Q_i / (W \cdot L)$ carga de inversión por unidad de área

$C'_{ox} = \epsilon_{ox} / t_{ox}$ capacidad de gate por unidad de área

V_{T0} : Tensión umbral

Fuente: Tsividis

Estructura MOS de Tres Terminales: Efecto de sustrato (efecto “body”).



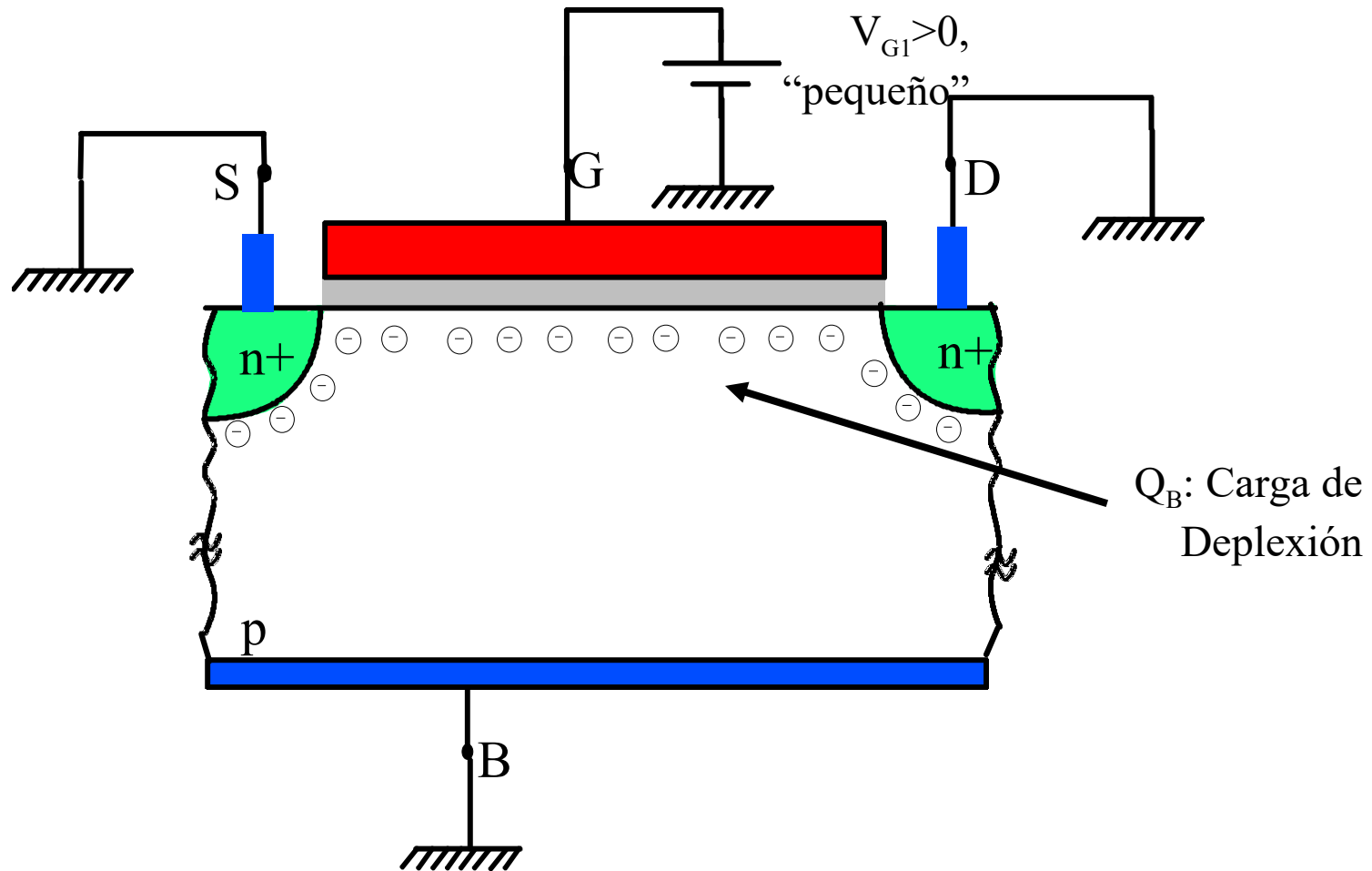
- Si se aumenta V_{CB} manteniendo V_{GC} constante $\Rightarrow Q_i$ disminuye.

