



Bản Sơ thảo

BÀI GIẢNG CẤU KIỆN ĐIỆN TỬ

CHƯƠNG 4

TRANSISTOR HIỆU ỨNG TRƯỜNG - FET

GV: GVC-TS. Trần Anh Vũ

Khoa Điện tử

Trường Điện - Điện tử

Email: vu.trananh@hust.edu.vn

Nội dung chương

- Bản Sơ
- Giới thiệu
 - Transistor trường JFET
 - Transistor trường MOSFET

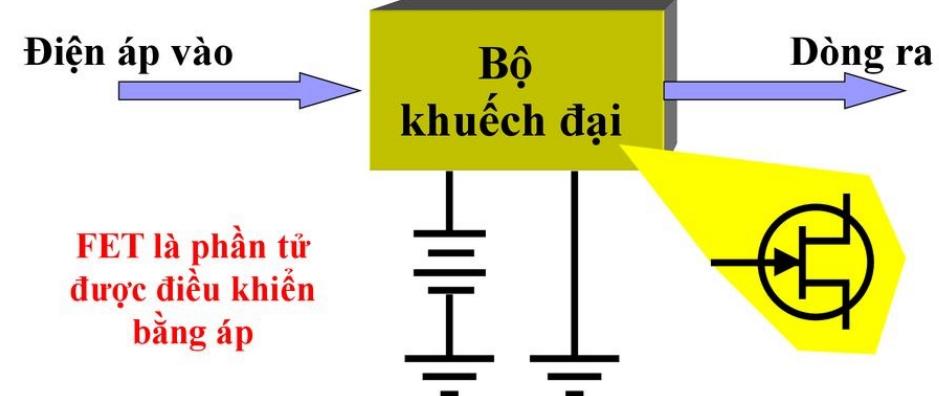
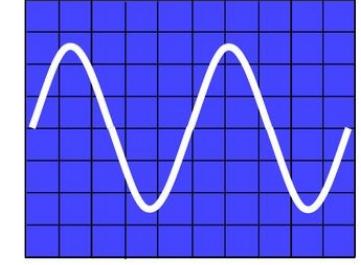
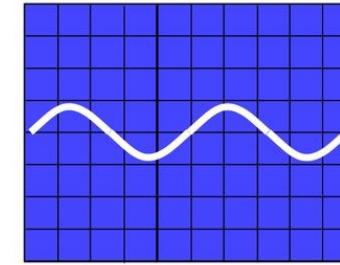
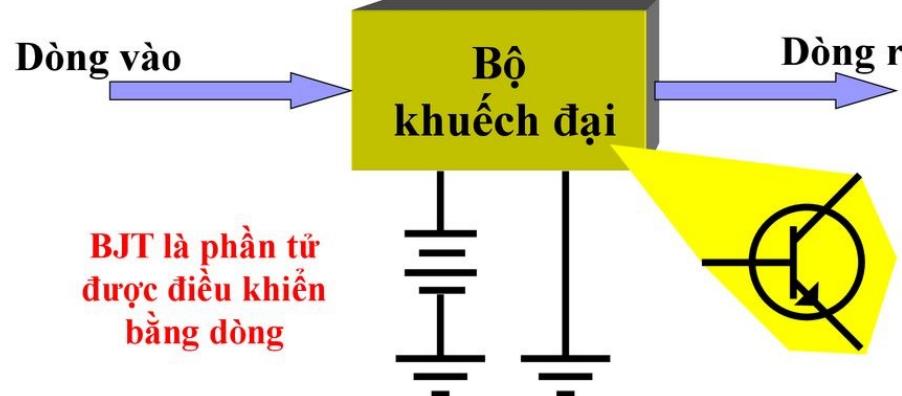
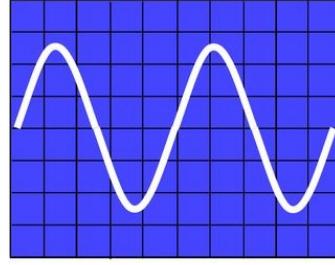
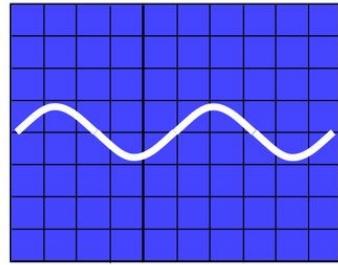
FET là gì?

Bản

- FET = Field Effect Transistor = Transistor hiệu ứng trường
- Là một cấu kiện điện tử gồm 3 cực, trong đó có một cực điều khiển
- Nguyên lý chính: dùng điện trường điều khiển độ rộng vùng nghèo
=> điều khiển độ dẫn điện
- Khác với BJT sử dụng 2 loại hạt dẫn đồng thời (n và p) và điều khiển bằng dòng thì FET chỉ dùng 1 loại hạt dẫn (hoặc n hoặc p) và điều khiển bằng điện áp
- FET đặc biệt có nhiều ưu điểm như tiêu thụ rất ít năng lượng, trở kháng vào lớn, thuận tiện trong công nghệ chế tạo

FET là gì?

Bắt



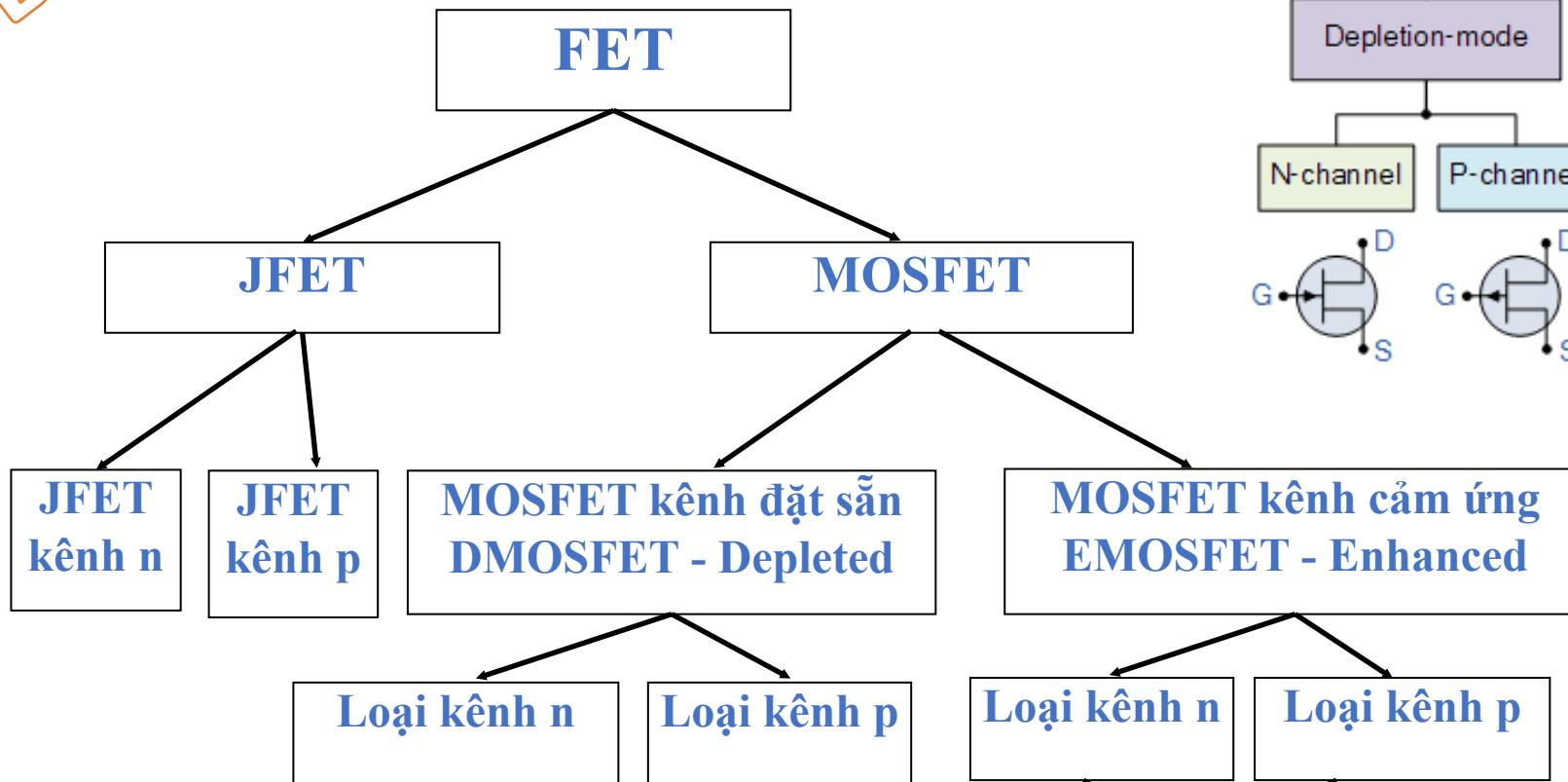
FET và BJT

Bài

Tiêu chí	BJT	FET
Loại hạt dẫn	Cả e và h đồng thời (bipolar)	Chỉ e hoặc h (unipolar)
Tên điện cực	C, B, E	D, G, S
Kiểu điều khiển	Dòng I_B điều khiển dòng I_C	Áp U_{GS} điều khiển dòng I_D
Loại	NPN hoặc PNP	Kênh N hoặc kênh P
Ưu việt	<ul style="list-style-type: none"> Tuyến tính, dễ dùng Có thể chịu áp cao, dòng lớn 	<ul style="list-style-type: none"> Trở kháng vào cực lớn Chuyển mạch nhanh
Ứng dụng phổ biến	<ul style="list-style-type: none"> Mạch analog và IC analog Các mạch điện rời rạc trong thiết bị dân dụng 	<ul style="list-style-type: none"> Trong các IC số Trong các mạch đóng cắt hiệu suất cao

Phân loại FET

Bản • Có nhiều loại

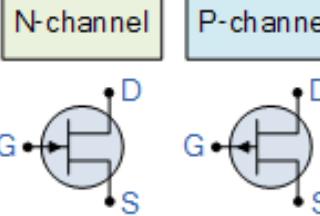


The Field-Effect
Transistor (FET)

Junction FET

Depletion-mode

N-channel

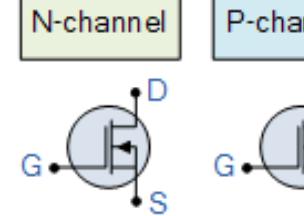


P-channel

Metal Oxide
Semiconductor FET

Depletion-mode

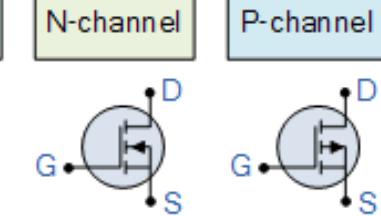
N-channel



P-channel

Enhancement-mode

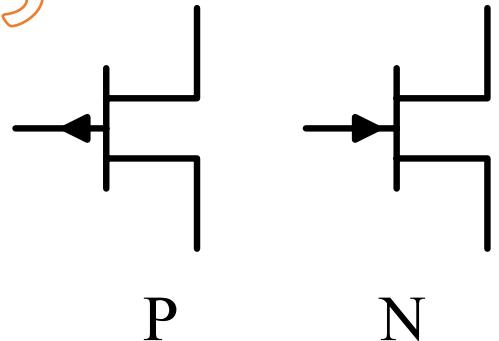
N-channel



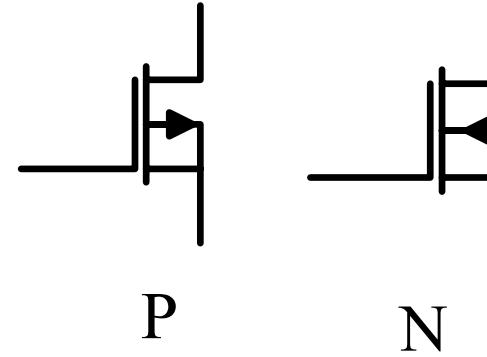
P-channel

Ký hiệu

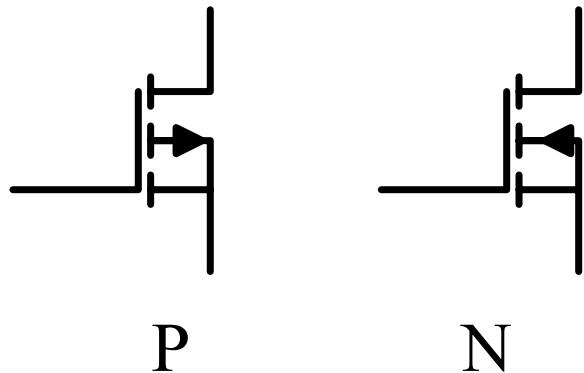
Bản sơ thảo



a). JFET



b). MOSFET kênh sǎn



c). MOSFET kênh cảm ứng

Nội dung chương

- Bản số 1. Giới thiệu
2. Transistor trường JFET
3. Transistor trường MOSFET

Transistor trường JFET

Bản thảo

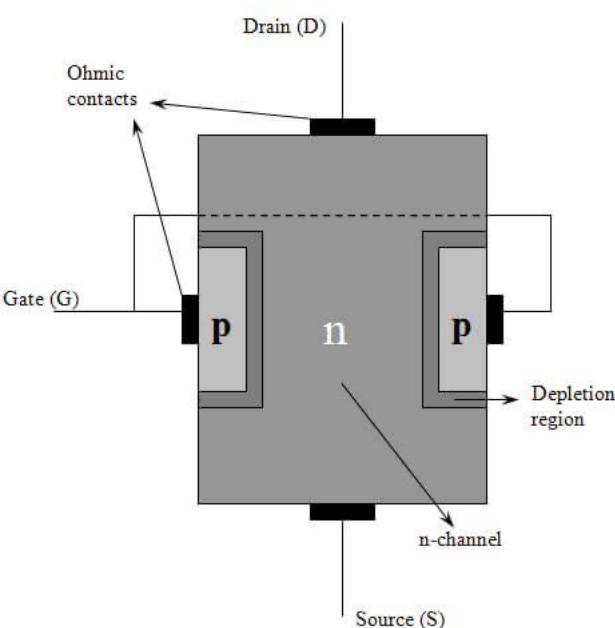
- Cấu tạo của JFET

- Nguyên lý làm việc
- Đặc tuyến của JFET
- Phương trình Shockley
- Độ hổ dẫn
- Các tham số điện quan trọng
- Phân cực cho JFET

Cấu tạo của JFET

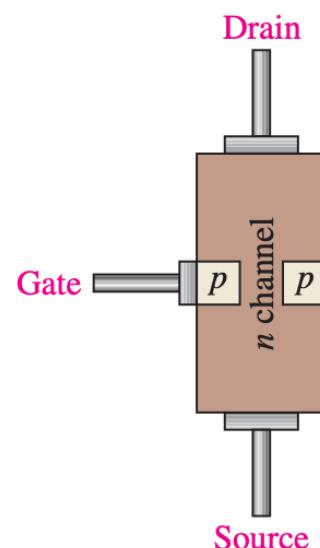
Bản *JFET* = Junction FET, được tạo bởi:

- Một khối bán dẫn loại N (hoặc P): một đầu nối ra cực D (Drain = máng), đầu còn lại là cực S (Source = nguồn)
- Bán dẫn loại P (hoặc N) được cấy vào 2 bên sườn => nối ra cực G (Gate = cửa)

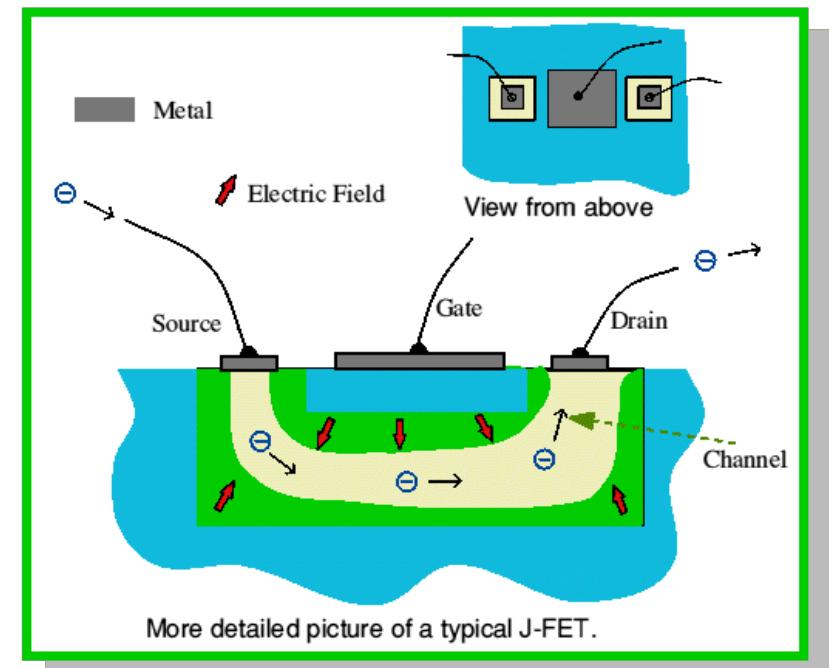


(a) *n* channel

TS. Trần Anh Vũ (Electronics Dept. SEEE, HUST)



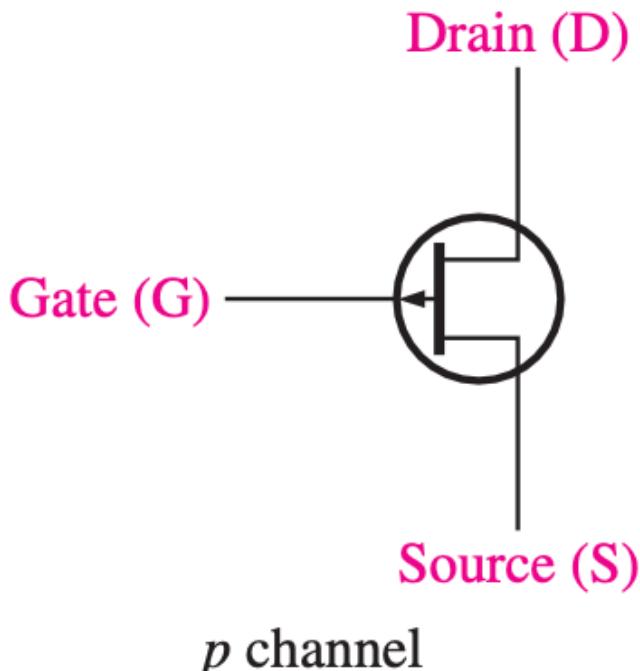
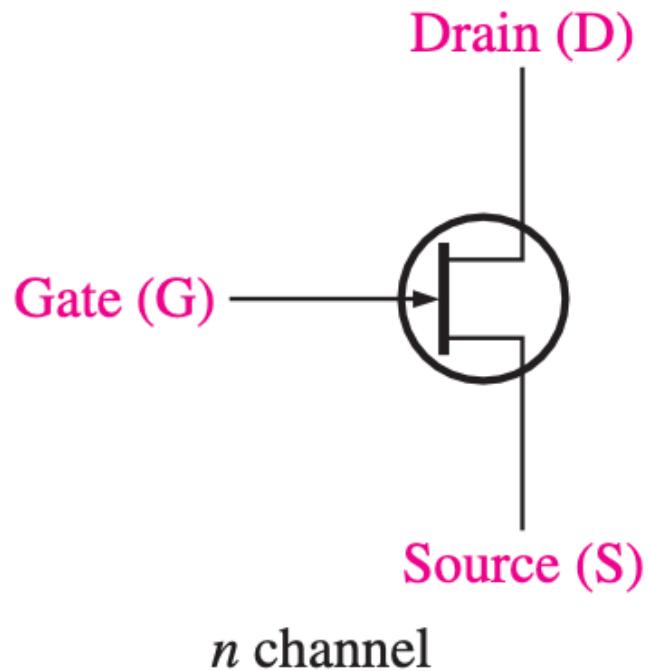
(b) *p* channel



Cấu tạo của JFET

Bản
cơ
tạo

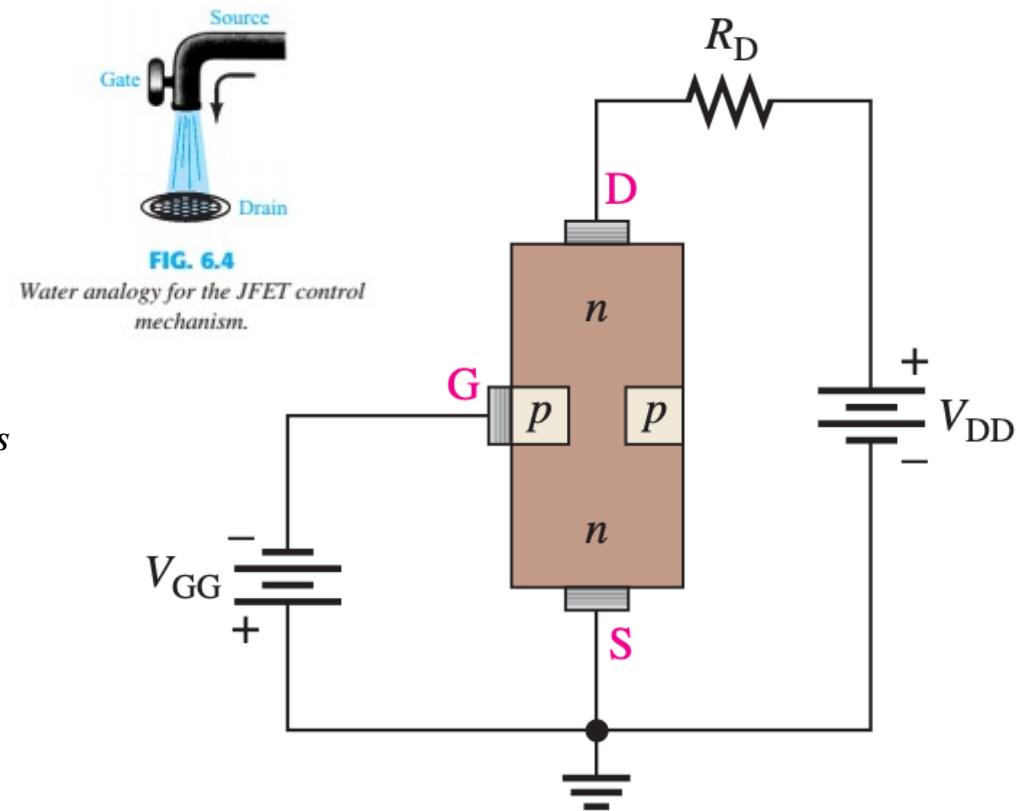
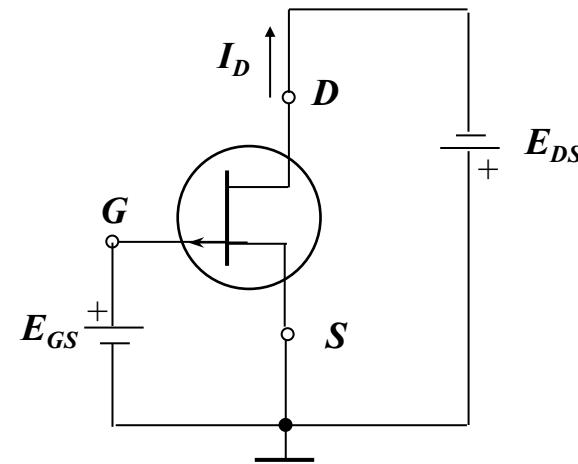
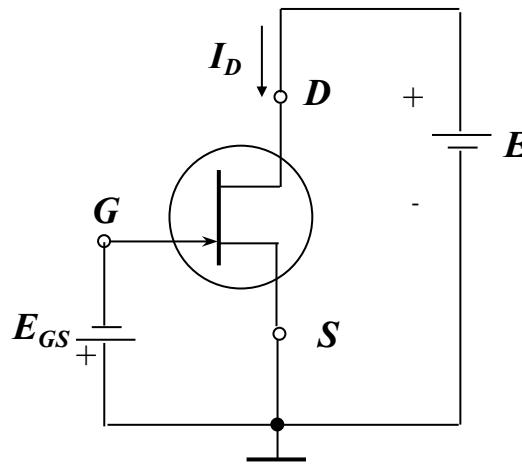
- Có 2 loại JFET: kênh N và kênh P
- Loại kênh N thường dẫn điện tốt hơn kênh P
- Ký hiệu trong mạch



Nguyên lý làm việc

Bản

- Để FET làm việc, ta phải phân cực (bias) cho nó một cách phù hợp
- Với JFET, tiếp giáp PN luôn cần phân cực ngược (hoạt động ở chế độ nghèo):
 - ✓ Kênh N: $U_{GS} \leq 0$; $U_{DS} > 0$
 - ✓ Kênh P: $U_{GS} \geq 0$; $U_{DS} < 0$



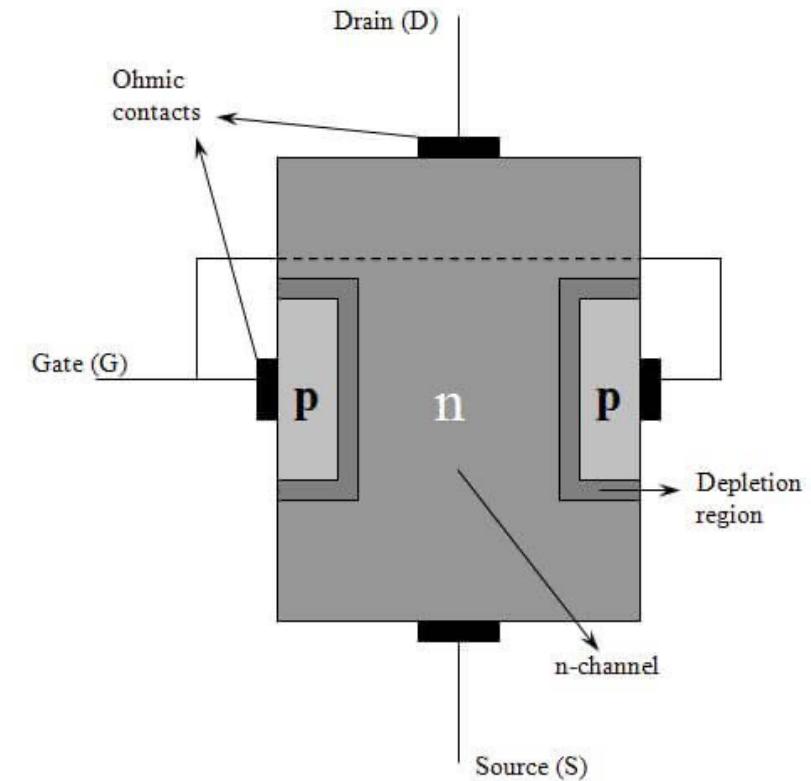
Nguyên lý làm việc

Bản số

Nguyên lý làm việc

Bản sao Xét JFET kênh N:

- Nếu $U_{GS} \geq 0$; tiếp giáp PN giữa cực G và kênh sẽ phân cực thuận. Khi đó dòng I_G sẽ tăng đột ngột, khả năng điều khiển kênh sẽ không còn.
- Vì vậy JFET chỉ làm việc ở chế độ tiếp giáp PN giữa cực G và cực S phân cực ngược.
- Chế độ này gọi là chế độ nghèo (Depletion mode - hay gọi tắt là D mode).
- Chế độ nghèo ứng với loại JFET kênh N là $U_{GS} < 0$, còn đối với JFET kênh P sẽ là $U_{GS} > 0$.