- Para tener el mismo Q_i , V_{GB} y V_{GC} tienen que aumentar en mayor proporción que V_{CB}

$$Q'_i \cong C'_{ox} \cdot (V_{GB} - V_{T0} - (1 + \delta) \cdot V_{CB}),$$

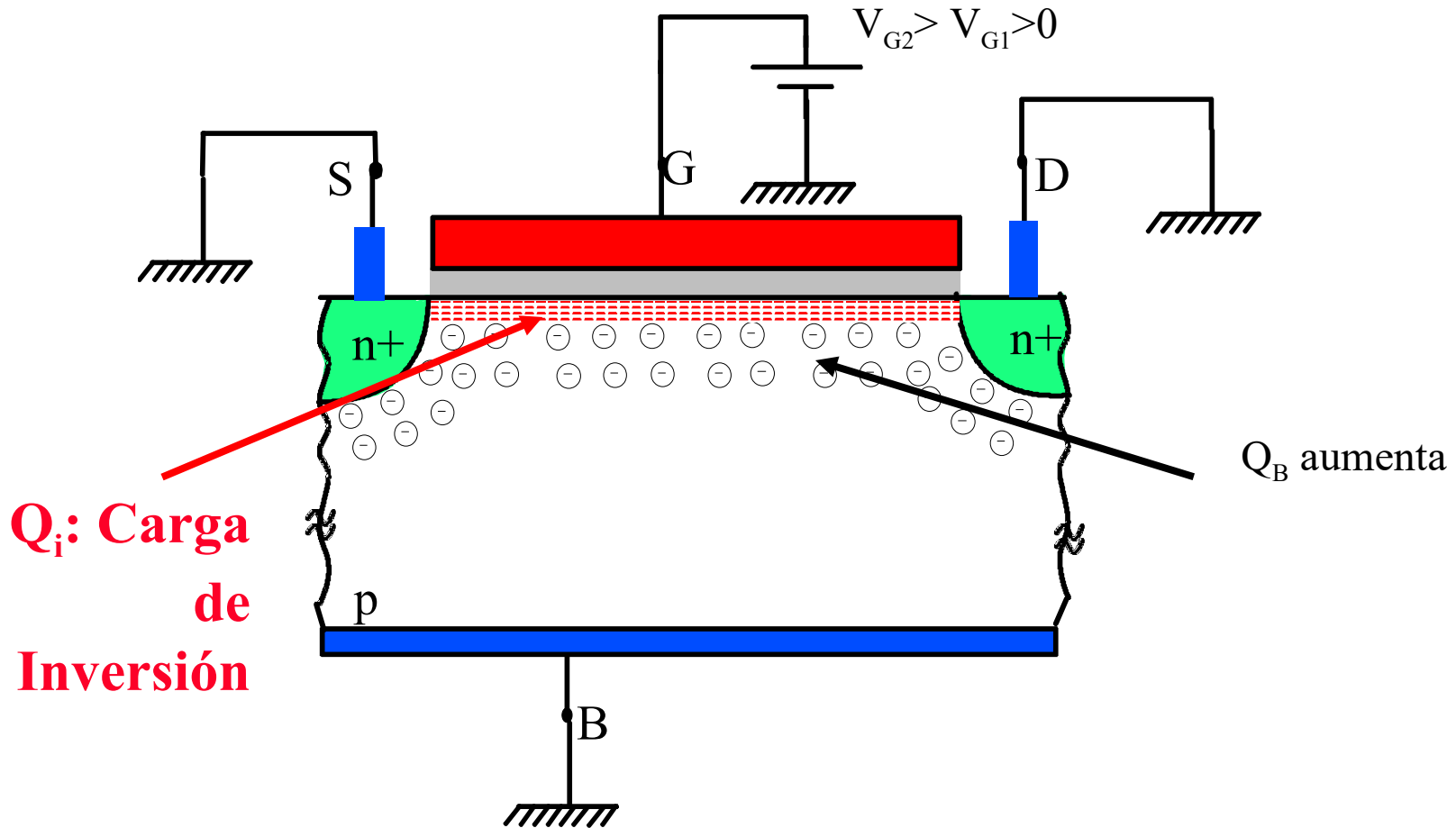
$$\delta = 0.2 \dots 0.6$$

Operación Transistor MOS (1) (Zona de Corte)



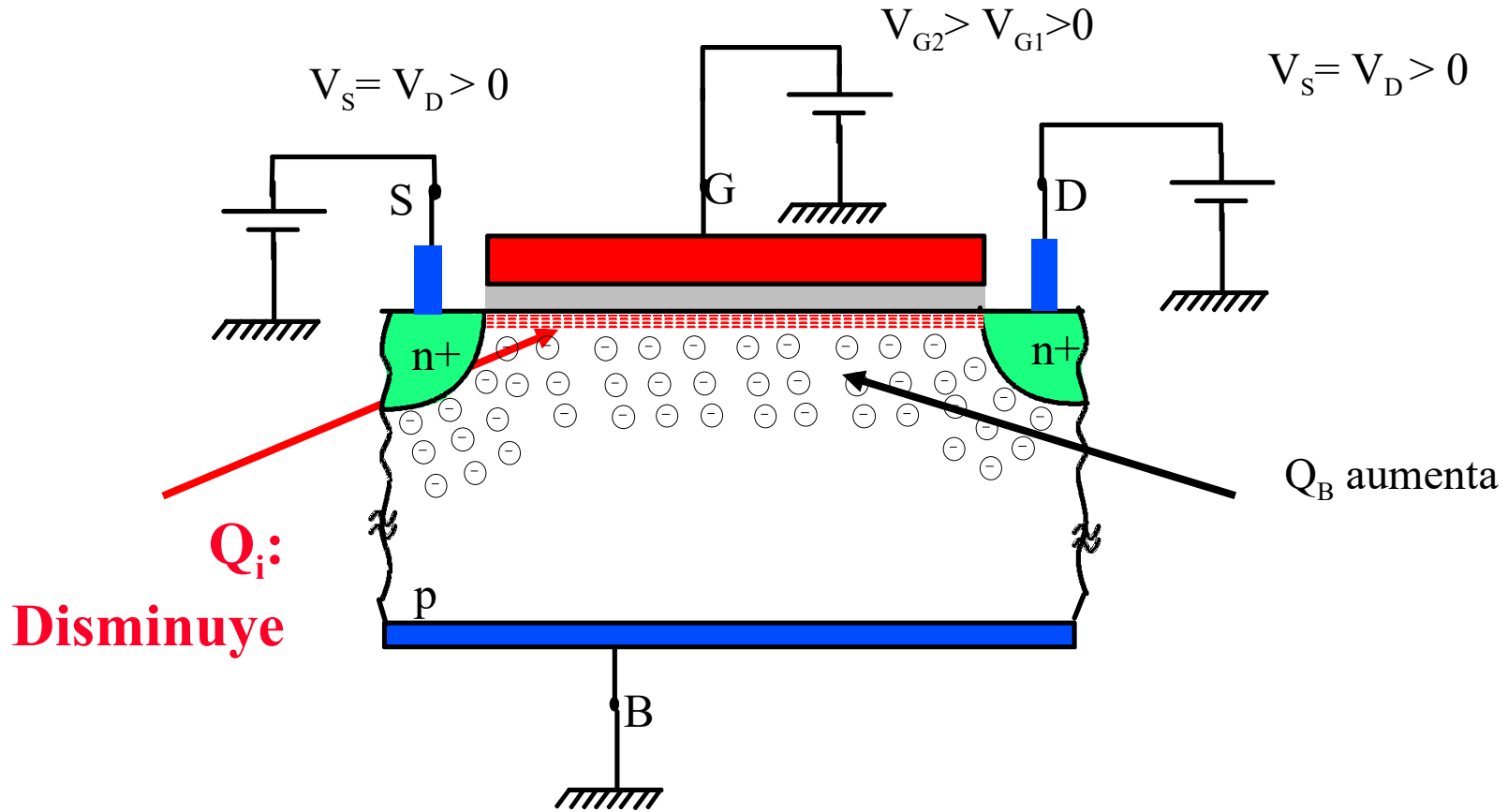
$$V_G = V_{G1} > 0, \text{ "pequeño"}, V_S = V_D = 0$$