Nguyên lý làm việc

Bản
cơ
Xét JFET kênh N:

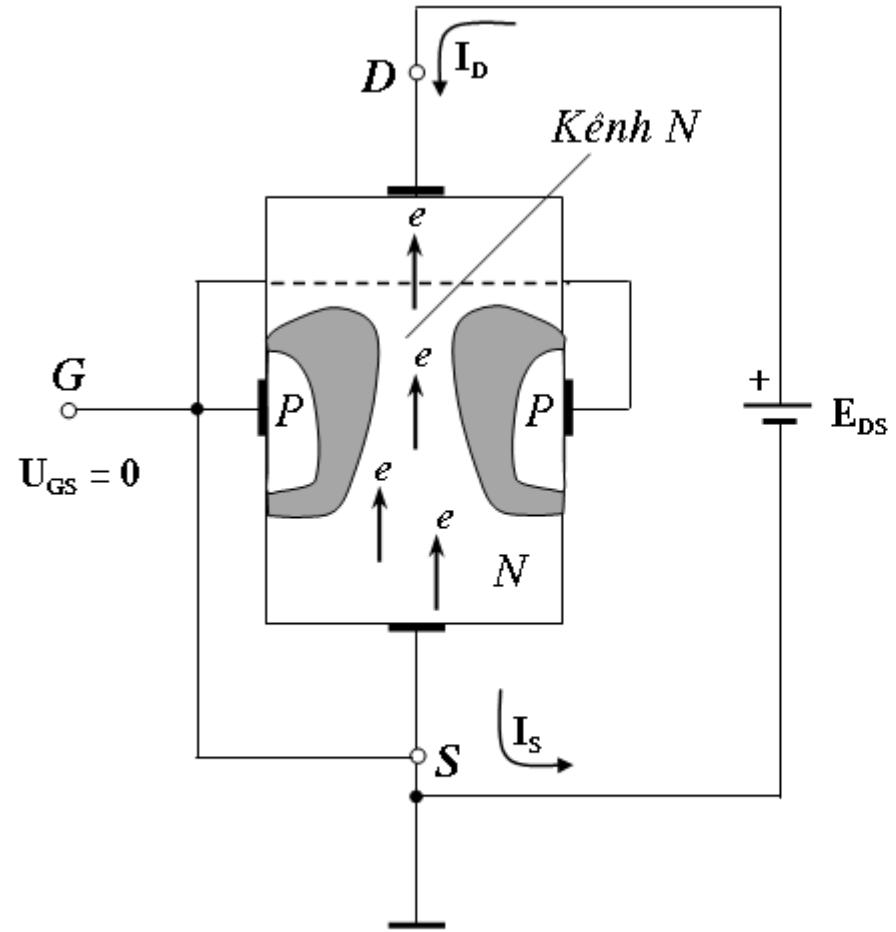
=> Cần: $U_{GS} \leq 0$; $U_{DS} > 0$

• Đầu tiên:

- Cố định $U_{GS} = 0$
- Cho $U_{DS} > 0$

=> Hiện tượng:

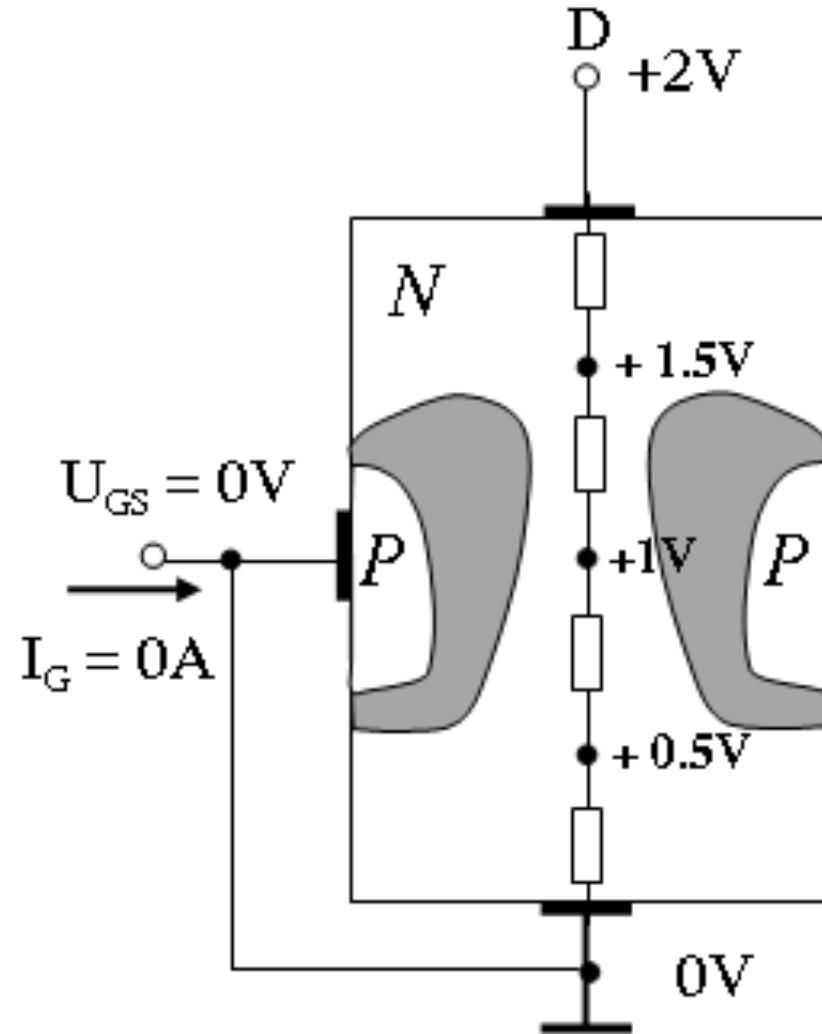
- PN phân cực ngược
- Vùng nghèo ở phía D rộng hơn ở phía S



Nguyên lý làm việc

Bản

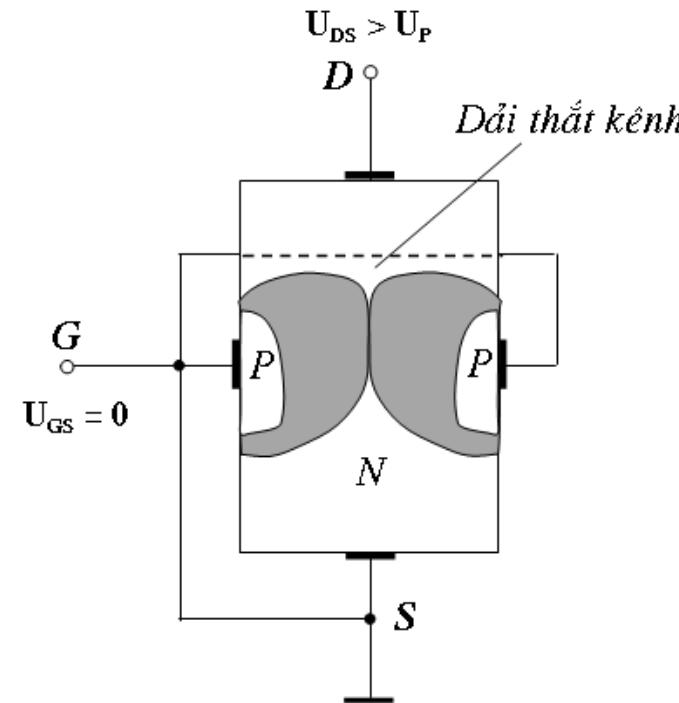
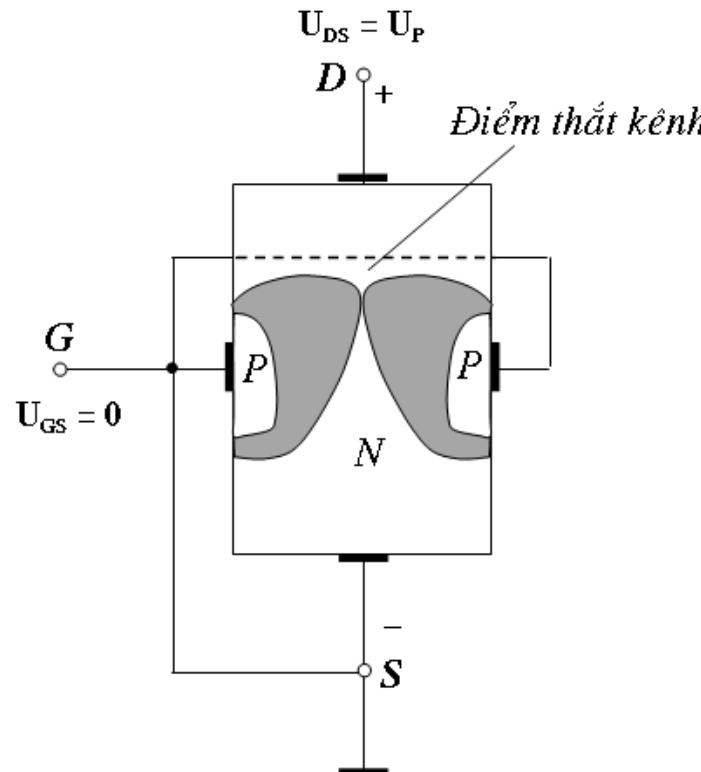
- Khi tăng dần U_{DS} => chênh áp dọc kênh tăng => hiện tượng:
 - ✓ Vùng nghèo càng phình to về phía D
 - ✓ Kênh dẫn hẹp dần
 - ✓ Dòng điện I_D tăng theo U_{DS} nhưng tốc độ chậm dần
 - Luôn có $I_G = 0$



Nguyên lý làm việc

Bản

- Khi tăng U_{DS} đến giá trị $U_P \Rightarrow$ kênh bị thắt (pinch-off)
- Nếu tiếp tục tăng $UDS \Rightarrow$ dòng I_D không tăng
- U_P gọi là điện áp thắt kênh



Nguyên lý làm việc

Bản

• Tiếp theo: cho $U_{GS} < 0$

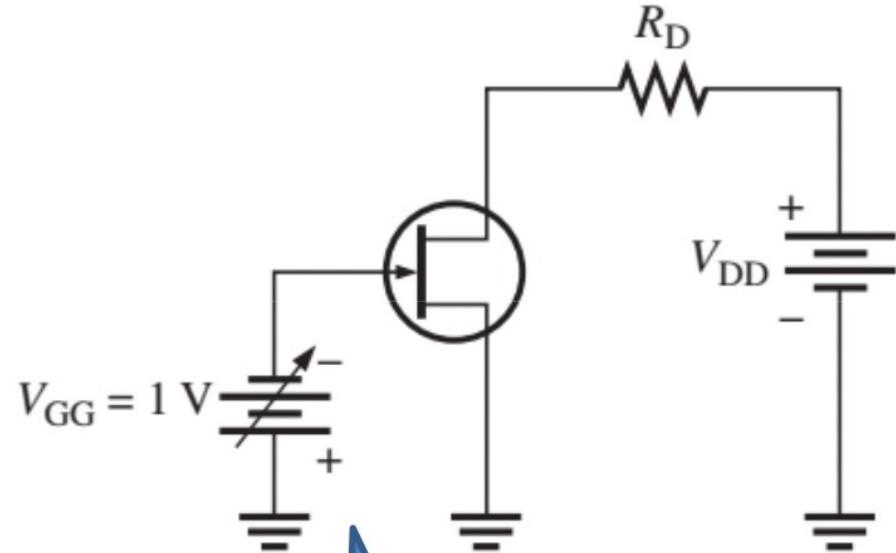
✓ Điện áp ngược PN được “gia tăng” thêm một lượng đúng bằng độ lớn của U_{GS}

➔ Hiện tượng thắt kênh đến sớm hơn (trước khi U_{DS} đạt đến U_P)

✓ U_{GS} càng âm, thắt kênh càng nhanh $\Rightarrow I_D$ bão hòa càng sớm \Rightarrow giá trị I_D khi bão hòa càng nhỏ

✓ Đặc biệt: $U_{GS} = U_{GS(off)} = -U_P$ thì kênh bị thắt ngay từ đầu

☞ Cùng một U_{DS} , điện áp U_{GS} điều khiển được độ lớn của dòng I_D bão hòa



$$U_{GS} = -U_{GG} = -1 \text{ V}$$

Đặc tuyến của JFET

Bản
so

• Quan tâm đến 2 đặc tuyến:

– Họ đặc tuyến ra hay đặc tuyến cực máng (Drain characteristic): mô tả quan hệ giữa I_D và U_{DS} ứng với các U_{GS} khác nhau

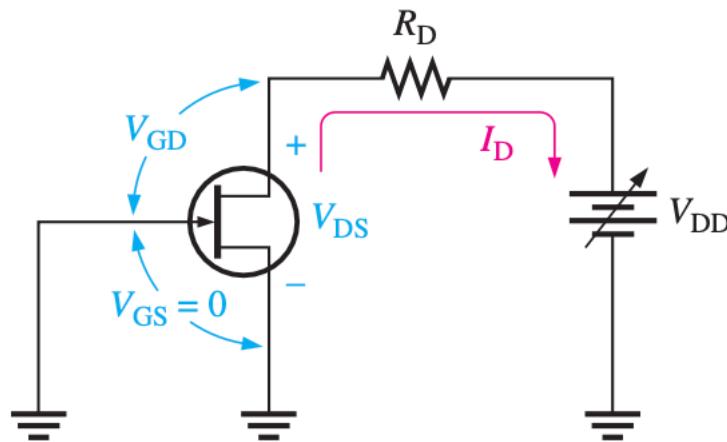
=> Liên hệ bài cũ: đặc tuyến Colecto của BJT mô tả quan hệ I_C và U_{CE}

– Đặc tuyến truyền đạt (transfer characteristic): mô tả quan hệ điều khiển của U_{GS} đối với I_D

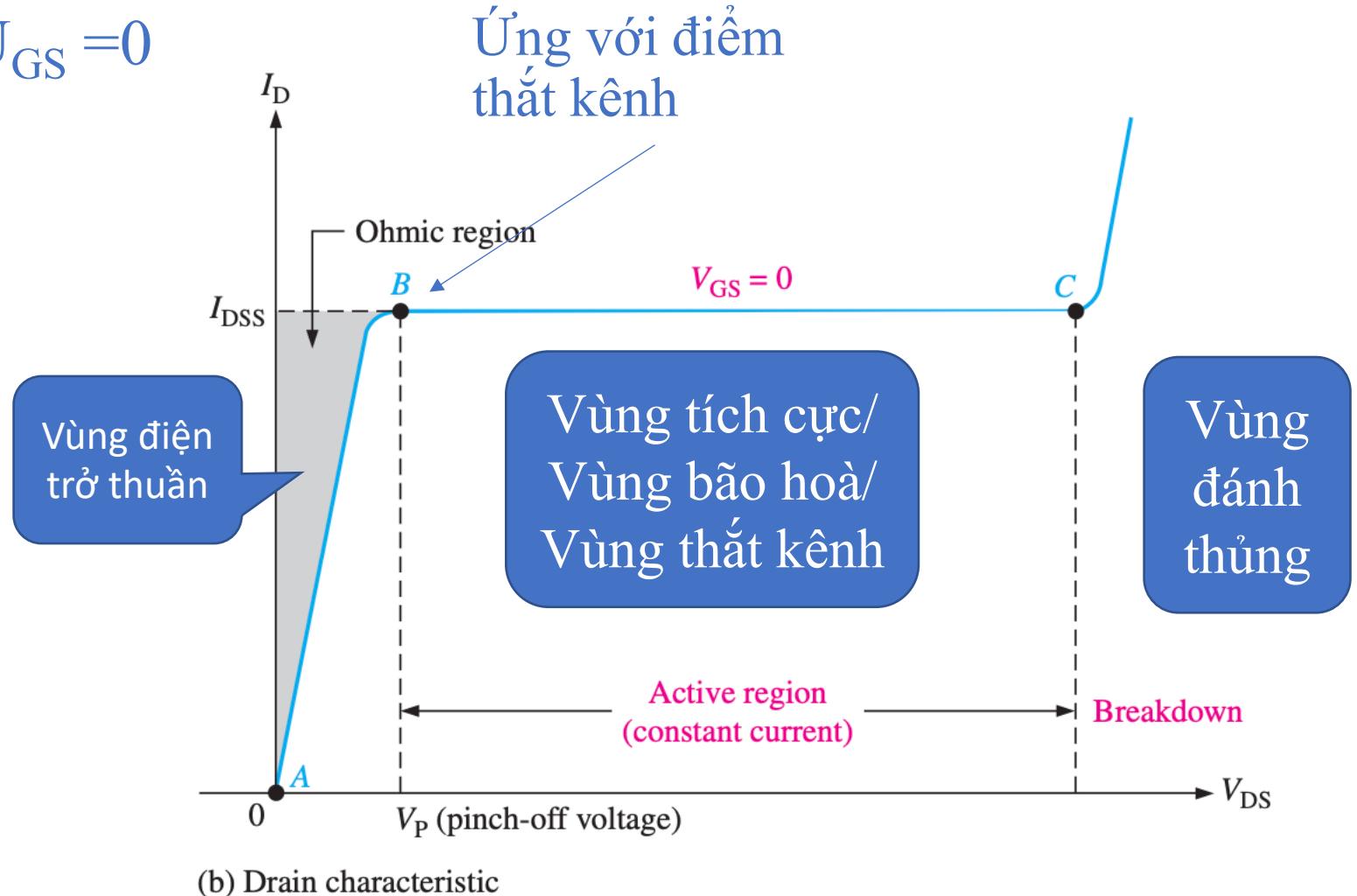
=> Liên hệ bài cũ: quan hệ điều khiển của I_B đối với I_C

Đặc tuyến của JFET

Bản
Đặc



(a) JFET with $V_{GS} = 0$ V and a variable V_{DS} (V_{DD})



(b) Drain characteristic

Đặc tuyến của JFET

Bản Sơ

- Trên đặc tuyến, ta thấy có 3 vùng rõ rệt:

- *Vùng $U_{DS} < U_P$* : Dòng tăng nhanh, khá tuyến tính. Kênh dẫn điện giống như một điện trở nên vùng này được gọi là vùng tuyến tính hay vùng điện trở thuần.
- *Vùng $U_P < U_{DS} < U_{DS\text{ thủng}}$* : Là vùng bão hòa, dòng điện cực máng gần như không tăng và bằng I_{DSS} do hiện tượng thắt kênh.
- *Vùng $U_{DS} \geq U_{DS\text{ thủng}}$* : Nếu U_{DS} tăng quá giá trị $U_{DS\text{ thủng}}$ thì tiếp giáp PN bị đánh thủng, dòng I_D tăng vọt. Vùng này gọi là vùng đánh thủng.
- Giá trị dòng bão hòa với trường hợp $U_{GS} = 0$ được ký hiệu là I_{DSS} .

Đặc tuyến của JFET

Nhận xét các vùng:

- Vùng thuận trở: các vùng nghèo ít ảnh hưởng $\Rightarrow I_D$ tăng tuyến tính theo U_{DS}
- Vùng tích cực: kênh bị thắt do vùng nghèo “bóp” lại. Dòng I_D không đổi dù U_{DS} tăng. Lí do: Nếu I_D có xu hướng tăng \Rightarrow sụt áp dọc kênh tăng \Rightarrow áp ngược PN tăng \Rightarrow vùng nghèo nở rộng hơn \Rightarrow kênh bị hẹp thêm $\Rightarrow I_D$ giảm trở lại \Rightarrow giữ không đổi = I_{DSS}
- Vùng đánh thủng: tiếp giáp PN bị đánh thủng

\Rightarrow Có 2 giá trị cần quan tâm:

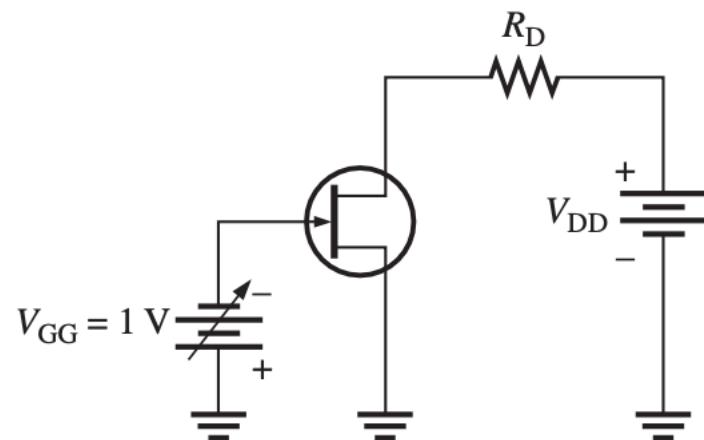
- U_{DS} tại đó kênh bắt đầu bị thắt (khi $U_{GS} = 0$): U_P
- I_D khi đạt giá trị bão hòa (khi $U_{GS} = 0$): I_{DSS}

I_{DSS} = Drain to Source current with gate Shorted

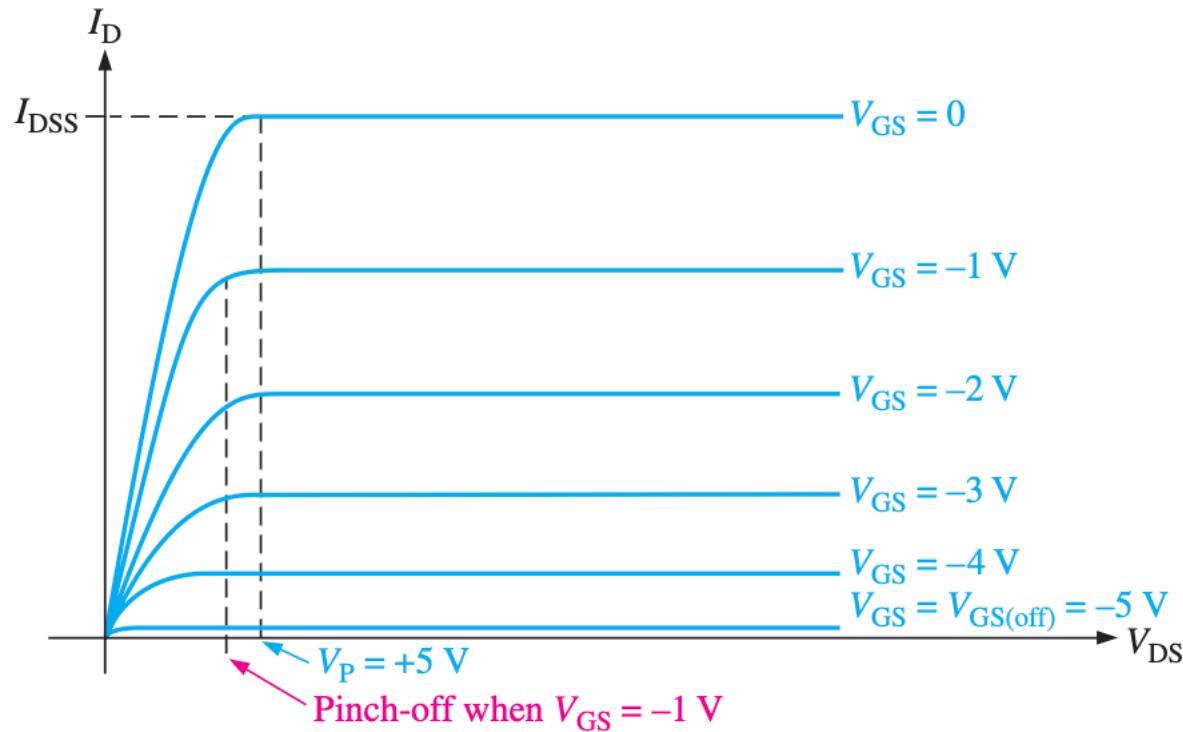
Đặc tuyến của JFET

Bản • Họ đặc tuyến ra

- ✓ Mô tả mối quan hệ $I_D - U_{DS}$ ứng với các U_{GS} khác nhau
- ✓ Họ đặc tuyến cho biết rõ: I_{DSS} , U_P , $U_{GS(off)}$



(a) JFET biased at $V_{GS} = -1\text{ V}$

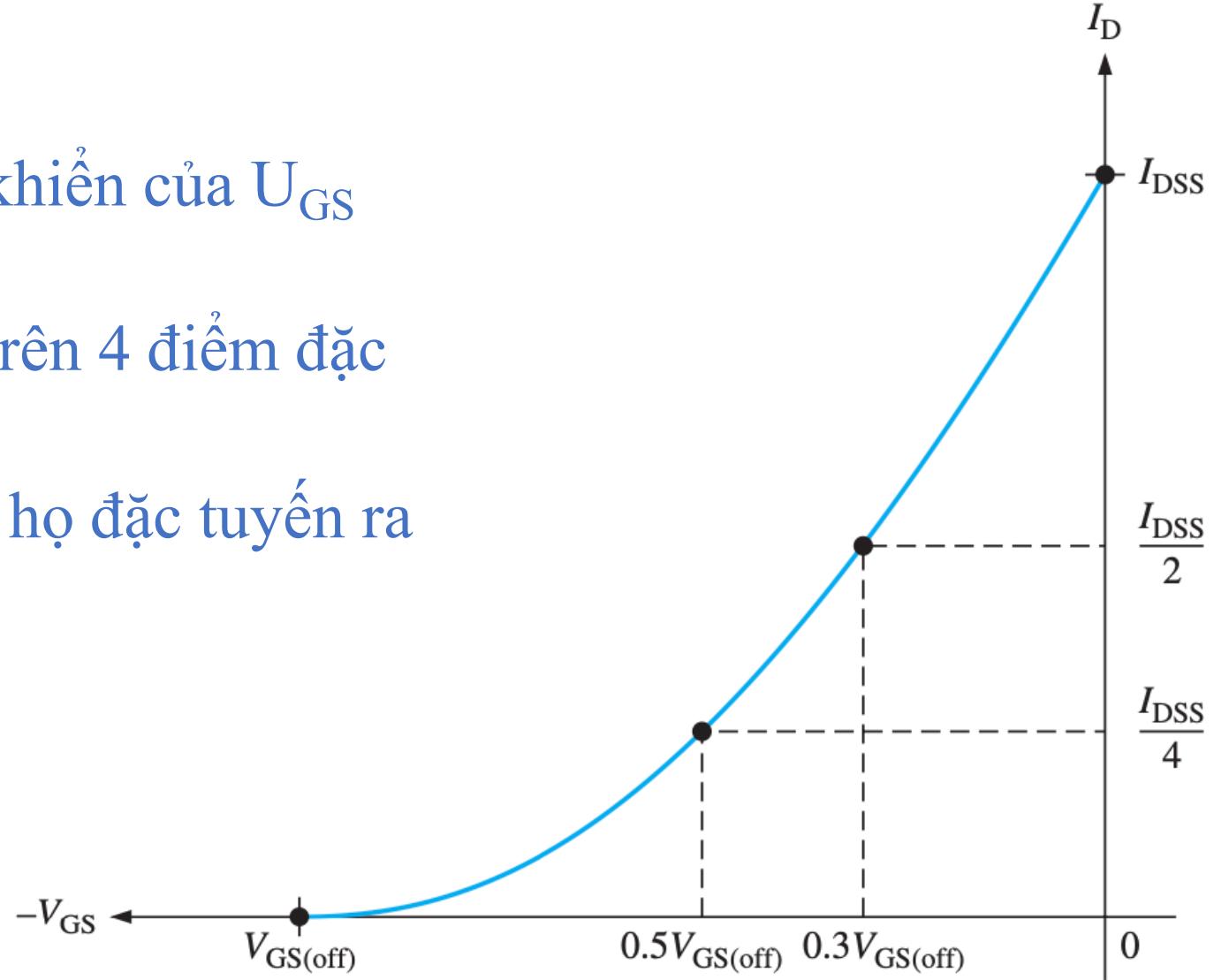


(b) Family of drain characteristic curves

Đặc tuyến của JFET

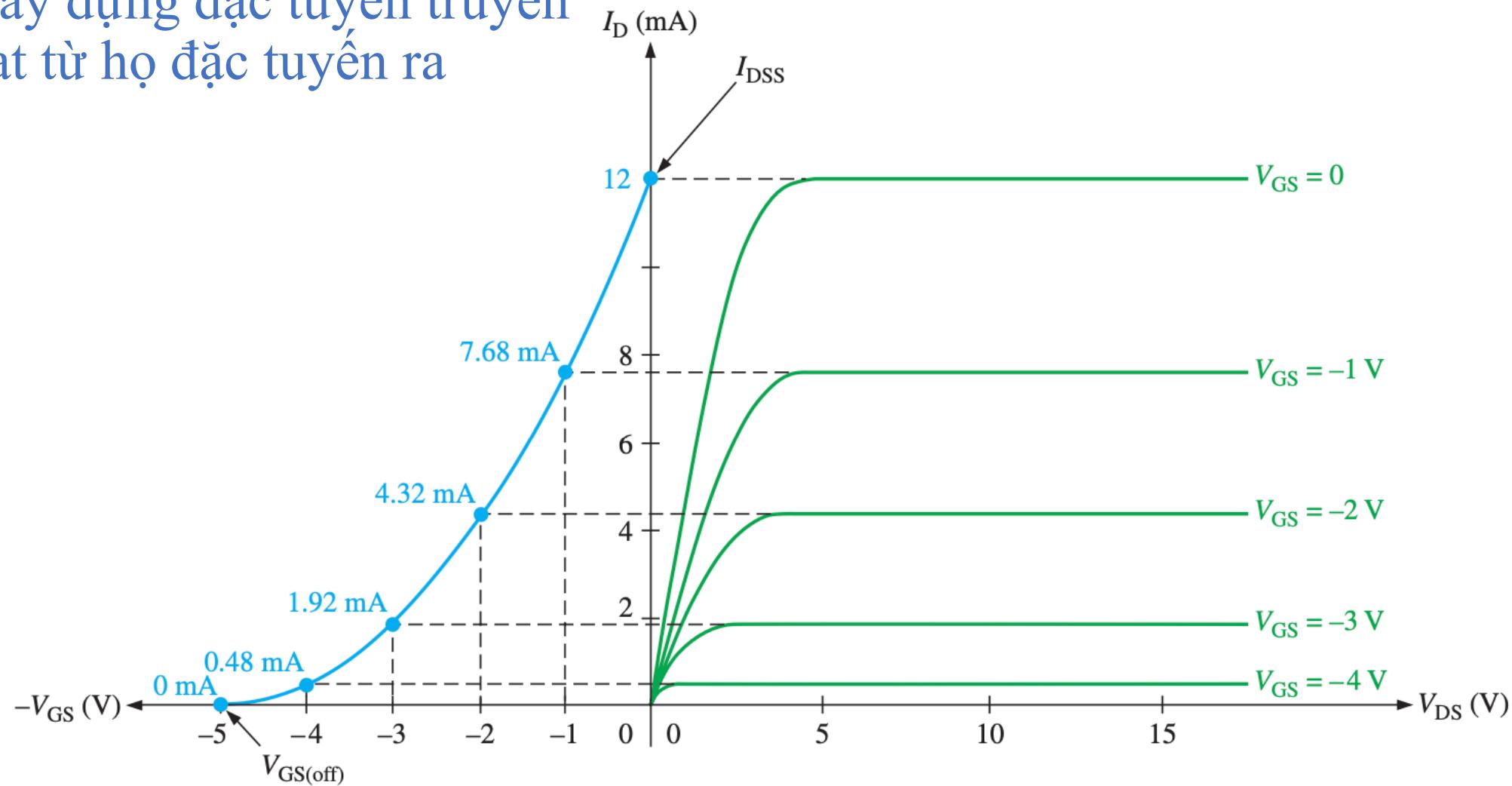
Bản
Đo

- Đặc tuyến truyền đạt
- ✓ Mô tả mối quan hệ điều khiển của U_{GS} đối với I_D
- ✓ Có thể vẽ gần đúng dựa trên 4 điểm đặc biệt như hình bên
- ✓ Có thể được xây dựng từ họ đặc tuyến ra



Đặc tuyến của JFET

Bản
• Xây dựng đặc tuyến truyền
đạt từ họ đặc tuyến ra



Phương trình Shockley

Bản • Đặc tuyến truyền đạt của JFET có thể được mô tả gần đúng bằng phương trình:

$$I_D \cong I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(\text{off})}} \right)^2$$

- ✓ JFET cho trước, I_D luôn xác định nếu biết U_{GS}
- ✓ JFET (Với một và cả MOSFET sẽ học sau) được gọi là “square-law device” => phi tuyến

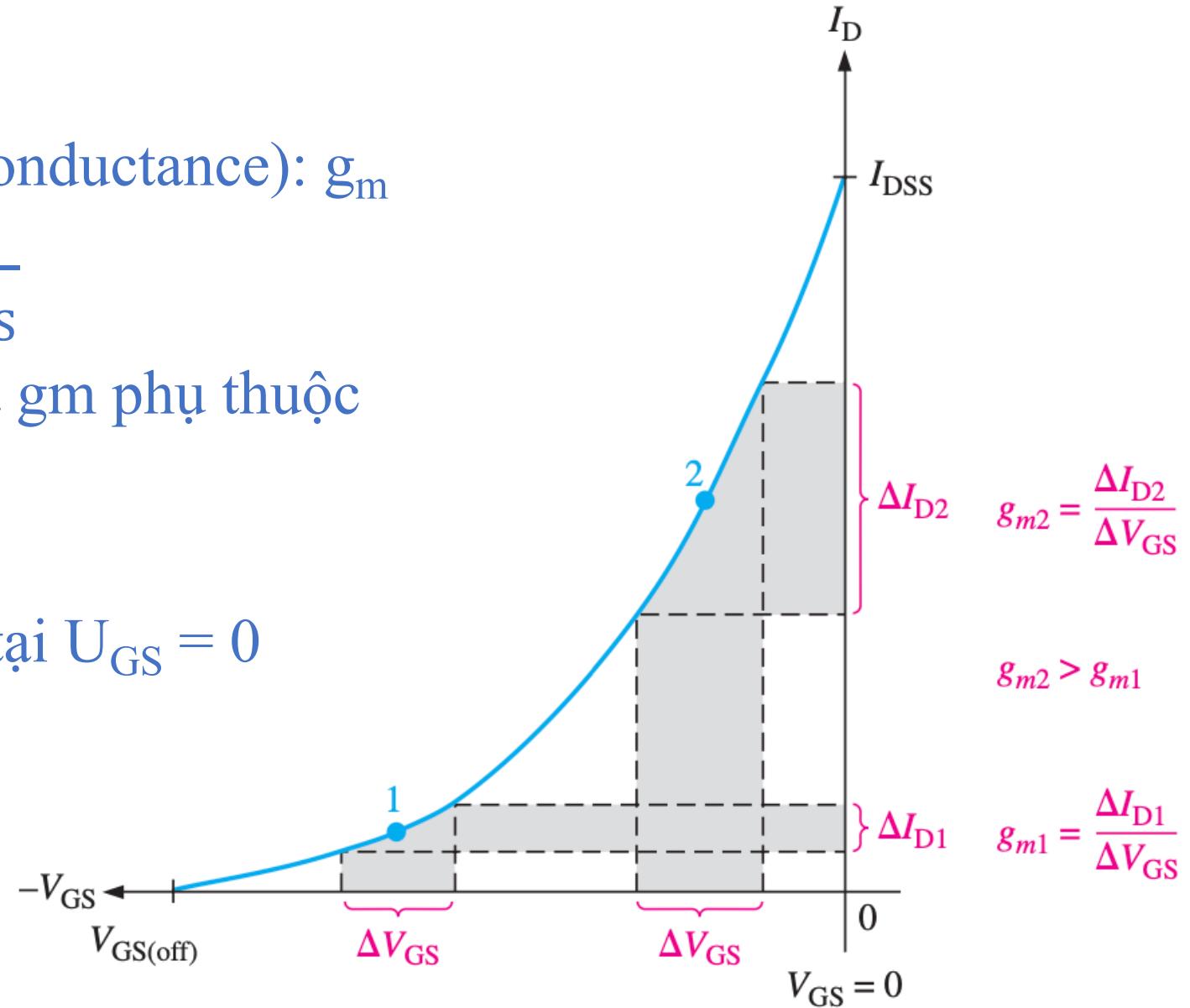
Độ hô dẫn của JFET

Bản Sô

- Độ hô dẫn (forward transconductance): g_m

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}}$$

- Cùng một JFET, giá trị của g_m phụ thuộc vào từng điểm làm việc
- Đơn vị: S hoặc mho
- Datasheet thường cho g_{m0} tại $U_{GS} = 0$



Độ hô dân của JFET

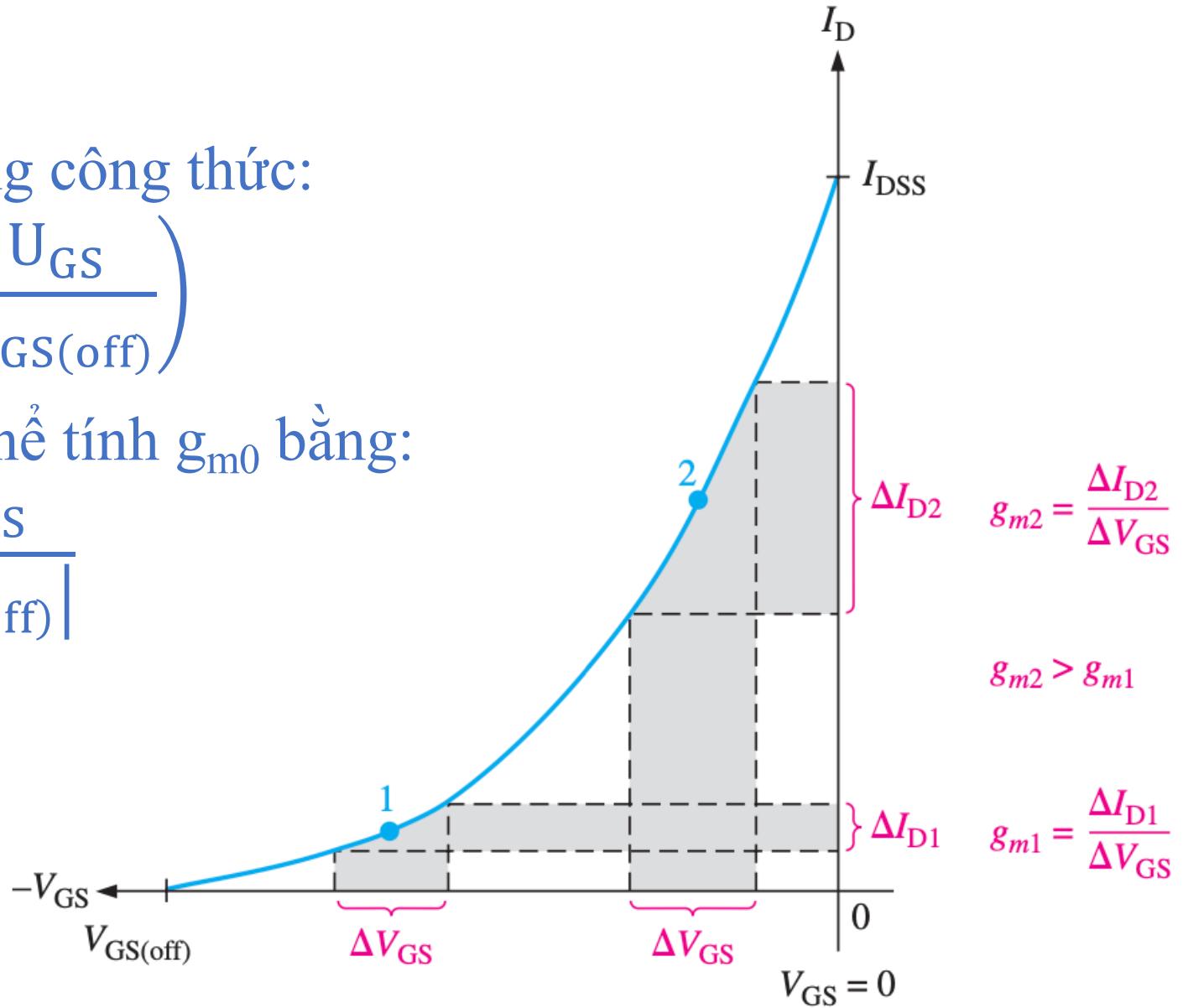
Bản so

- Biết g_{m0} , có thể tính g_m bằng công thức:

$$g_m \approx g_{m0} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(\text{off})}} \right)$$

- Nếu không biết g_{m0} , ta có thể tính g_{m0} bằng:

$$g_{m0} \approx \frac{2I_{DSS}}{|U_{GS(\text{off})}|}$$



Các tham số điện quan trọng

Bản
so
tỷ
hảo

- Giống như các loại linh kiện bán dẫn khác => có các thông số như:

$I_{D(max)}$, $U_{DS(max)}$, $P_{D(max)}$, ...

- Các thông số đặc thù:
 - Dòng I_{DSS}
 - Áp cắt/thắt kênh $U_{GS(off)} = -U_P$
 - Độ hổ dãn g_m
 - Điện trở vào r_G
 - Nội trở kênh r_D
 - Điện dung ký sinh C_{GS}, C_{GD}

Phân cực cho JFET

Bản
số
20

- Bản chất công việc: tạo ra một U_{GS} nào đó để điều tiết độ mở kênh, đưa FET vào chế độ chờ
- Các kiểu phân cực:
 - ✓ Phân cực bằng điện áp cố định
 - ✓ Tự phân cực
 - ✓ Phân cực bằng phân áp
- Với mỗi kiểu, cần xác định:
 - ✓ Vị trí điểm làm việc tĩnh Q
 - ✓ Độ ổn định của điểm Q khi thông số của FET thay đổi (do nhiệt độ, do sự đồng đều của linh kiện)
 - ✓ Q gọi là ổn định khi I_{DQ} ít thay đổi

Phân cực cho JFET

Bản•Số

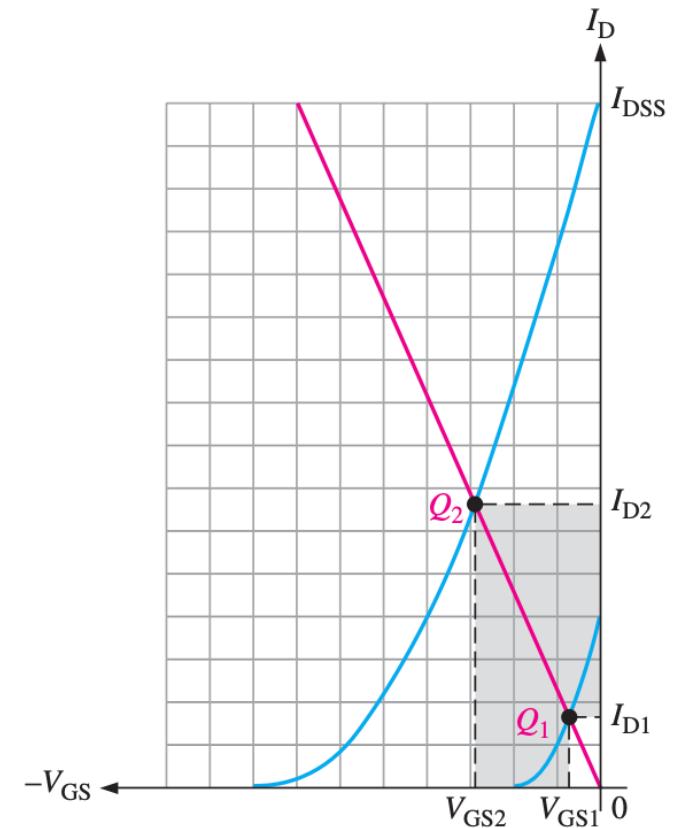
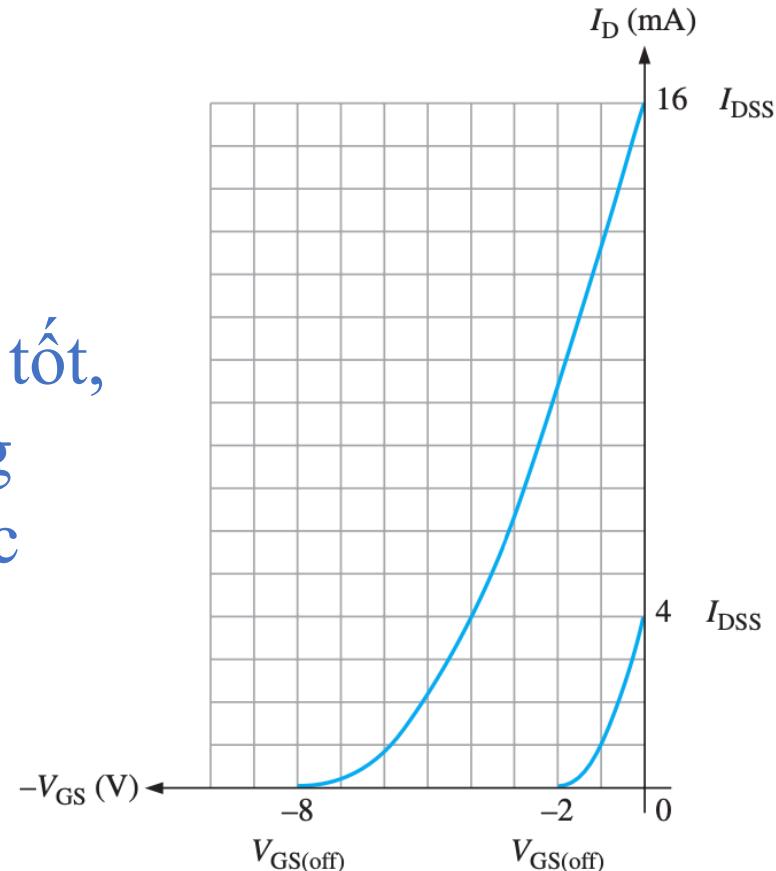
Độ ổn định của mạch phân cực là rất quan trọng vì JFET thường kém đồng đều. Ví dụ:

✓ Cùng là 2N5459

✓ I_{DSS} : 4 ÷ 16 (mA)

✓ $U_{GS(off)}$: -2 ÷ -4 (V)

=> Nếu phân cực không tốt, thay 10 JFET vào cùng 1 mạch có thể thu được 10 điểm Q khác nhau

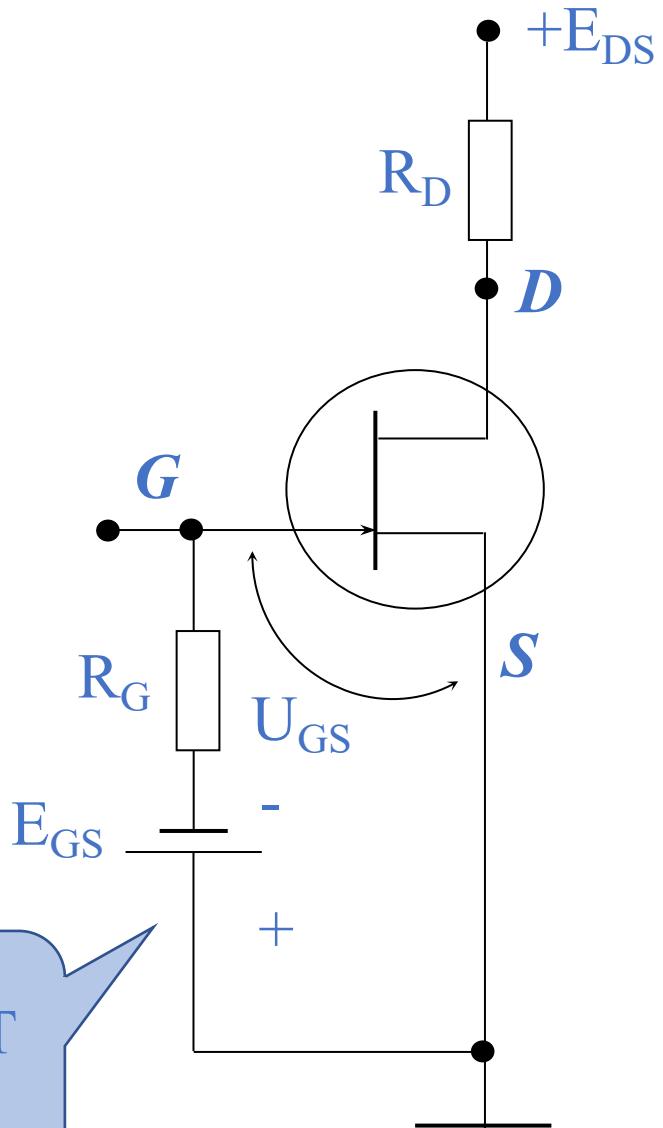


Phân cực cho JFET

Bản sao Phân cực bằng điện áp cố định:

- Dùng E_{GS} nối tới G và S qua R_G
 \Rightarrow tạo U_{GSQ}
- Xác định Q:
 - $U_{GSQ} = -E_{GS}$ (vì $I_G = 0$)
 - $U_{DSQ} = E_{DS} - I_D \cdot R_D$
 - I_{DQ} : xem phương trình Shockley \Rightarrow Xác định được vị trí điểm của
điểm Q(U_{GSQ} , I_{DQ} , U_{DSQ})

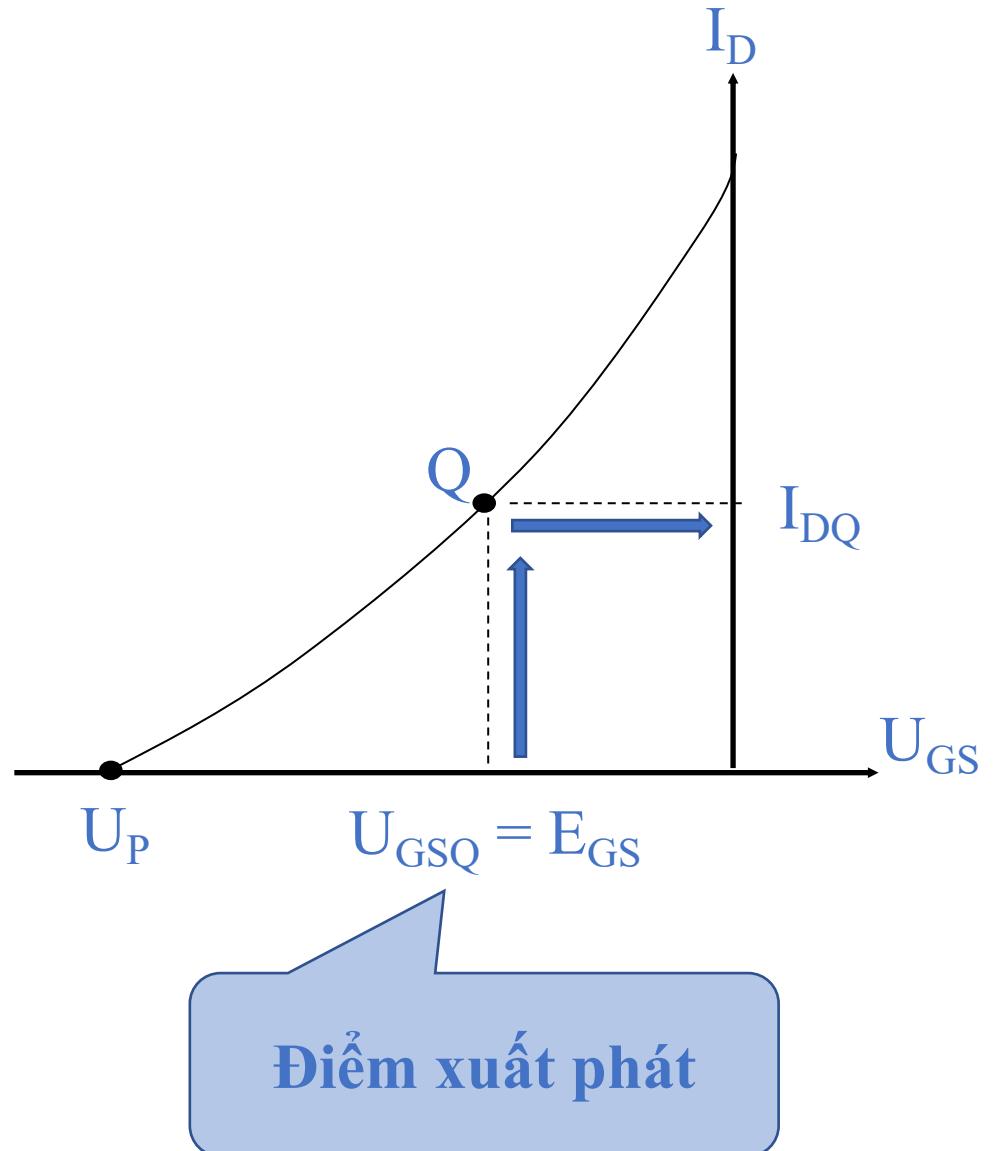
Với JFET
kênh N



Phân cực cho JFET

Bản sao Phân cực bằng điện áp cố định:

- Có thể dùng đặc tuyến truyền đạt để xác định Q
- Độ ổn định: kém...?

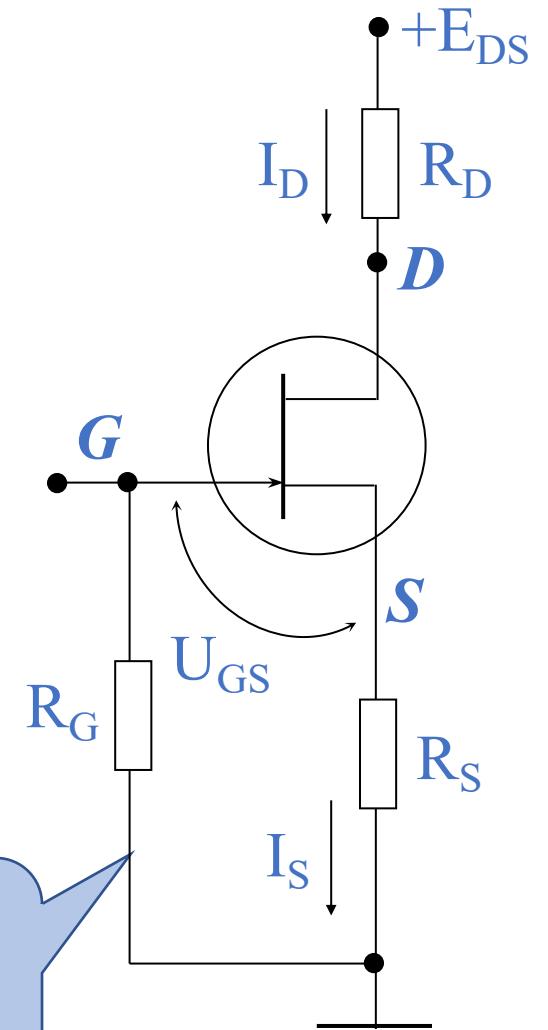


Phân cực cho JFET

Bản
Tự phân cực:

- Dòng $I_D = I_S$ chảy qua FET gây sụt áp trên R_S ; Sụt áp trên R_S tạo ra U_{GSQ}
- Xác định Q:
 - $V_G = 0$ (vì $I_G = 0$)
 - $V_S = I_S \cdot R_S = I_D \cdot R_S$
 - $\Rightarrow U_{GS} = -I_D \cdot R_S$
 - Kết hợp với phương trình Shockley được phương trình bậc 2 của $U_{GS} \Rightarrow$ có 2 nghiệm
 - \Rightarrow chọn nghiệm $|U_{GS}| < |U_P|$
 - \Rightarrow Tính được $U_{DSQ} = E_{DS} - I_{DQ} \cdot (R_D + R_S)$
 - \Rightarrow Xác định được vị trí điểm Q(U_{GSQ}, I_{DQ}, U_{DSQ})

Với JFET
kênh N



Phân cực cho JFET

Bản
Tự phân cực: (giải thích công thức)

$$I_D = -\frac{U_{GS}}{R_S}$$

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right)^2$$

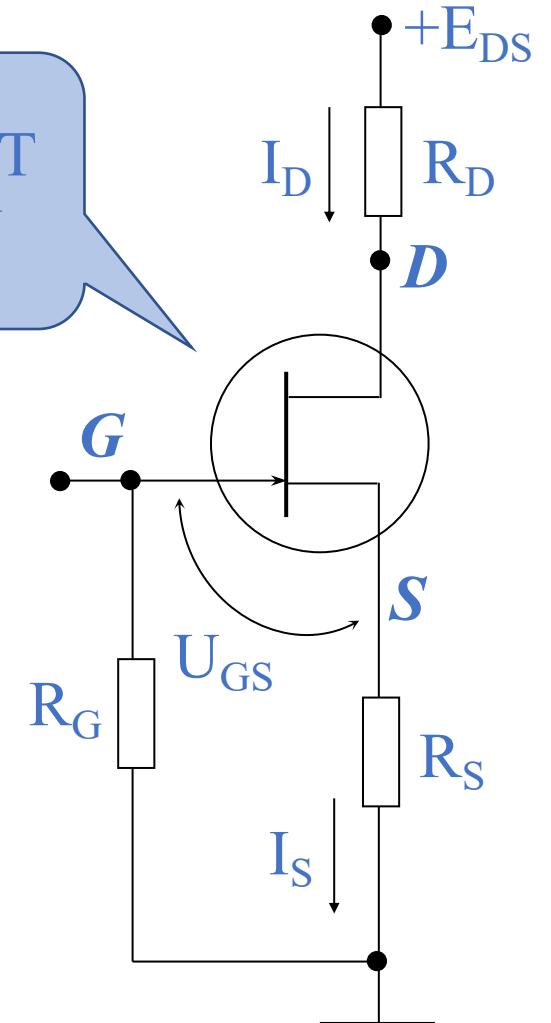
$$\frac{R_S I_{DSS}}{U_P^2} U_{GS}^2 + U_{GS} \left(1 - \frac{2 R_S I_{DSS}}{U_P}\right) + R_S I_{DSS} = 0$$

=> Phương trình: $a U_{GS}^2 + b U_{GS} + c = 0$

$$\begin{cases} a = \frac{R_S I_{DSS}}{U_P^2} \\ b = \left(1 - \frac{2 R_S I_{DSS}}{U_P}\right) \\ c = R_S I_{DSS} \end{cases}$$

$$=> U_{GS1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad \text{☞ chọn nghiệm } |U_{GS}| < |U_P|$$

Với JFET
kênh N

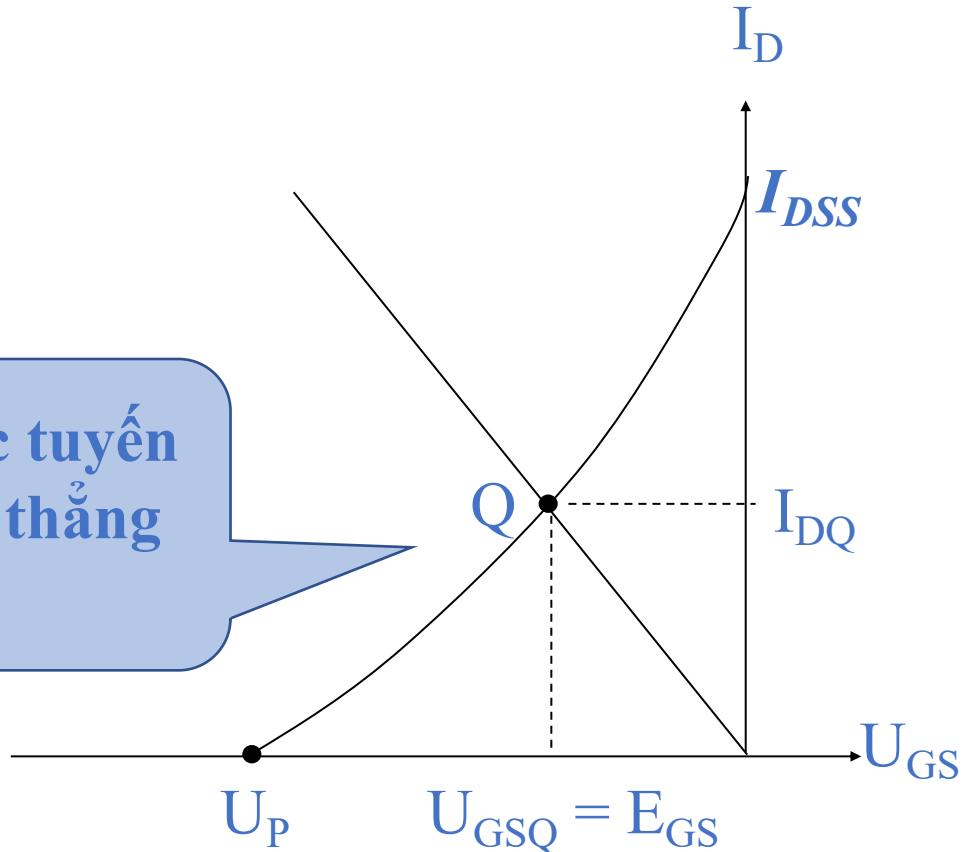


Phân cực cho JFET

Bản Tự phân cực:

- Có thể dùng đặc tuyến truyền đạt để xác định Q
- Độ ổn định: khá...?

Q là giao điểm của đặc tuyến
truyền đạt với đường thẳng
 $U_{GS} = - I_D \cdot R_S$



Ví dụ Bản so thảo

Cho mạch điện như hình vẽ, $I_D=5\text{mA}$. Xác định V_{DS}

Giải

$$V_S = I_D R_S = (5\text{mA})(220\Omega) = 1.1\text{V}$$

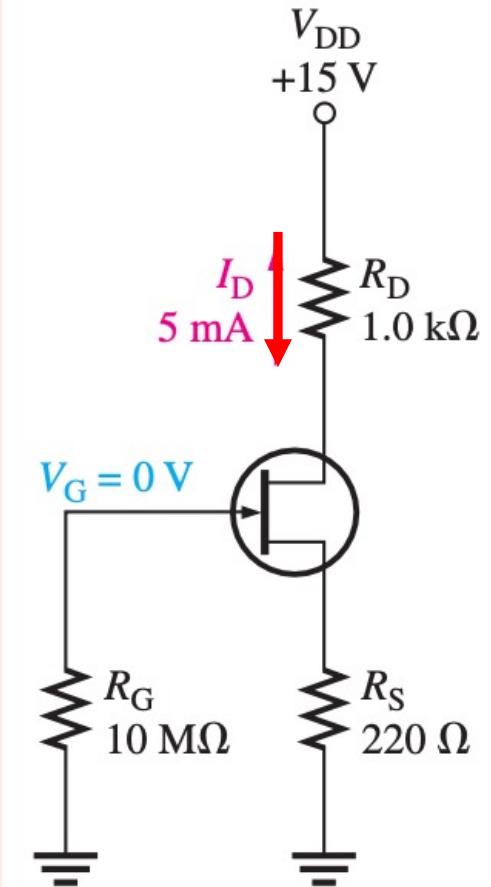
$$V_D = V_{DD} - I_D R_D = 15\text{V} - (5\text{mA})(1.0\text{k}\Omega) = 15\text{V} - 5\text{V} = 10\text{V}$$

Do đó,

$$V_{DS} = V_D - V_S = 10\text{V} - 1.1\text{V} = 8.9\text{V}$$

Do $V_G=0\text{ V}$,

$$V_{GS} = V_G - V_S = 0\text{V} - 1.1\text{V} = -1.1\text{V}$$



Ví dụ

Bản so thảo

Tìm điểm công tác tĩnh Q của JFET kênh N với phương pháp tự phân cực, biết $I_{DSS} = 8\text{mA}$, $U_P = -6\text{V}$, $E_{DS} = 20\text{V}$, $R_D = 3,3\text{K}\Omega$, $R_S = 1\text{K}\Omega$, $R_G = 1\text{M}\Omega$.

Giải: Phương trình: $aU_{GS}^2 + bU_{GS} + c = 0$

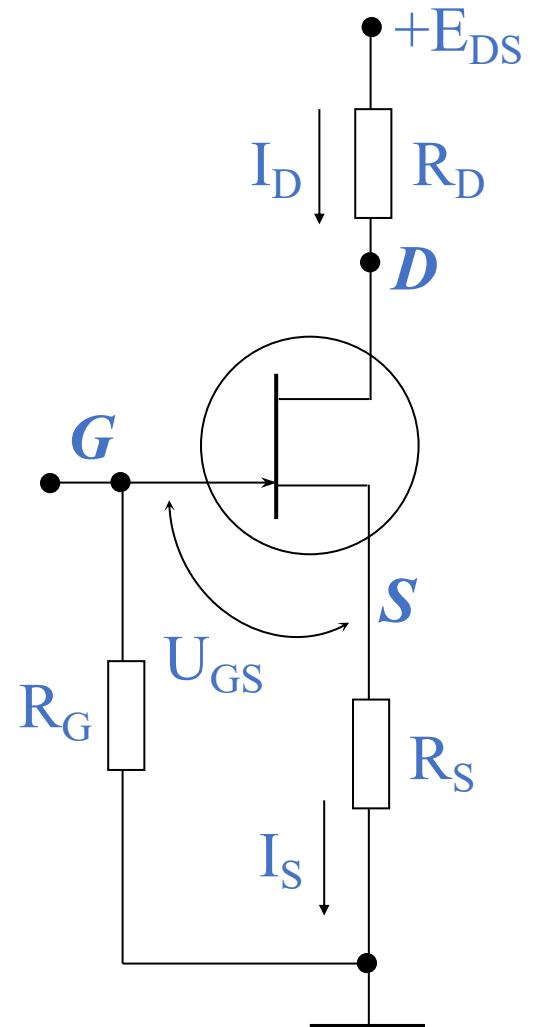
$$\begin{cases} a = \frac{R_S I_{DSS}}{U_P^2} = \frac{10^3 \Omega \cdot 8\text{mA}}{(-6\text{V})^2} = 0.22 \\ b = \left(1 - \frac{2 \times 10^3 \Omega \times 8\text{mA}}{-6\text{V}}\right) = 3.66 \\ c = R_S I_{DSS} = 10^3 \Omega \cdot 8\text{mA} = 8 \end{cases}$$

$$\Rightarrow U_{GS1} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = -2.6\text{V} \quad \text{chọn do nghiệm } |U_{GS}| < |U_P|$$

$$\Rightarrow U_{GS2} = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = -14\text{V} \quad \text{loại do } |U_{GS}| > |U_P|$$

$$I_D = -\frac{U_{GS}}{R_S} = -\frac{-2.6}{1\text{K}\Omega} = 2.6\text{mA}$$

$$E_{DS} = U_{DSQ} + I_{DQ}(R_D + R_S) \Rightarrow U_{DSQ} = 8.8\text{V}$$



Phân cực cho JFET

Bản sao

Phân cực bằng phân áp:

- U_{GS} tạo ra bằng phân áp + sụt áp trên R_S

- Xác định Q:

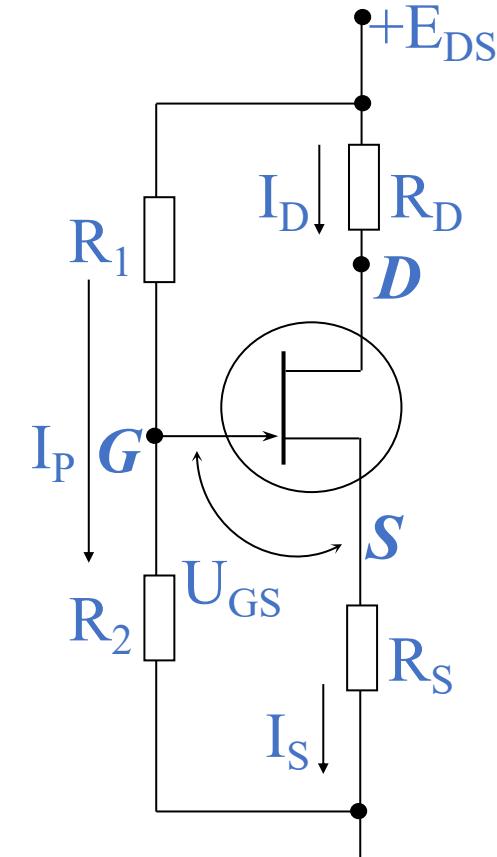
- $V_G = E_{DS} \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$ (vì $I_G = 0$)

- $V_S = I_S \cdot R_S = I_D \cdot R_S$

$$\Rightarrow U_{GS} = V_G - I_D \cdot R_S$$

- Kết hợp với phương trình Shockley được phương trình bậc 2 của $U_{GS} \Rightarrow$ có 2 nghiệm \Rightarrow chọn nghiệm $|U_{GS}| < |U_P|$

$$\Rightarrow$$
 Tính được $U_{DSQ} = E_{DS} - I_{DQ} \cdot (R_D + R_S)$

$$\Rightarrow$$
 Xác định được vị trí điểm Q(U_{GSQ} , I_{DQ} , U_{DSQ})

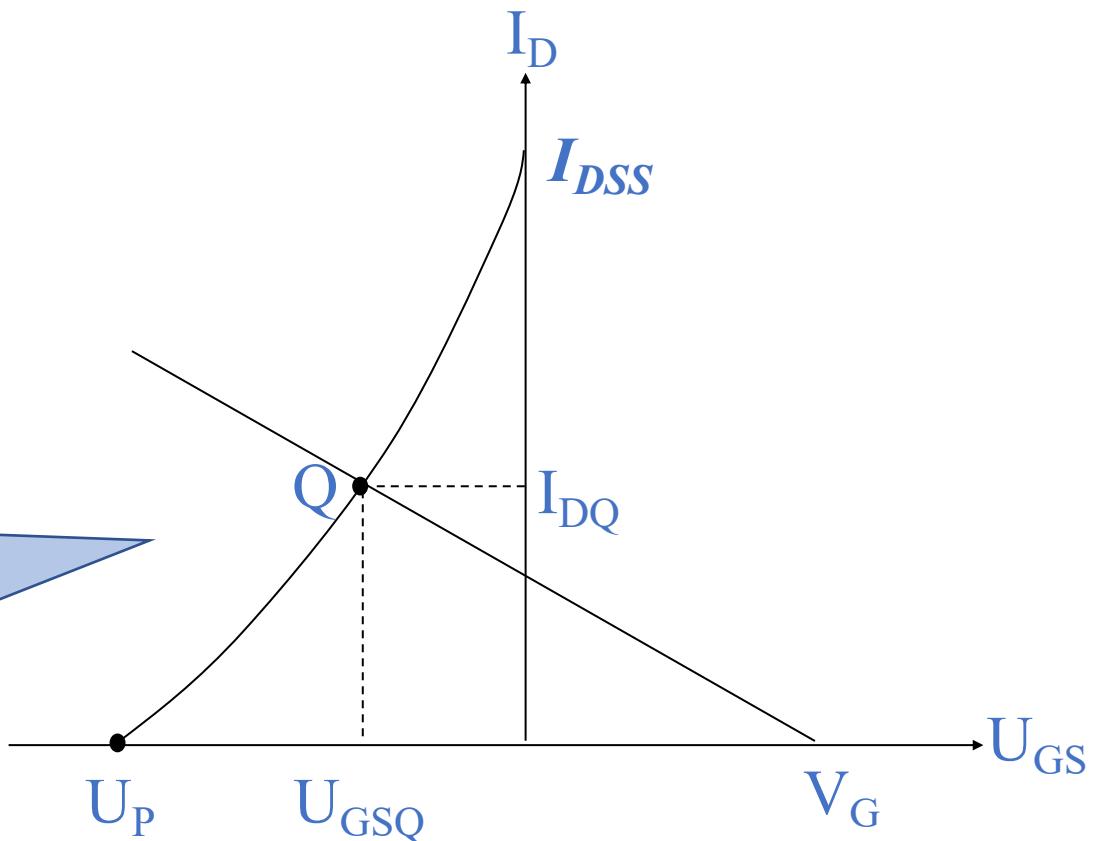
Với JFET
kênh N

Phân cực cho JFET

Bản sao
Phân cực bằng phân áp:

- Có thể dùng đặc tuyến truyền đạt để xác định Q
- Độ ổn định: tốt...?