Operación Transistor MOS (2)



$$V_G = V_{G2} > V_{G1} > 0, V_S = V_D = 0$$

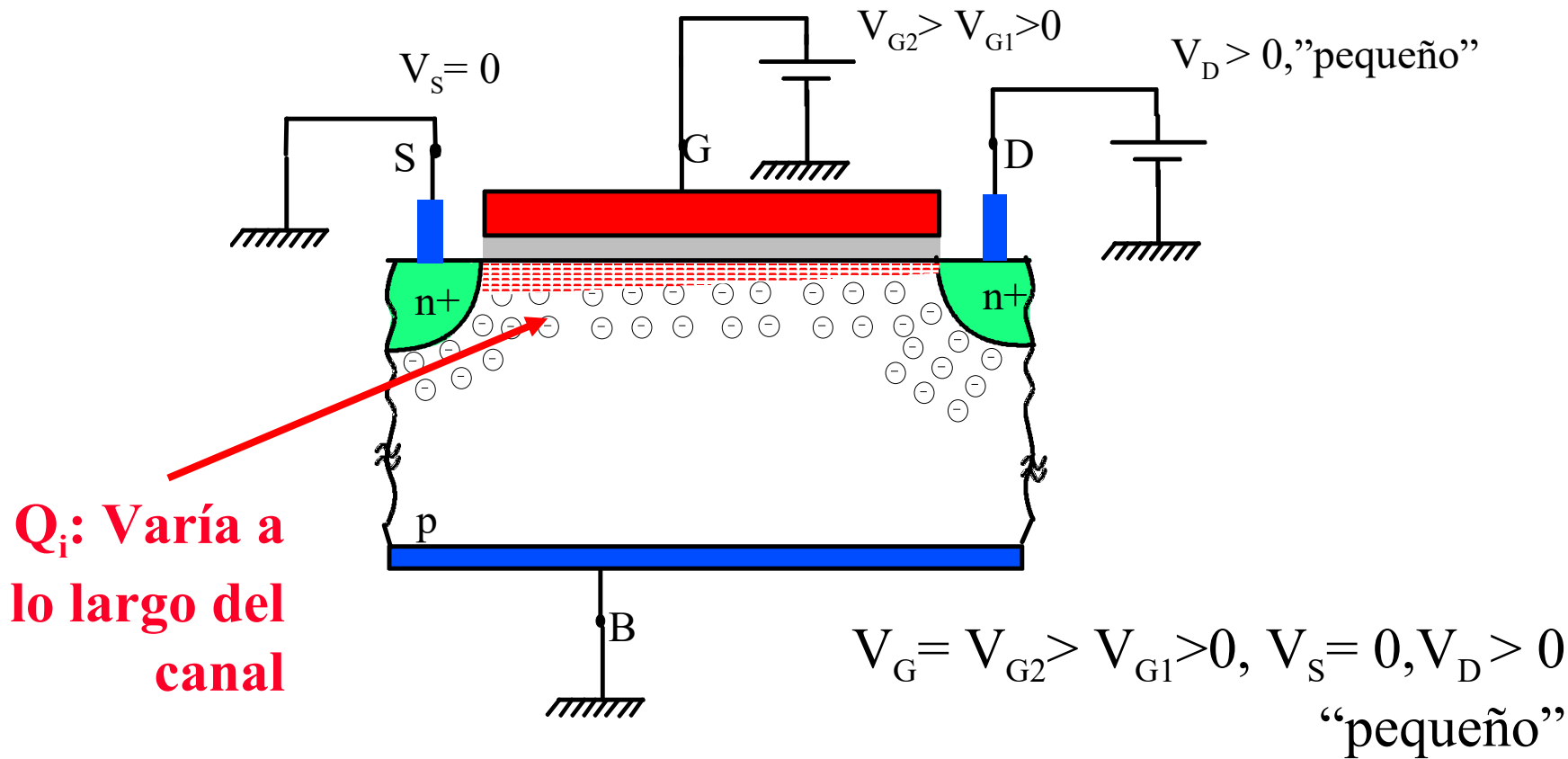
Operación Transistor MOS (3)