Q là giao điểm của đặc tuyến
truyền đạt với đường thẳng
 $U_{GS} = V_G - I_D \cdot R_S$



Ví dụ

Bản•Sơ thảo

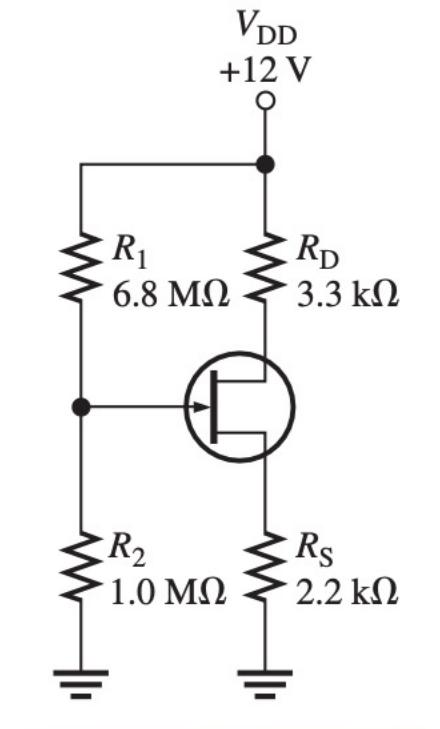
Cho mạch điện như hình vẽ. Xác định I_D và V_{GS} với $V_D = 7V$

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R_D} = \frac{12V - 7V}{3.3k\Omega} = \frac{5V}{3.3k\Omega} = 1.52mA$$

$$V_S = I_D R_S = (1.52mA)(2.2k\Omega) = 3.34V$$

$$V_G = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{DD} = \left(\frac{1M\Omega}{7.8M\Omega} \right) 12V = 1.54V$$

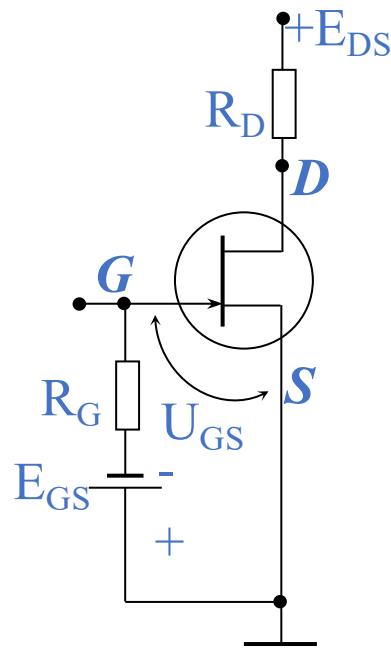
$$V_{GS} = V_G - V_S = 1.54V - 3.34V = -1.8V$$



Phân cực cho JFET

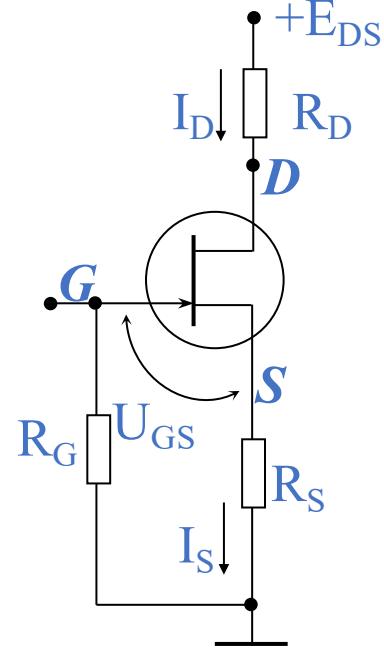
Điện áp cố định

Kém ổn định



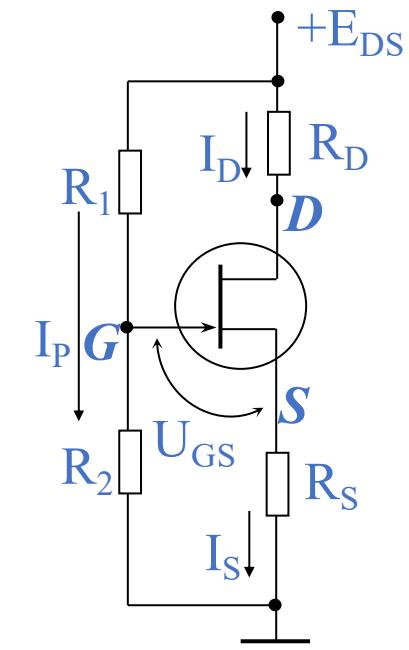
Tự phân cực

Ôn định khá



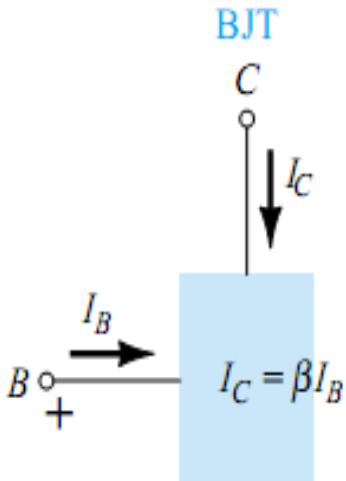
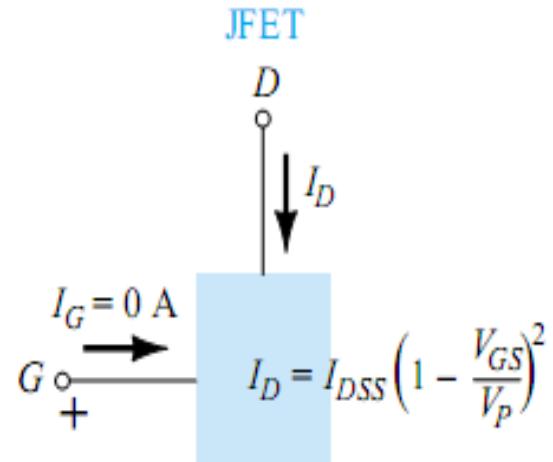
Phân áp

Ôn định tốt



So sánh JFET và BJT

BẮT
SO



(a)

(b)

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

Nội dung chương

- Bản Sơ
- Giới thiệu
 - Transistor trường JFET
 - Transistor trường MOSFET

Transistor trường MOSFET

- Bản thảo
- Cấu tạo của MOSFET
 - Nguyên lý làm việc
 - Đặc tuyến của MOSFET
 - Phương trình Shockley
 - Các tham số điện quan trọng
 - MOSFET kết hợp – CMOS
 - Phân cực cho MOSFET

Cấu tạo của MOSFET

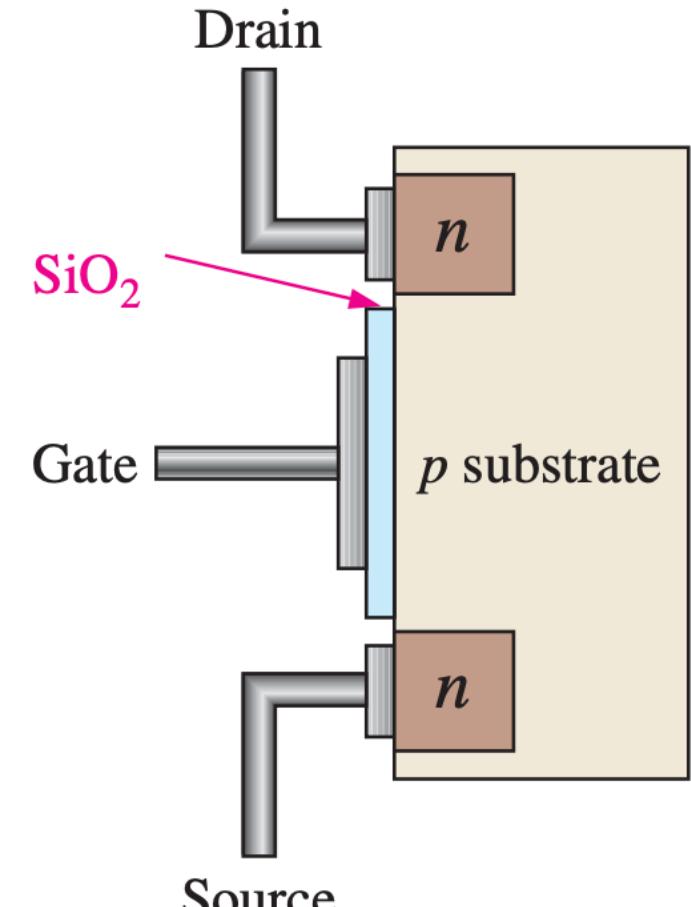
Bản
so
tạo

- MOSFET = Metal Oxide Semiconductor FET
- Điểm khác JFET: không có tiếp xúc PN giữa G với kênh dẫn. Thay vào đó cực G (kim loại) được cách ly với kênh (bán dẫn) bằng lớp cách điện (ô-xít).
Nếu G làm từ silicon đa tinh thể (polycrystal silicon) thay vì kim loại
=> gọi là IGFET (**Insulated - Gate FET**)
- MOSFET có 2 loại:
 - Kênh cảm ứng (Enhancement) => E-MOSFET: khi $U_{GS} = 0$, giữa D và S không có kênh dẫn điện => thường được sử dụng rộng rãi
 - Kênh đặt sẵn (Depletion) => D-MOSFET: giữa D và S có sẵn kênh dẫn từ khi chế tạo => dẫn cả khi $U_{GS} = 0$

Cấu tạo của MOSFET kênh cảm ứng (E-MOSFET)

Bản
vẽ

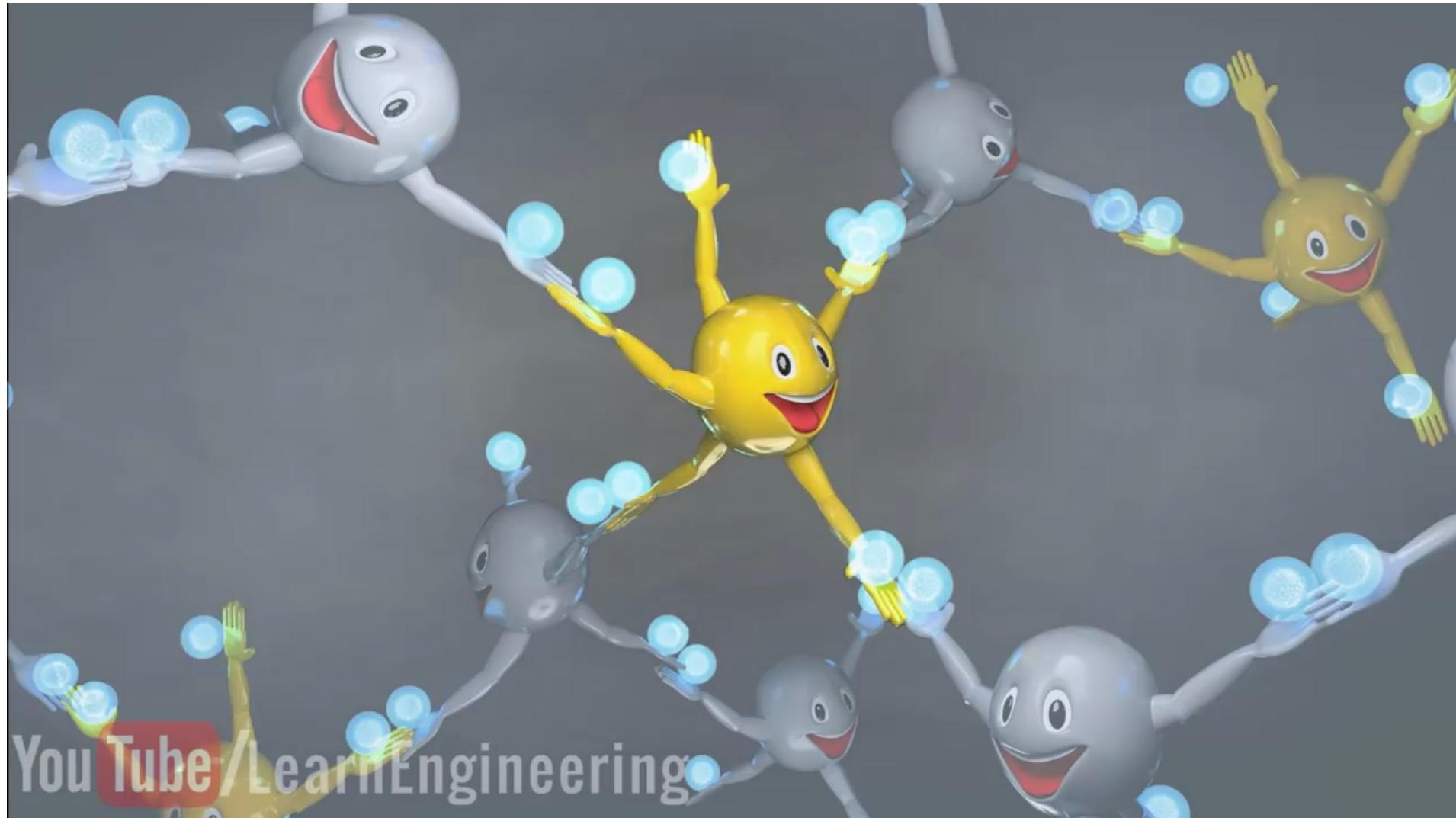
- Cấu trúc như hình vẽ, gồm:
 - ✓ Cực G: màng kim loại
 - ✓ Lớp SiO_2 : rất mỏng, cách điện giữa G và phần còn lại của FET
 - ✓ D và S: bán dẫn cùng loại, cấy vào đế (substrate)
 - ✓ Substrate (hay Body): bán dẫn loại khác so với D-S
- E-MOSFET kênh N sẽ có đế làm loại P và ngược lại.
- Chỉ hoạt động ở chế độ giàu



E-MOSFET kênh N

Cấu tạo của MOSFET

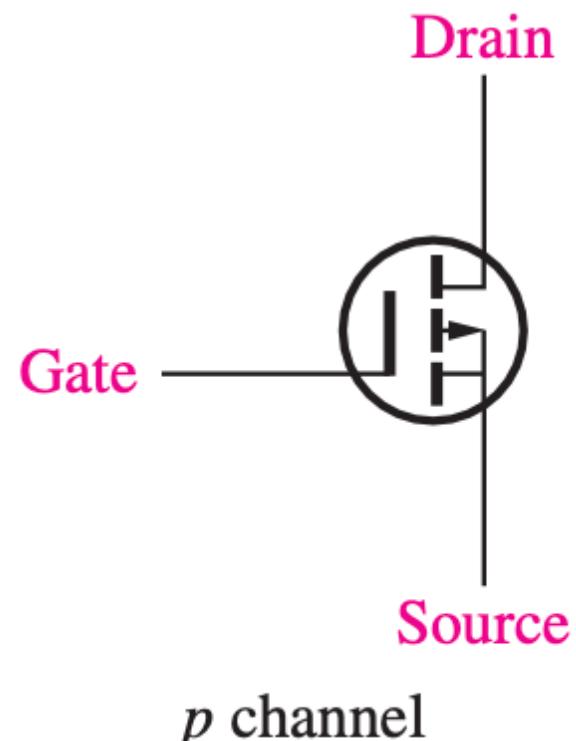
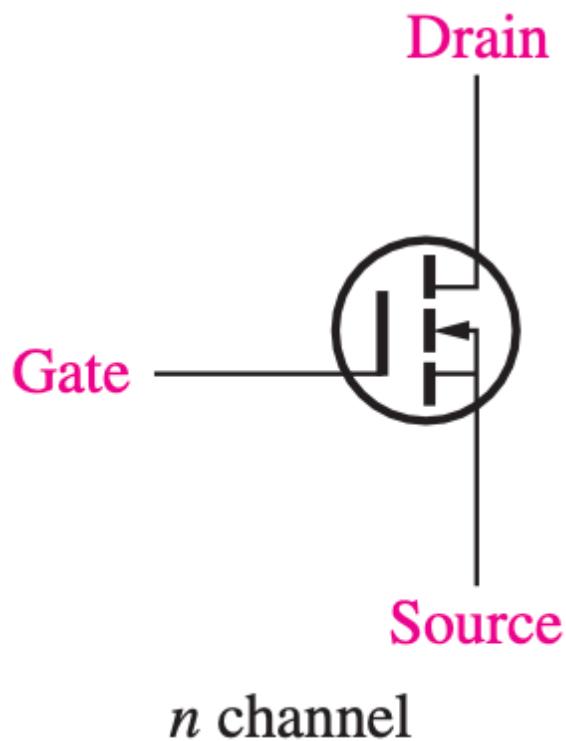
Bản sao



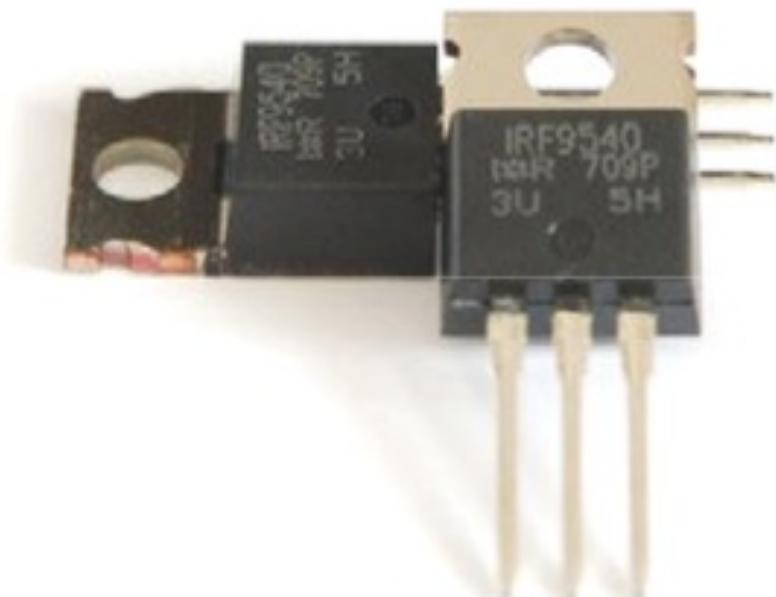
Cấu tạo của MOSFET kênh cảm ứng (E- MOSFET)

Bản số

Ký hiệu trong mạch điện

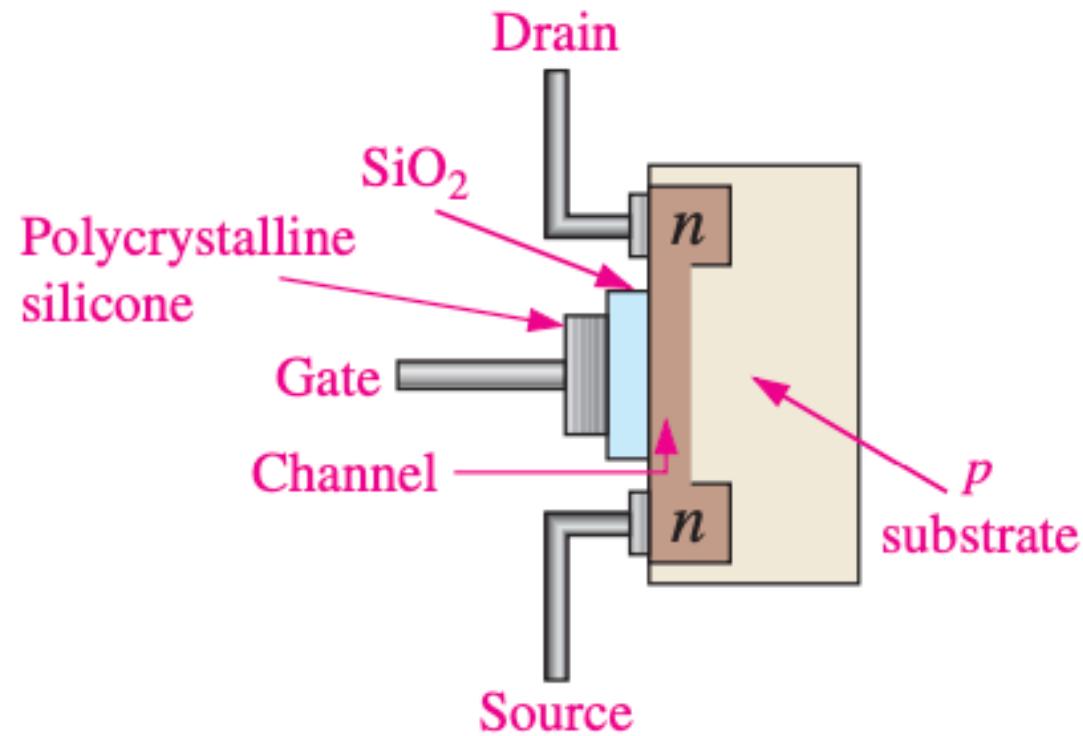


Ví dụ cặp E-MOSFET
kênh N (IRF540) và
kênh P (IRF9540)

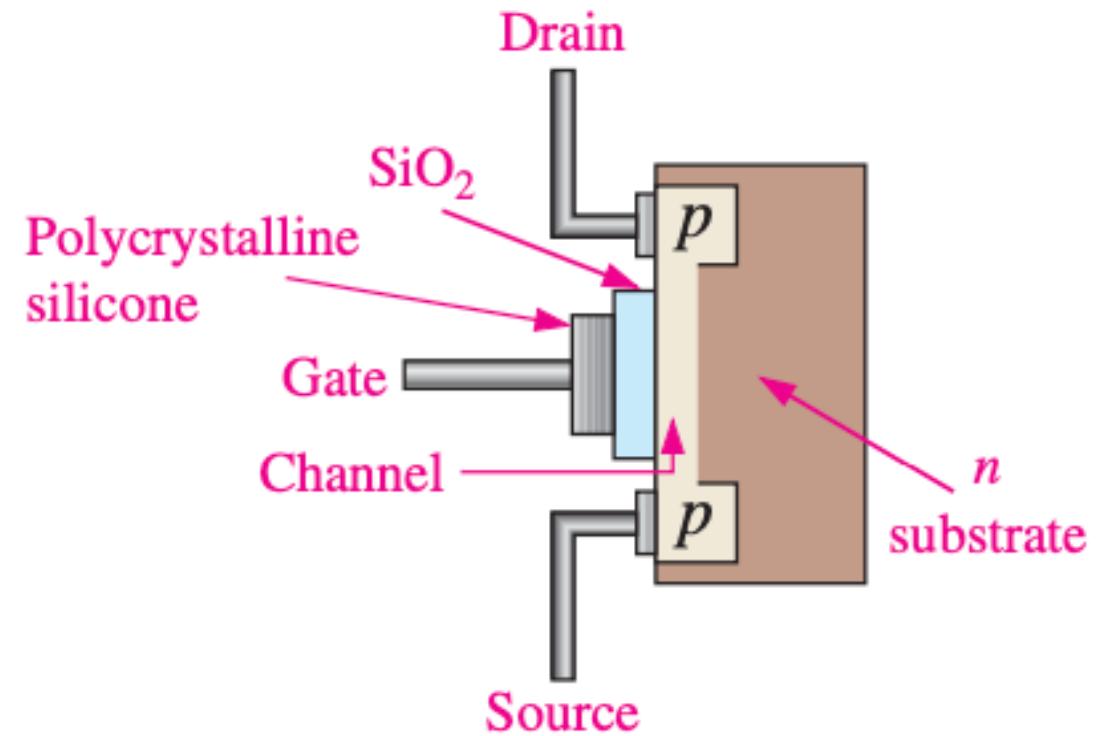


Cấu tạo của MOSFET kênh đặt sẵn (D- MOSFET)