$$V_G = V_{G2} > V_{G1} > 0, V_S = V_D > 0$$

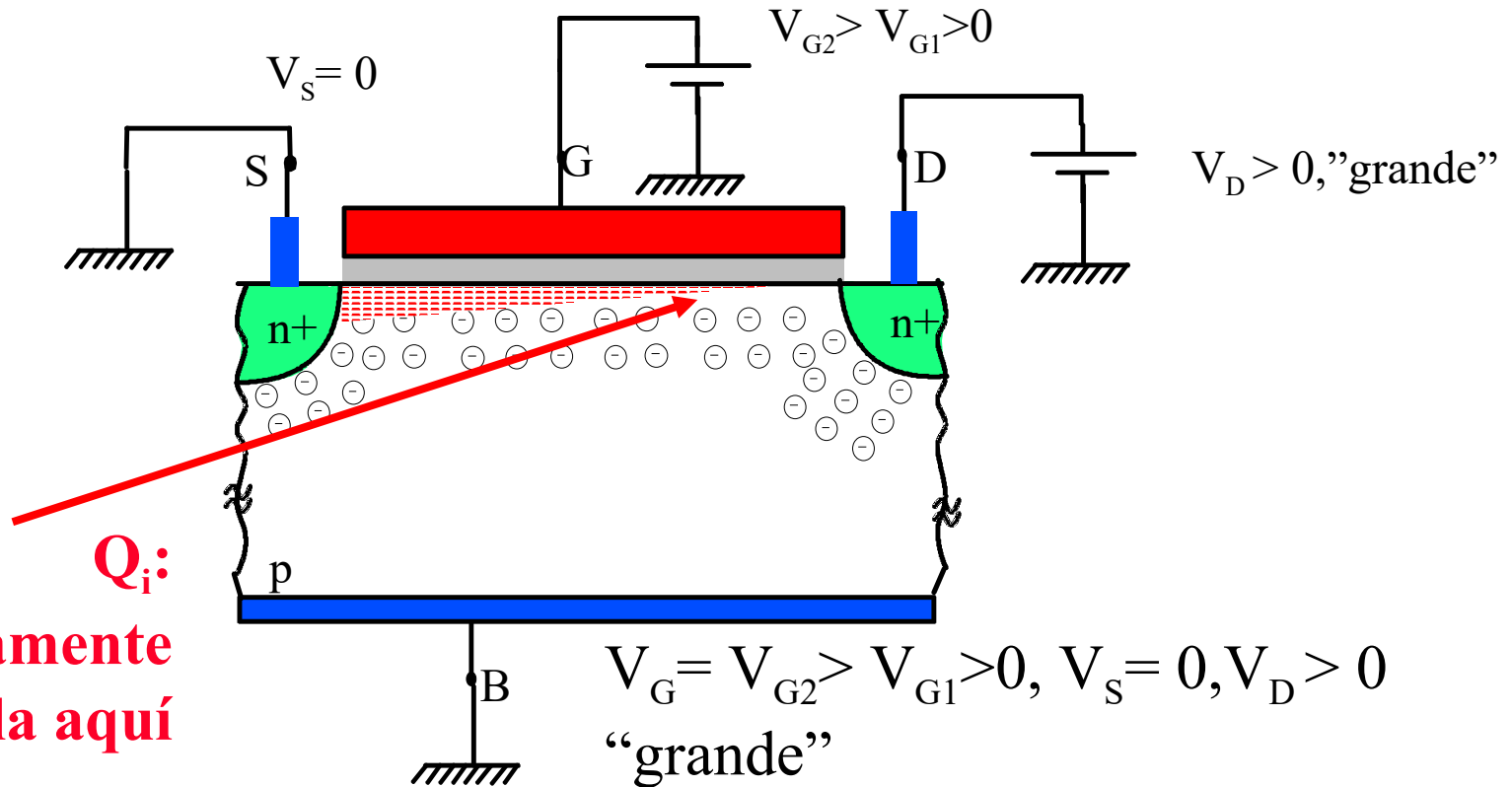
Operación Transistor MOS (4)

(Zona Lineal o “triodo”)