- Bản ~~đo~~ tóm tắt
- Khác biệt cơ bản so với E-MOSFET: có sẵn kênh dẫn (mỏng) giữa D-S
 - Hoạt động được ở cả hai chế độ: giàu và nghèo



(a) *n* channel

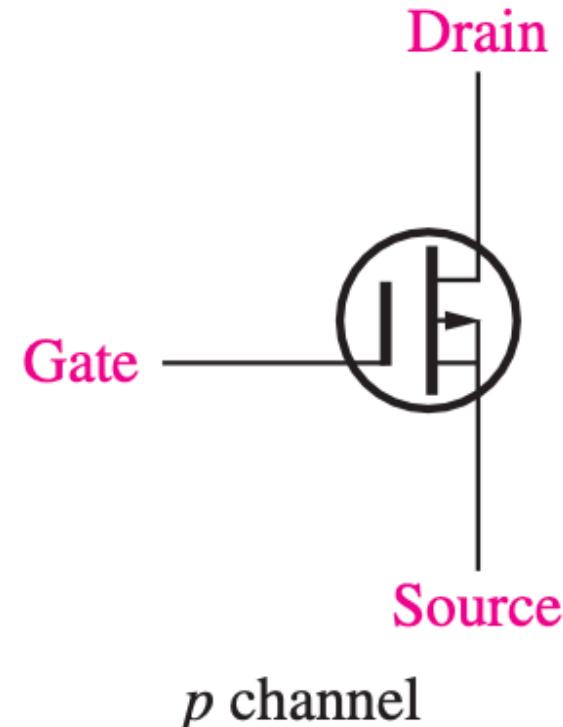
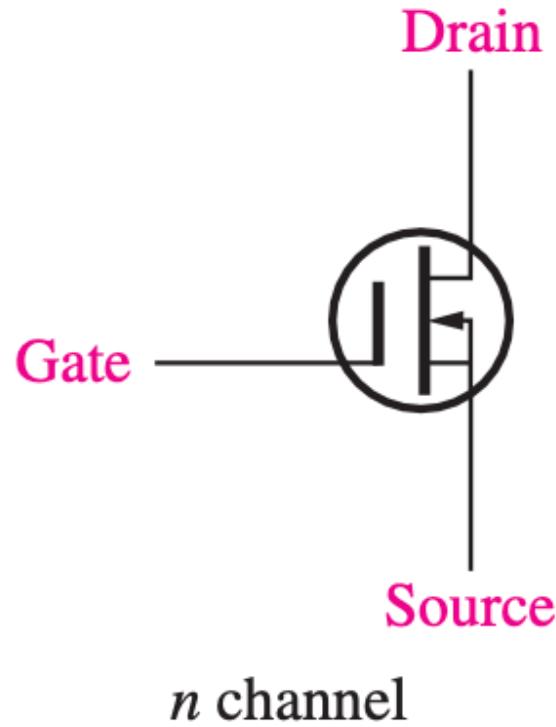


(b) *p* channel

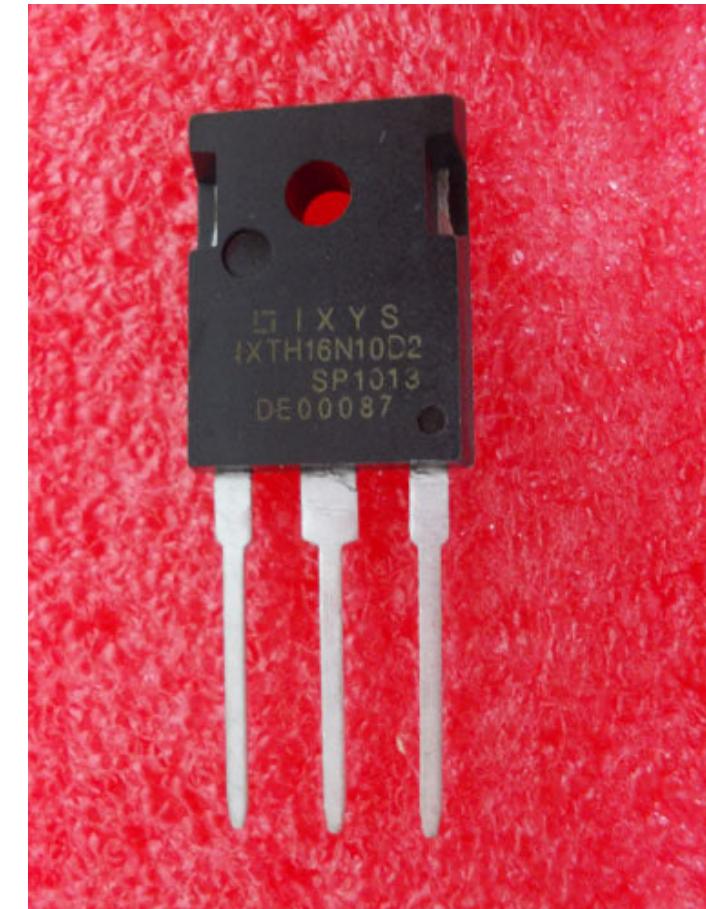
Cấu tạo của MOSFET kênh cảm ứng (D- MOSFET)

Ký hiệu trong mạch điện

Bản



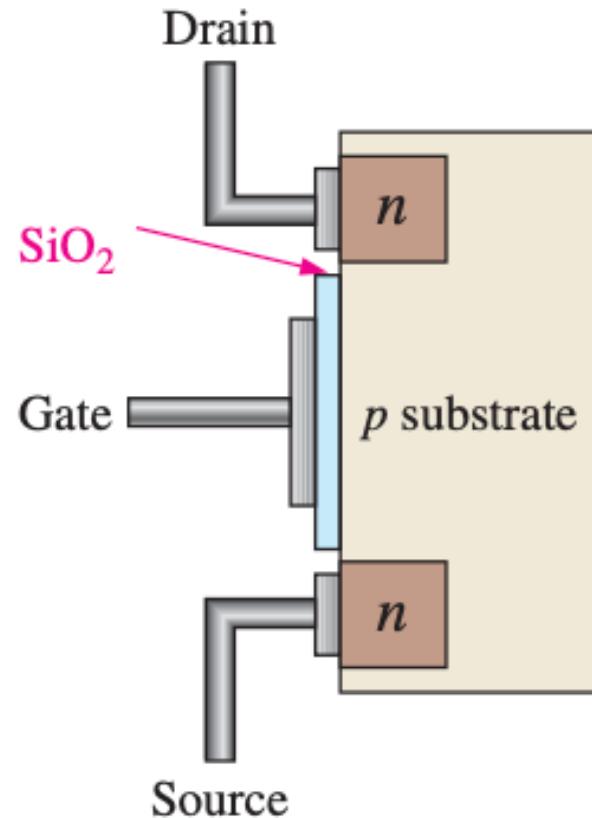
Ví dụ D-MOSFET kênh N
(IXTH16N10D2)



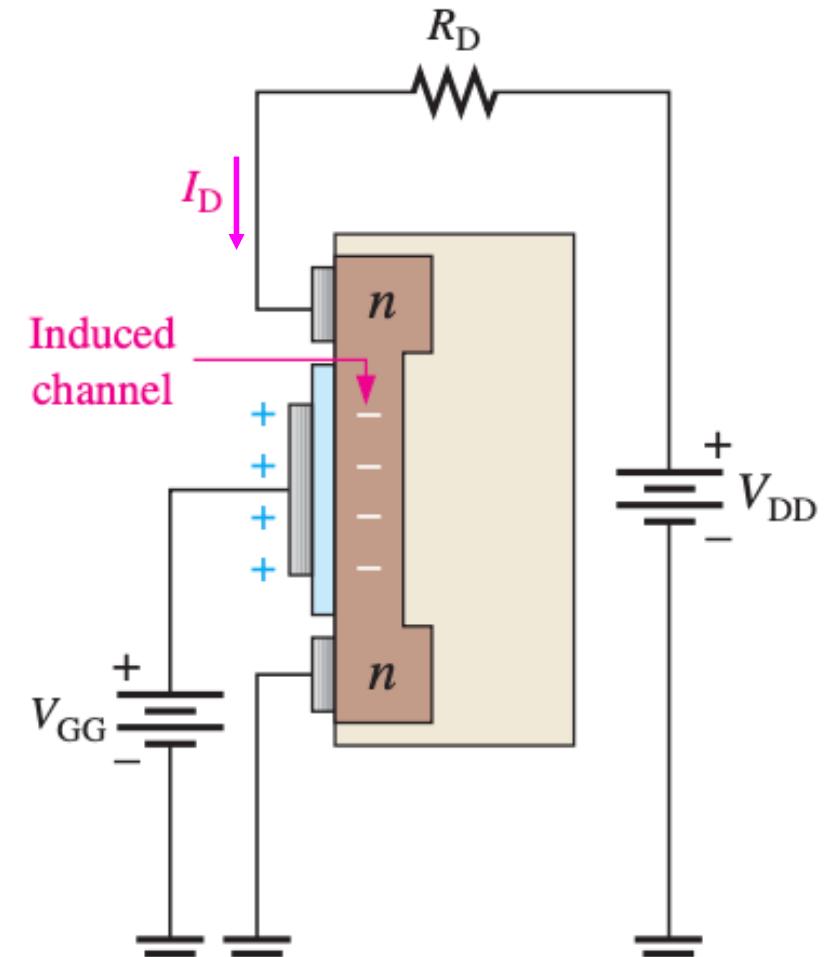
Nguyên lý làm việc

- Bản quyền © 2024
- Chung: cần phân cực phù hợp cho MOSFET
 - Với E-MOSFET kênh N: cần $U_{GS} > 0$.

Điện trường từ cực G đến S (S nối với B) hút e từ B về phía lớp SiO_2
 \Rightarrow khi đủ lớn ($= U_T$) sẽ tạo thành kênh nối D-S



(a) Basic construction



(b) Induced channel ($V_{GS} > V_{GS(\text{th})}$)

Nguyên lý làm việc

Với E-MOSFET kênh N (tiếp...):

Bản

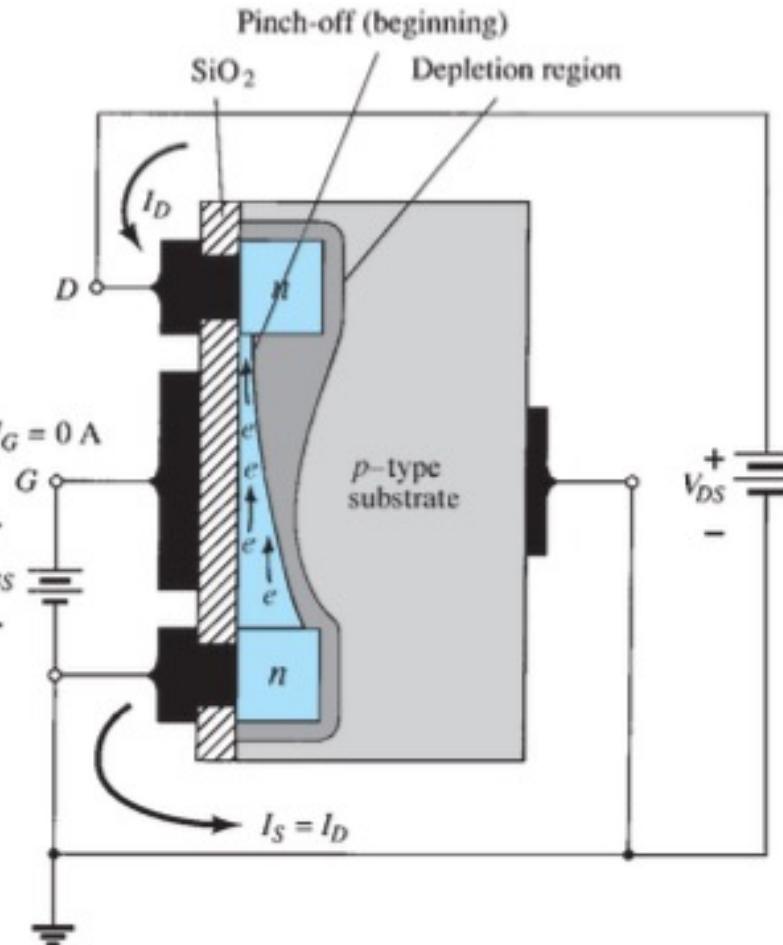
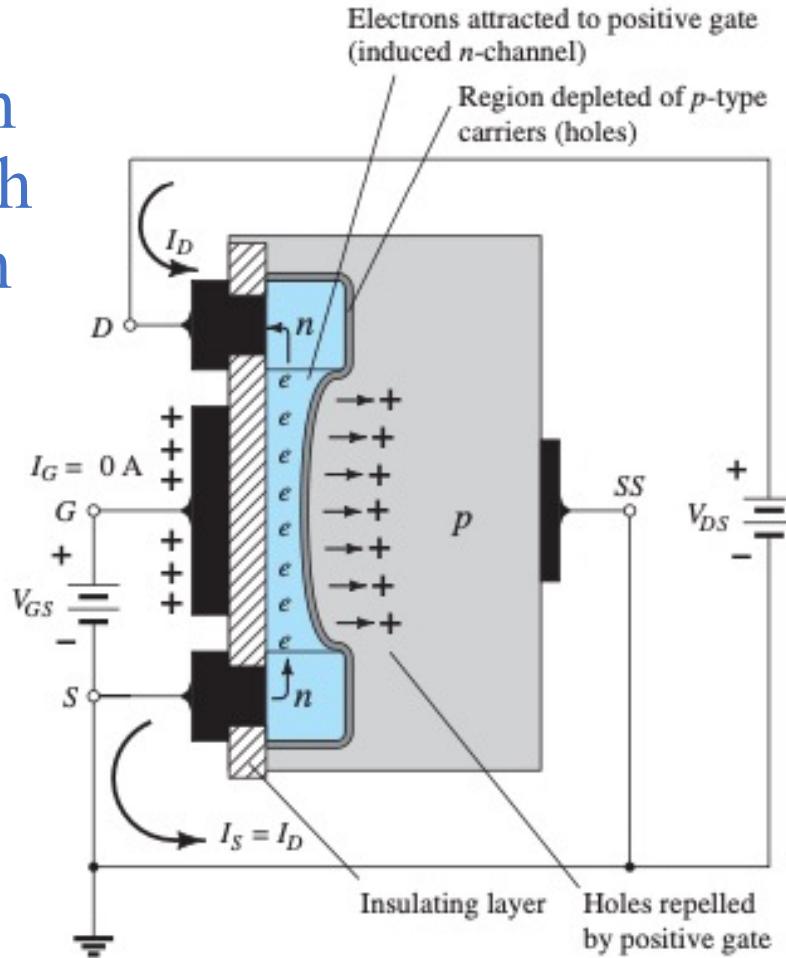
- ✓ Khi tăng dần U_{DS} , hiện tượng thắt kênh do vùng nghèo cũng xảy ra như trên JFET
 $\Rightarrow I_D$ bị bão hòa
- ✓ U_{GS} càng lớn \Rightarrow kênh càng dày \Rightarrow bị thắt chậm $\Rightarrow I_D$ bão hòa càng lớn $\Rightarrow U_{GS}$ điều khiển được dòng I_D bão hòa
- ✓ Khái niệm I_{DSS} ít khi được sử dụng (vì khi $U_{GS} = 0$ kênh chưa hình thành)

Bản

Hình
thành
kênh

Nguyên lý làm việc

Với E-MOSFET kênh N (tiếp...):

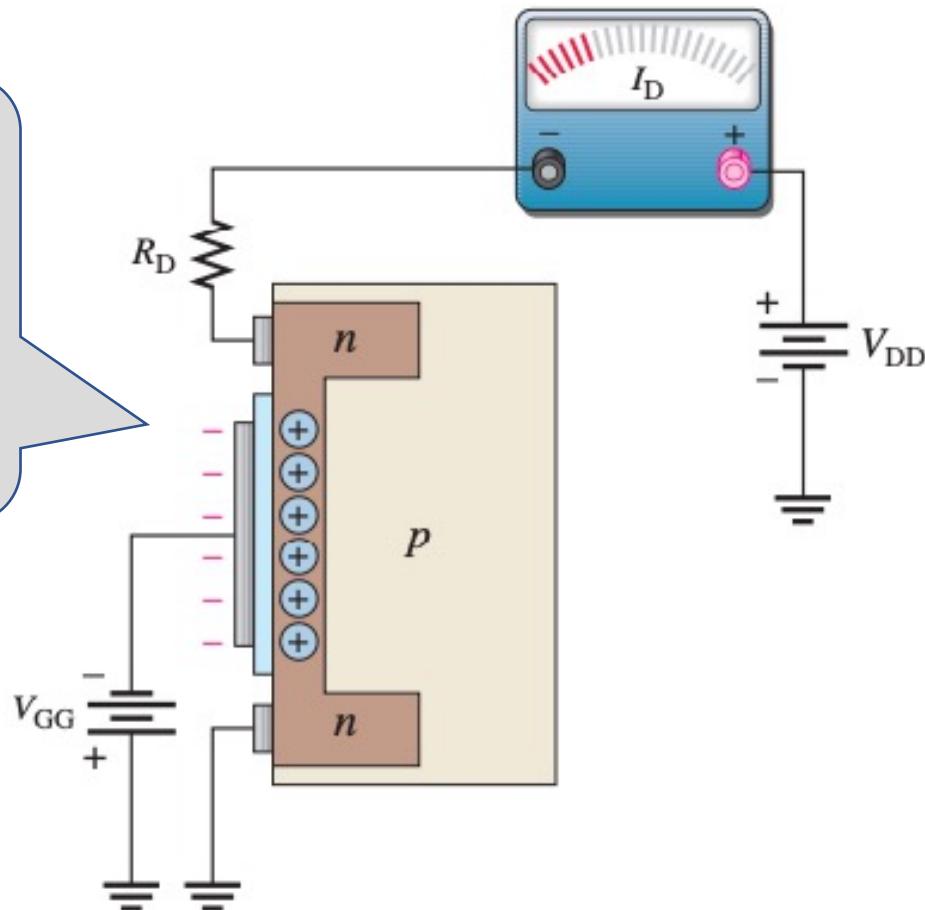


Thay đổi
kênh và
vùng
nghèo khi
tăng mức
 V_{DS} với
 V_{GS} cố
định

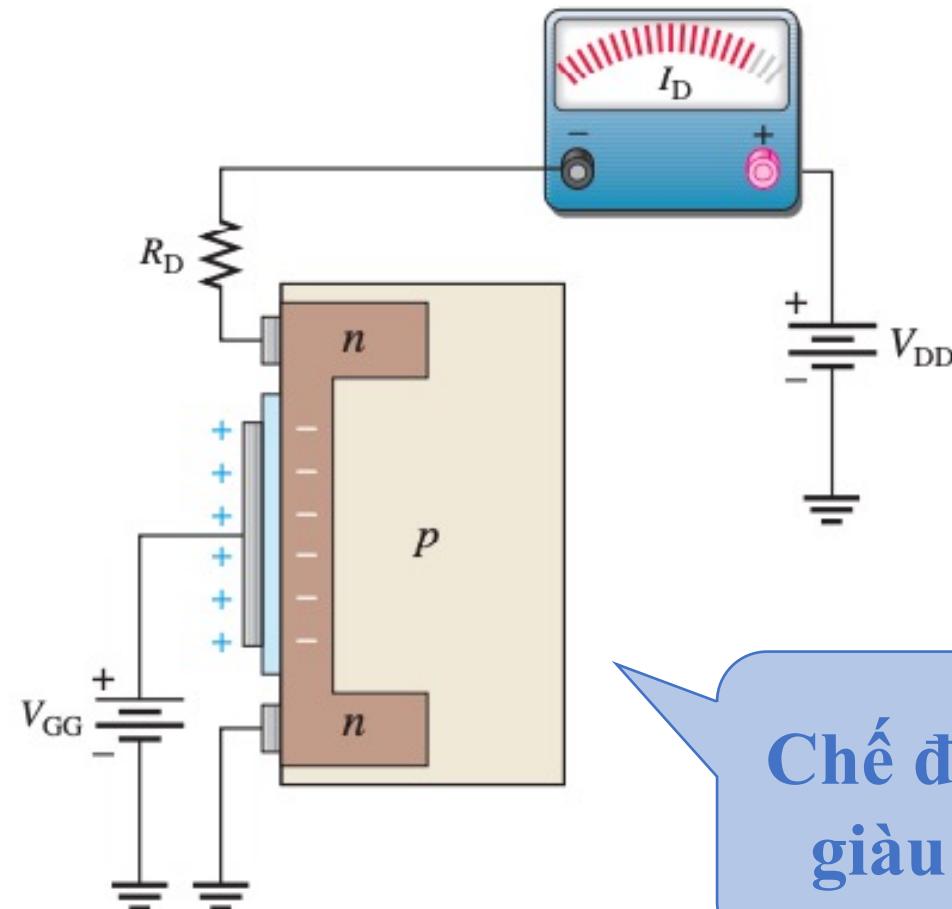
Nguyên lý làm việc

Với D-MOSFET kênh N: U_{GS} có thể $<$, $=$, > 0

Dẫn
Chế độ
nghèo
(chế độ
chính)



(a) Depletion mode: V_{GS} negative and less than $V_{GS(off)}$



(b) Enhancement mode: V_{GS} positive

Chế độ
giàu

Nguyên lý làm việc

Với D-MOSFET kênh N (tiếp...):

- Bản
- Hoạt động giống E-MOSFET khi kênh đã hình thành
 - Khi tăng dần U_{DS} , hiện tượng thắt kênh do vùng nghèo cũng xảy ra
 $\Rightarrow I_D$ bị bão hòa
 - U_{GS} điều khiển dòng I_D bão hòa:
 - U_{GS} càng dương \Rightarrow kênh càng dày \Rightarrow bị thắt chậm $\Rightarrow I_D$ bão hòa càng lớn
 - $U_{GS} = 0 \Rightarrow I_D$ bão hòa = I_{DSS}
 - U_{GS} càng âm \Rightarrow kênh càng mỏng \Rightarrow bị thắt nhanh $\Rightarrow I_D$ bão hòa càng nhỏ
 - Khi U_{GS} đạt đến $U_{GS(off)}$ \Rightarrow kênh bị thắt hoàn toàn $\Rightarrow U_{GS(off)}$ còn gọi là điện áp khóa kênh