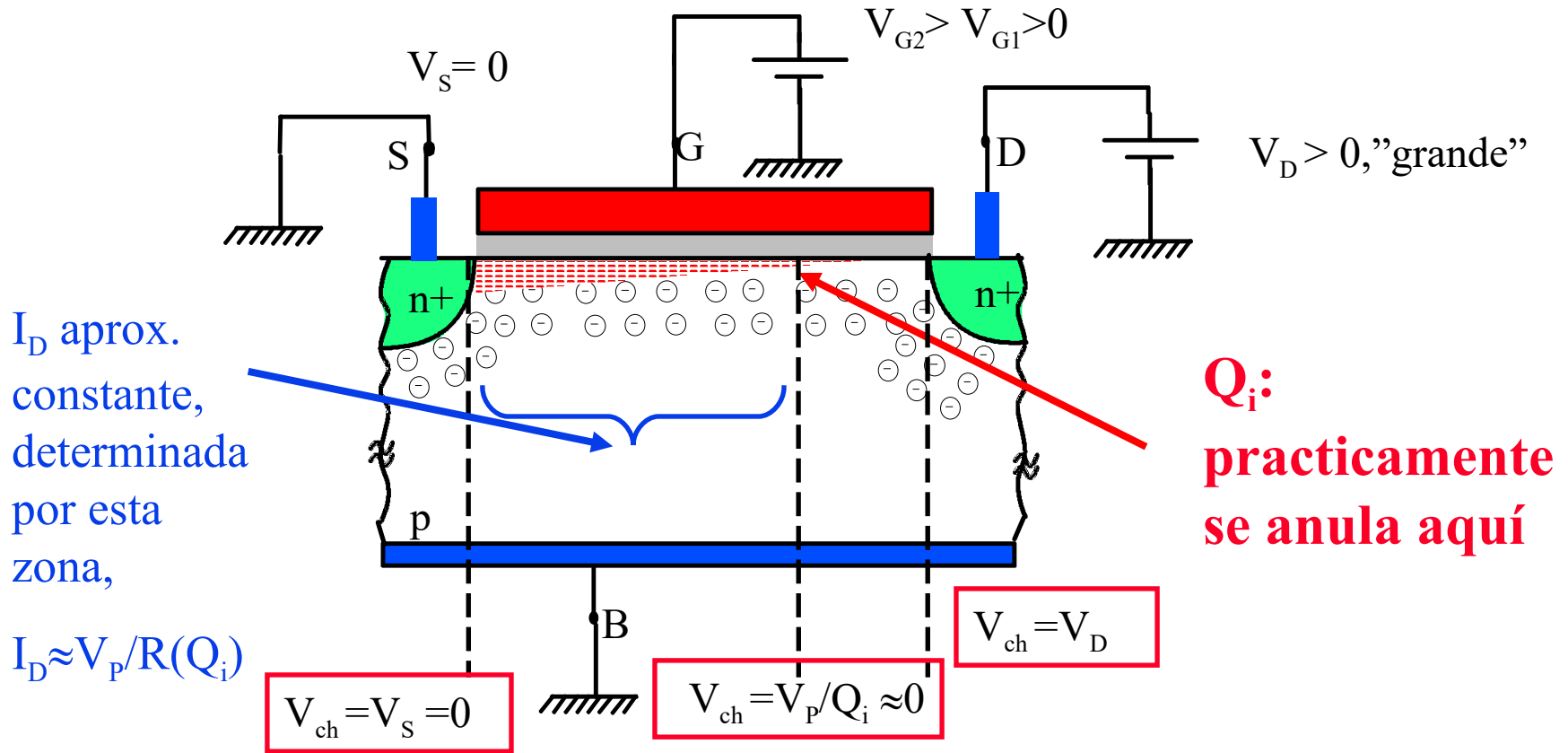
I_{DS} distinto de 0, aprox. lineal con V_{DS} , comportamiento de resistencia, pequeña, controlada por V_G

Operación Transistor MOS (5) (Saturación)



I_{DS} distinto de 0, no depende en primera aproximación de V_D , comportamiento de fuente de corriente controlada por V_G

Operación Transistor MOS (6) (Saturación 2)



V_P : tensión de "pinch-off" = V_{DSAT} : tensión de saturación

$$Q'_i \cong C'_{ox} \cdot (V_G - V_{T0} - (1 + \delta) \cdot V_{ch}) \Rightarrow V_P = (V_G - V_{T0}) / (1 + \delta) = V_{DSAT}$$

Operación Transistor MOS (7) (Saturación 3)