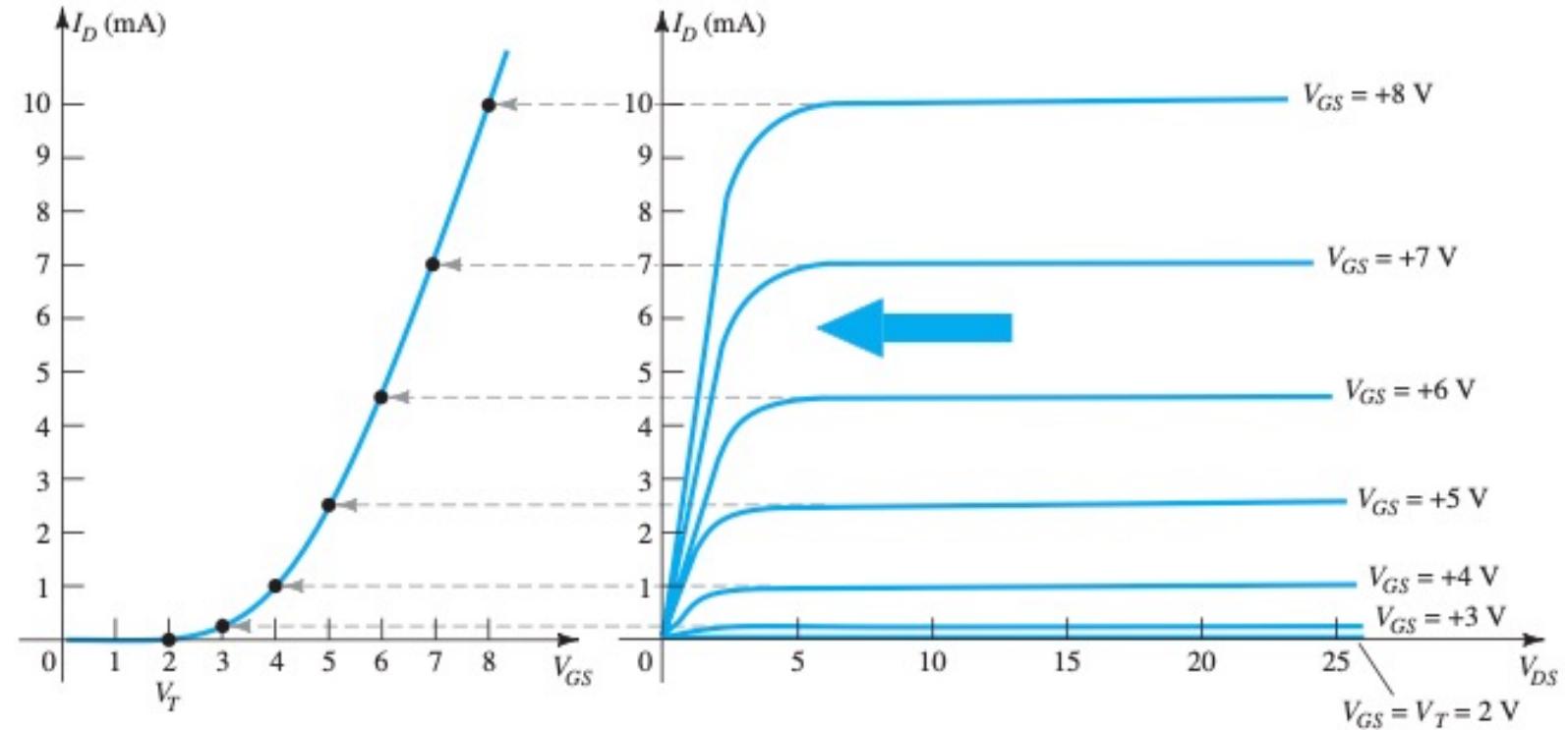
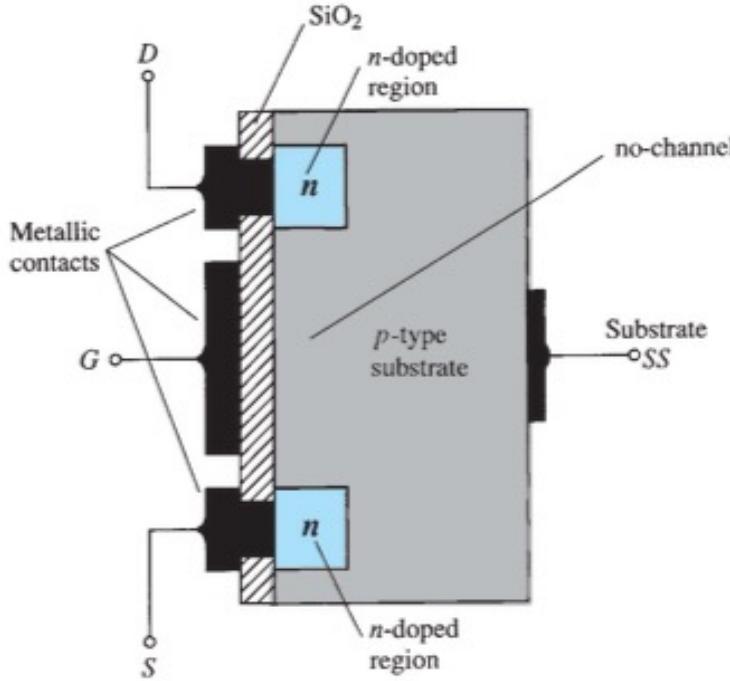
Đặc tuyến của MOSFET

Bản Sơ

Ta cũng quan tâm đến 2 đặc tuyến:

- Họ đặc tuyến ra hay đặc tuyến cực máng (Drain characteristic): mô tả quan hệ giữa I_D và U_{DS} ứng với các U_{GS} khác nhau
- Đặc tuyến truyền đạt (transfer characteristic): mô tả quan hệ điều khiển của U_{GS} đối với I_D
- Dự đoán khi so với JFET:
 - Cùng dựa trên hiện tượng thắt kênh, dùng U_{GS} điều khiển dòng I_D bão hòa
=> các đặc tuyến có chung dạng đường cong
 - Điện áp mở/đóng kênh là khác nhau => các đặc tuyến cắt các trục tọa độ tại các điểm khác nhau

Đặc tuyến của E-MOSFET (kênh N)

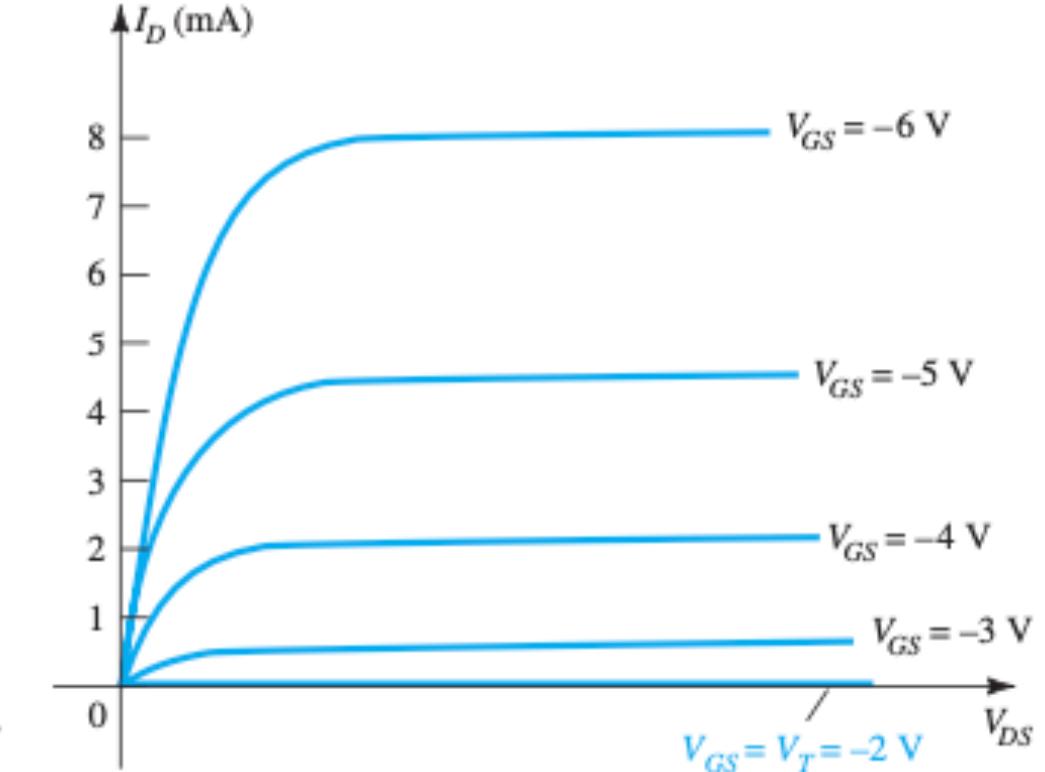
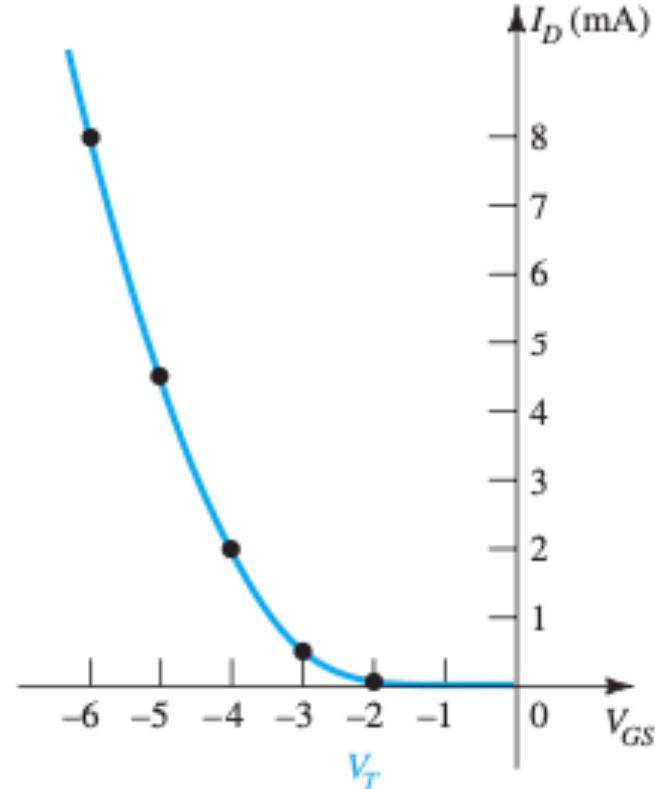
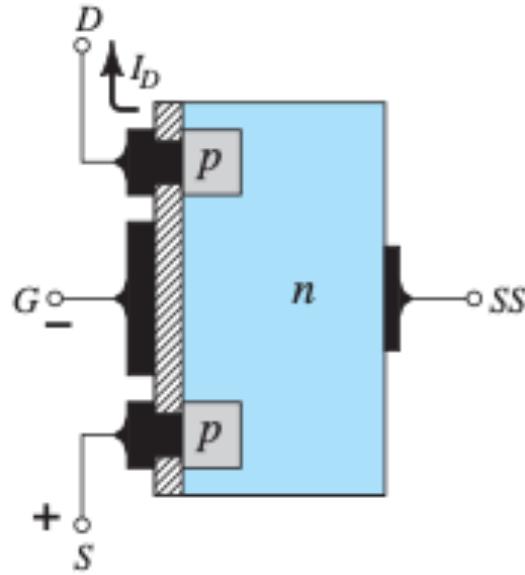


Đặc tuyến truyền đạt

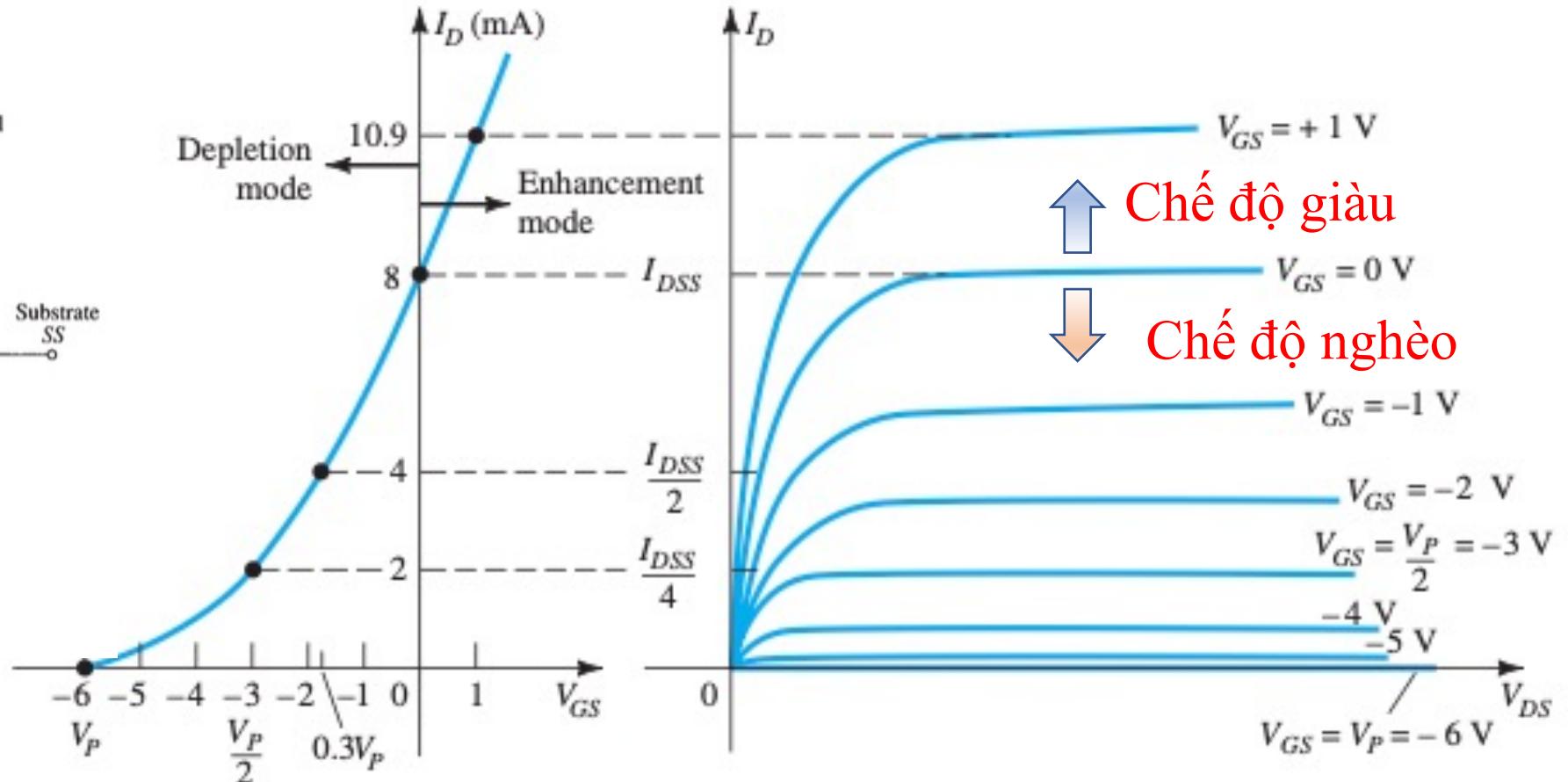
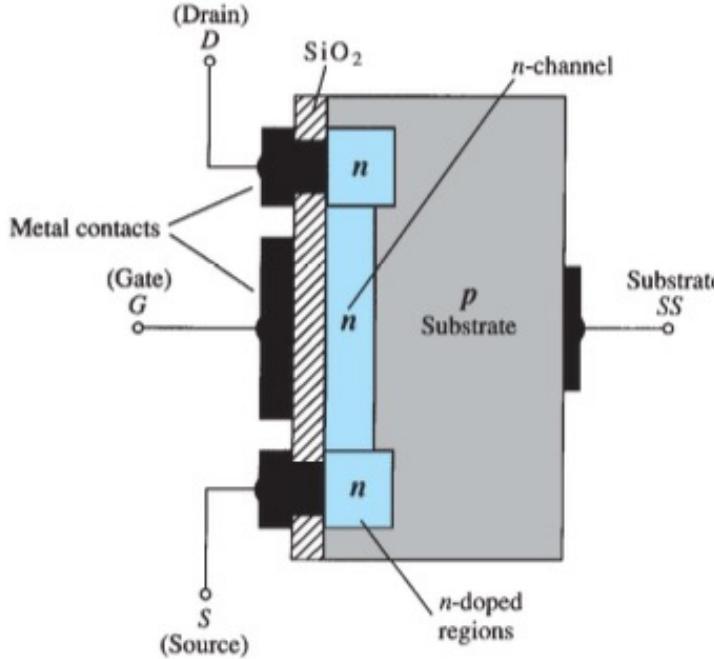
Đặc tuyến ra

Đặc tuyến của E-MOSFET (kênh P)

Bản



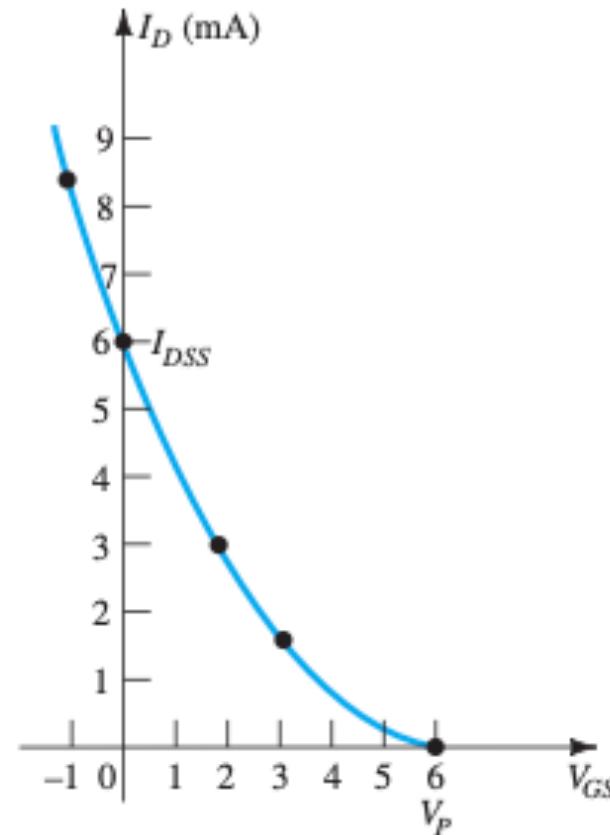
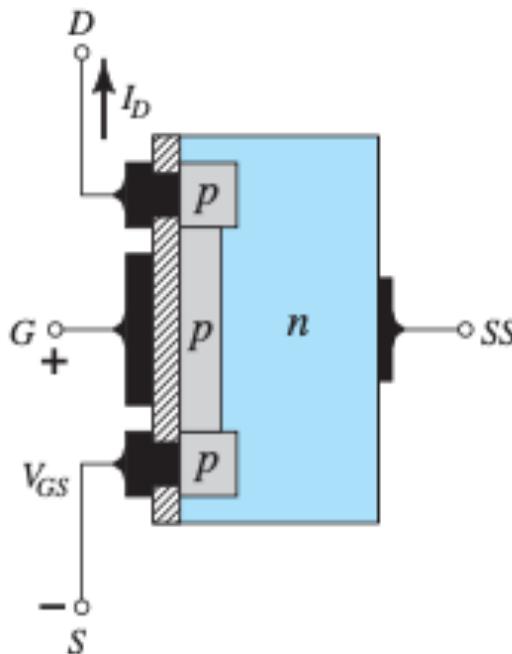
Đặc tuyến của D-MOSFET (kênh N)



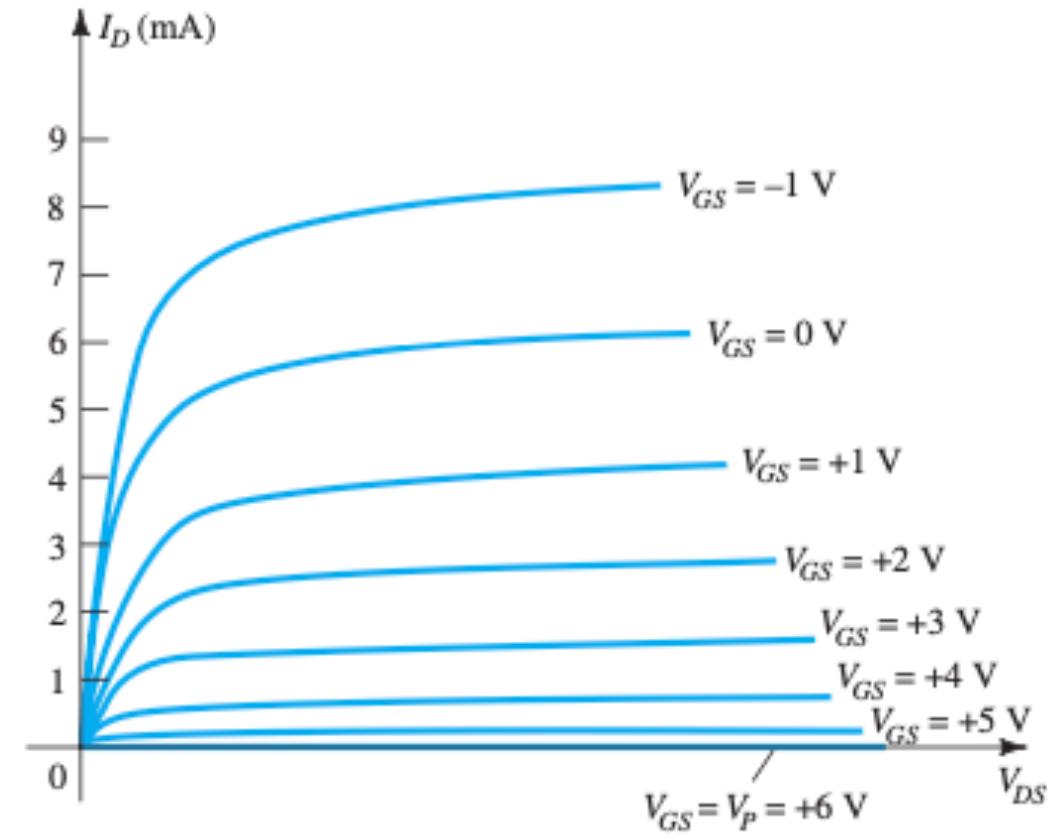
Đặc tuyến truyền đạt

Đặc tuyến ra

Đặc tuyến của D-MOSFET (kênh P)



Đặc tuyến truyền đạt



Đặc tuyến ra

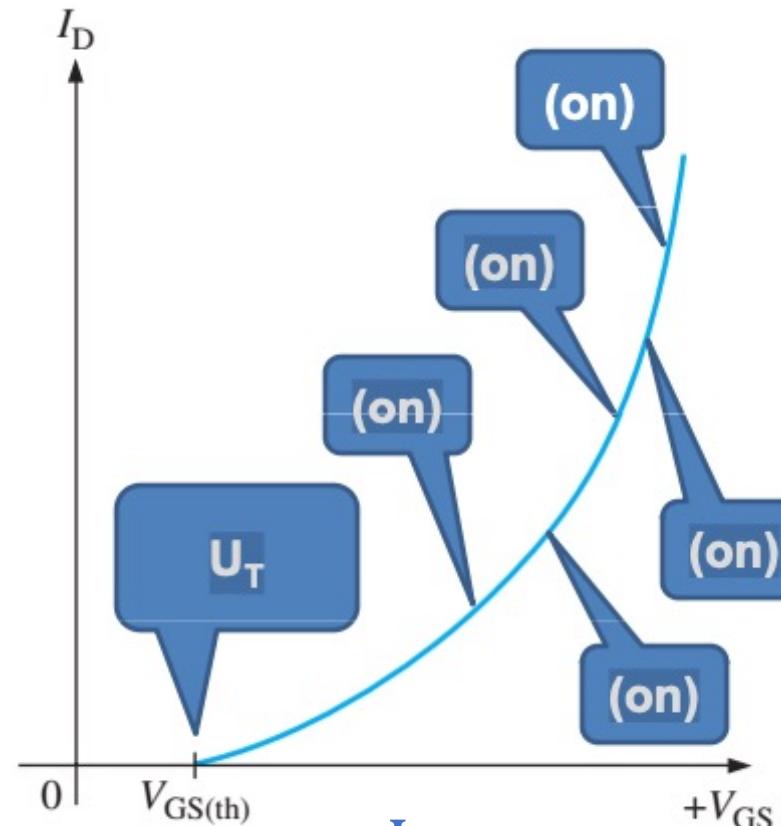
Phương trình Shockley (E-MOSFET)

Bản•
sơ

$$I_D = k(U_{GS} - U_T)^2$$

- Trong đó:

- ✓ I_D , U_{GS} : dòng máng, chênh áp G-S
- ✓ U_T : điện áp ngưỡng mở kênh
- ✓ k : hệ số tỷ lệ \Rightarrow xác định k dựa vào 1 điểm bất kỳ (khi kênh đã mở)



$$k = \frac{I_{D(on)}}{(U_{GS(on)} - U_T)^2}$$

Ví dụ số thảo

Bảng số

Với datasheet của 2N7002 E-MOSFET cho $I_{D(on)} = 500\text{mA}$ (minimum) tại $V_{GS} = 10\text{V}$ và $V_{GS(th)} = 1\text{V}$. Xác định dòng máng I_D với $V_{GS} = 5\text{V}$

Giải:

Tính hệ số k:

$$k = \frac{I_{D(on)}}{(U_{GS(on)} - U_T)^2} = \frac{500\text{mA}}{(10\text{V} - 1\text{V})^2} = 6.17\text{mA/V}^2$$

Sử dụng giá trị k, tính I_D với $V_{GS} = 5\text{V}$

$$I_D = k(V_{GS} - V_{GS(th)})^2 = (6.17\text{mA/V}^2)(5\text{V} - 1\text{V})^2 = 98.7 \text{ mA}$$

Phương trình Shockley (D-MOSFET)

Bảng 5.6

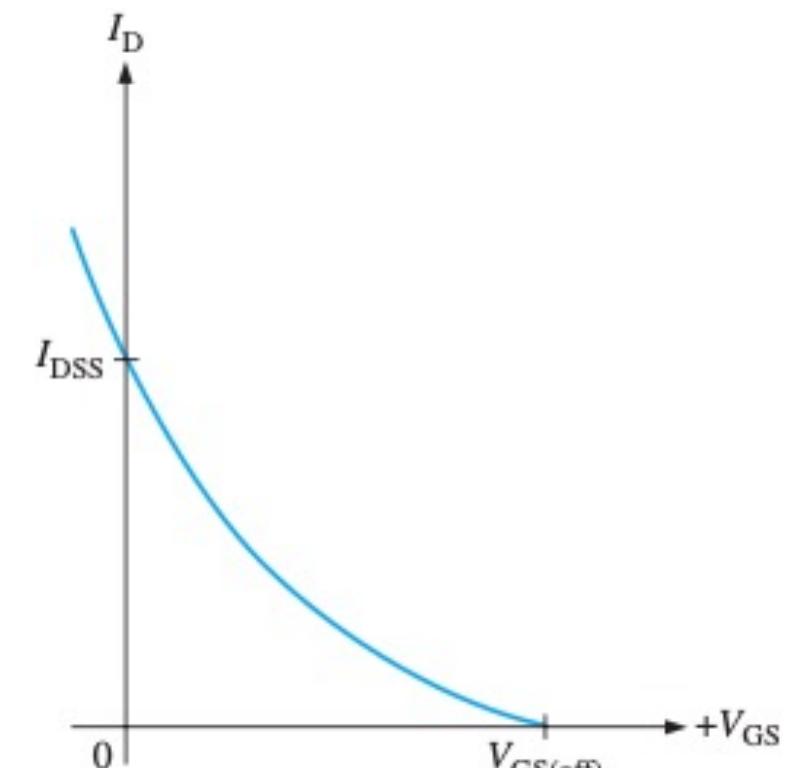
- Giống phương trình cho JFET, áp dụng cho cả chế độ nghèo và giàu

$$I_D \cong I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right)^2$$

- Trong đó:
 - ✓ I_D , U_{GS} : dòng máng, chênh áp G-S
 - ✓ I_{DSS} : dòng máng khi $U_{GS} = 0$
 - ✓ $U_P = U_{GS(off)}$: điện áp thắt kênh



(a) *n* channel



(b) *p* channel

Ví dụ

số thảo

Bản Cho một D-MOSFET, $I_{DSS} = 10\text{mA}$ và $V_{GS(off)} = -8\text{V}$

- a) Đây là loại kênh N hay kênh P?
- b) Tính I_D tại $V_{GS} = -3\text{V}$
- c) Tính I_D tại $V_{GS} = +3\text{V}$

Giải:

- a) Do linh kiện có $V_{GS(off)}$ âm nên đây là **MOSFET kênh N**
- b) $I_D \cong I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right)^2 = (10\text{mA}) \left(1 - \frac{-3\text{V}}{-8\text{V}}\right)^2 = 3.91\text{mA}$
- c) $I_D \cong I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right)^2 = (10\text{mA}) \left(1 - \frac{3\text{V}}{-8\text{V}}\right)^2 = 18.9\text{mA}$

Các tham số điện quan trọng

Bản

- Giống như các loại linh kiện bán dẫn khác => có: $I_{D(max)}$, $U_{DS(max)}$,
 $U_{GS(max)}$, $P_{D(max)}$, ...
- Các thông số đặc thù:
 - ✓ g_m : độ hổ dãn
 - ✓ $I_{D(on)}$, $R_{DS(on)}$: thông số kênh khi mở (kèm điều kiện)
 - ✓ C_{GS} , C_{GD} : Điện dung ký sinh

E-MOSFET	D-MOSFET
U_T : điện áp ngưỡng mở kênh	$U_{GS(off)}$: điện áp khóa kênh
	I_{DSS} : dòng máng bão hòa khi $U_{GS} = 0$

Phân cực cho MOSFET

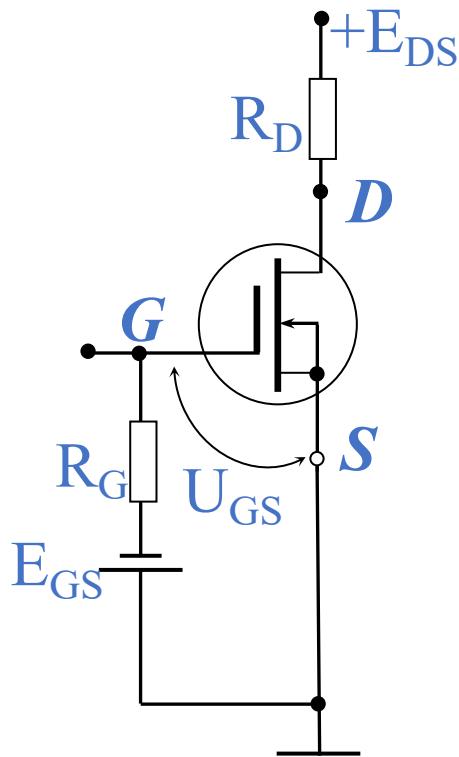
Bản
số

- Bản chất công việc: như đối với JFET ↳ Với mỗi kiểu, cần xác định điểm làm việc tĩnh Q và độ ổn định của Q (như đối với JFET)
- Các kiểu phân cực
 - Phân cực bằng điện áp cố định
 - Tự phân cực (**Chú ý:** Không áp dụng cho E-MOSFET)
 - Phân cực bằng phân áp
 - Phân cực bằng hồi tiếp điện áp (**Chú ý:** Không áp dụng cho D-MOSFET chế độ nghèo)
- Các công thức cần chú ý
 - ✓ $I_G \cong 0A$ $I_D = I_S$
 - ✓ Phương trình Shockley với JFET và D-MOSFET: $I_D \cong I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right)^2$
 - ✓ Phương trình Shockley với E-MOSFET: $I_D = k(U_{GS} - U_T)^2$

Phân cực cho MOSFET (phân cực bằng điện áp cố định)

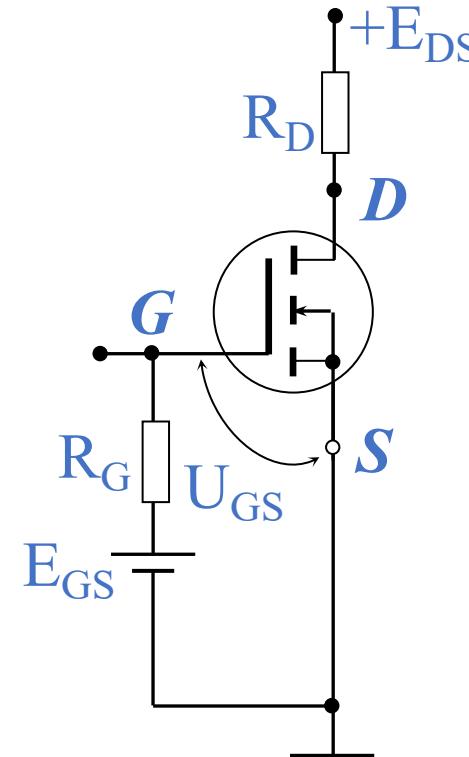
Bản

Cách xác định Q: dễ dàng (tham khảo phần JFET)



E_{GS} có thể $<$,
 $=$, > 0

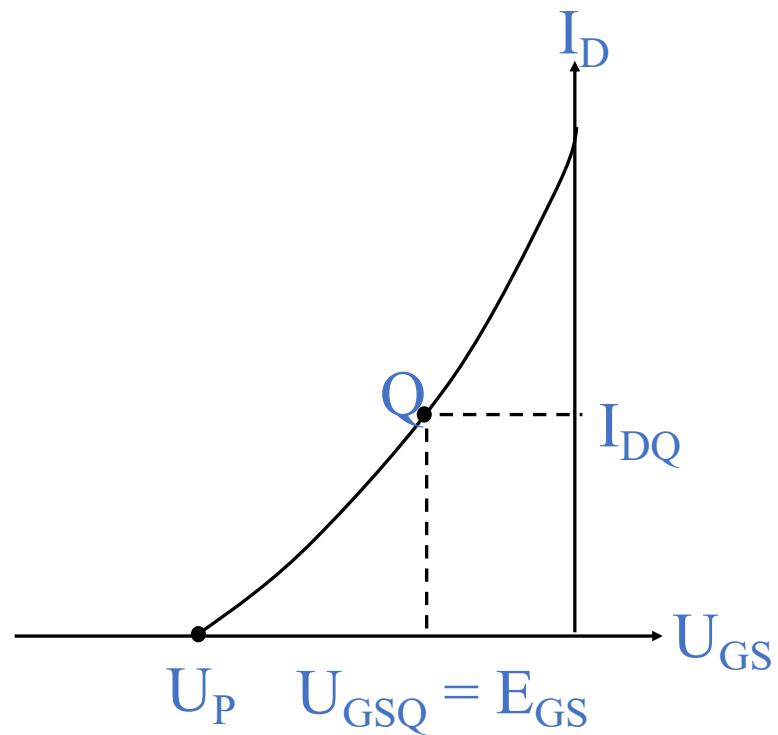
D-MOSFET kênh N



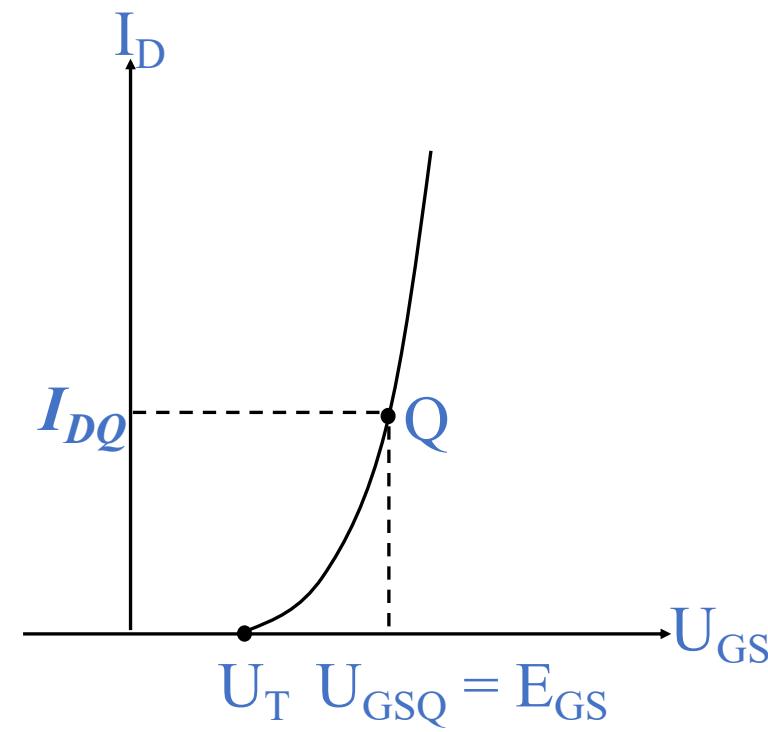
E-MOSFET kênh N

Phân cực cho MOSFET (phân cực bằng điện áp cố định)

Bản• C



D-MOSFET kênh N



E-MOSFET kênh N

Phân cực cho MOSFET (tự phân cực)

Bản sao
Không áp dụng cho E-MOSFET

$$V_G = 0 \text{ (vì } I_G = 0\text{)}$$

$$V_S = I_S \cdot R_S = I_D \cdot R_S$$

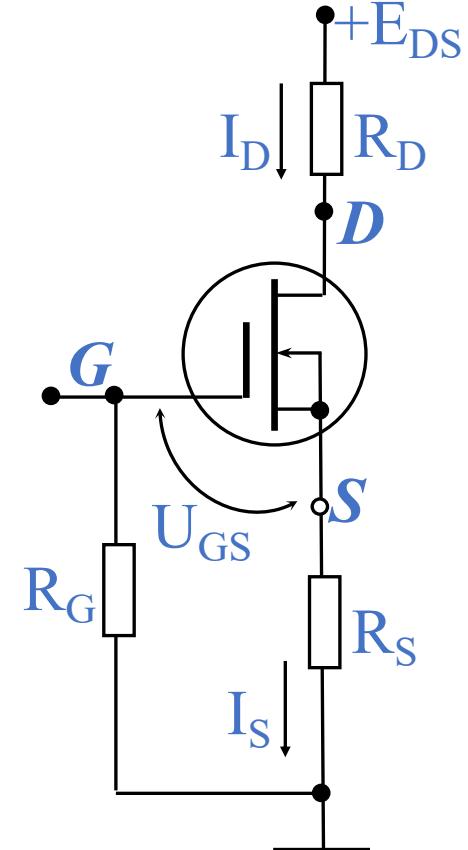
$$U_{GS} = -I_D \cdot R_S$$

- Kết hợp với phương trình Shockley được phương trình bậc 2 của U_{GS}

\Rightarrow có 2 nghiệm \Rightarrow chọn nghiệm $|U_{GS}| < |U_P|$

\Rightarrow Tính được $U_{DSQ} = E_{DS} - I_{DQ} \cdot (R_D + R_S)$

\Rightarrow Xác định được Q (U_{GSQ} , I_{DQ} , U_{DSQ})



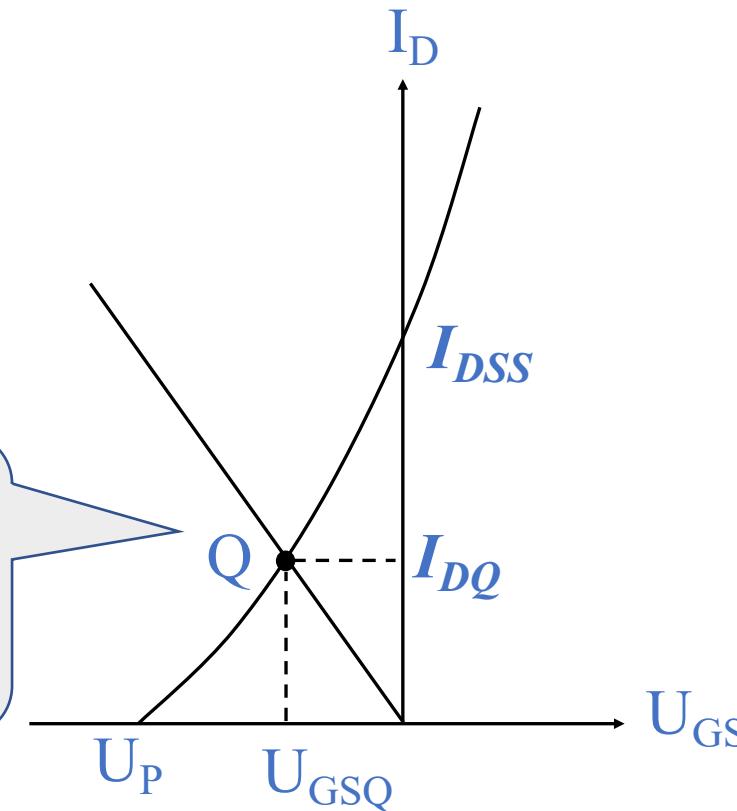
D-MOSFET kênh N

Phân cực cho MOSFET (Tự phân cực)

Bản• C

Q là giao điểm của đặc tuyến
truyền đạt với đường thẳng

$$U_{GS} = - I_D \cdot R_S$$



Phân cực cho MOSFET (phân cực bằng phân áp)

Bảng sơ

$$V_G = E_{DS} \cdot R_2 / (R_1 + R_2) \text{ (vì } I_G = 0\text{)}$$

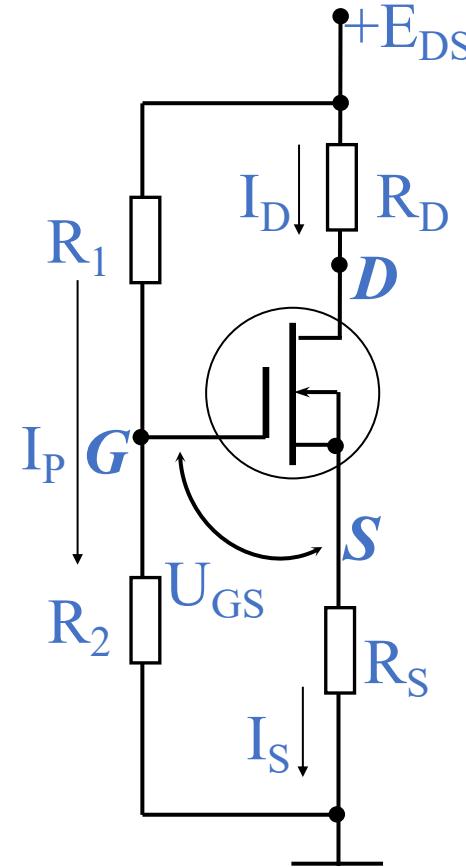
$$V_S = I_S \cdot R_S = I_D \cdot R_S$$

$$U_{GS} = V_G - I_D \cdot R_S$$

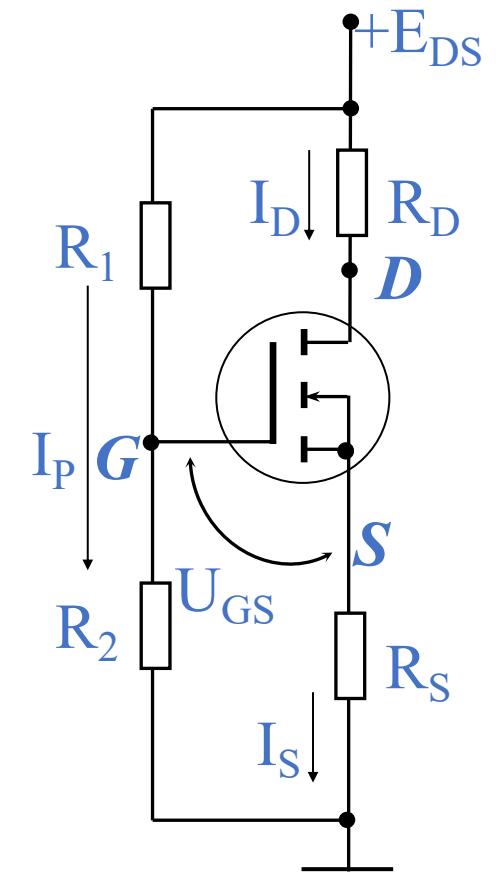
- Với D-MOSFET: tham khảo JFET
- Với E-MOSFET:

$I_D = k \cdot (U_{GS} - U_T)^2 \Rightarrow$ kết hợp U_{GS} trên
 \Rightarrow giải phương trình bậc 2 của U_{GS}
 \Rightarrow chọn nghiệm $|U_{GS}| > |U_P|$

Tính được $U_{DSQ} = E_{DS} - I_{DQ} \cdot (R_D + R_S)$
 \Rightarrow Xác định được Q (U_{GSQ} , I_{DQ} , U_{DSQ})



D-MOSFET
kênh N



E-MOSFET
kênh N

Phân cực cho MOSFET (phân cực bằng phân áp)

Giải thích công thức với E-MOSFET

$$V_G = E_{DS} \cdot R_2 / (R_1 + R_2) \text{ (vì } I_G = 0\text{)}$$

$$V_S = I_S \cdot R_S = I_D \cdot R_S$$

$$U_{GS} = V_G - I_D \cdot R_S \Rightarrow I_D = (V_G - U_{GS}) / R_s$$

$$I_D = k \cdot (U_{GS} - U_T)^2 = (V_G - U_{GS}) / R_s$$

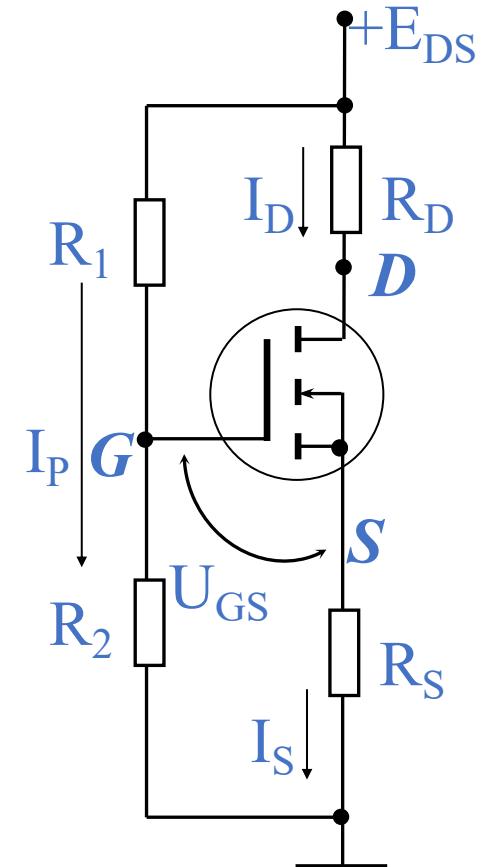
$$\Rightarrow kR_S U_{GS}^2 + (1 - 2kR_S U_T) U_{GS} + (kR_S U_T^2 - U_G) = 0$$

Phương trình: $aU_{GS}^2 + bU_{GS} + c = 0$

$$\begin{cases} a = kR_S \\ b = (1 - 2kR_S U_T) \\ c = (kR_S U_T^2 - U_G) \end{cases}$$

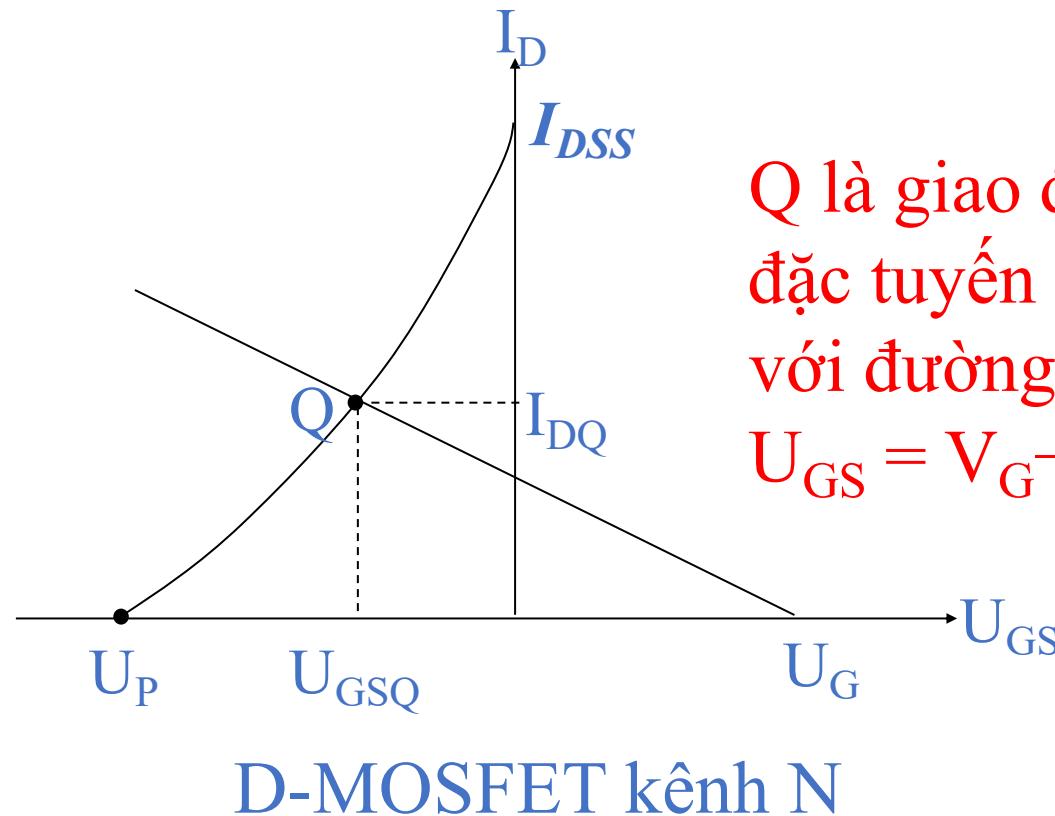
$$\Rightarrow U_{GS1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad \text{chọn nghiệm } |U_{GS}| > |U_P|$$

Tính được $U_{DSQ} = E_{DS} - I_{DQ} \cdot (R_D + R_S) \Rightarrow$ Xác định được Q (U_{GSQ} , I_{DQ} , U_{DSQ})

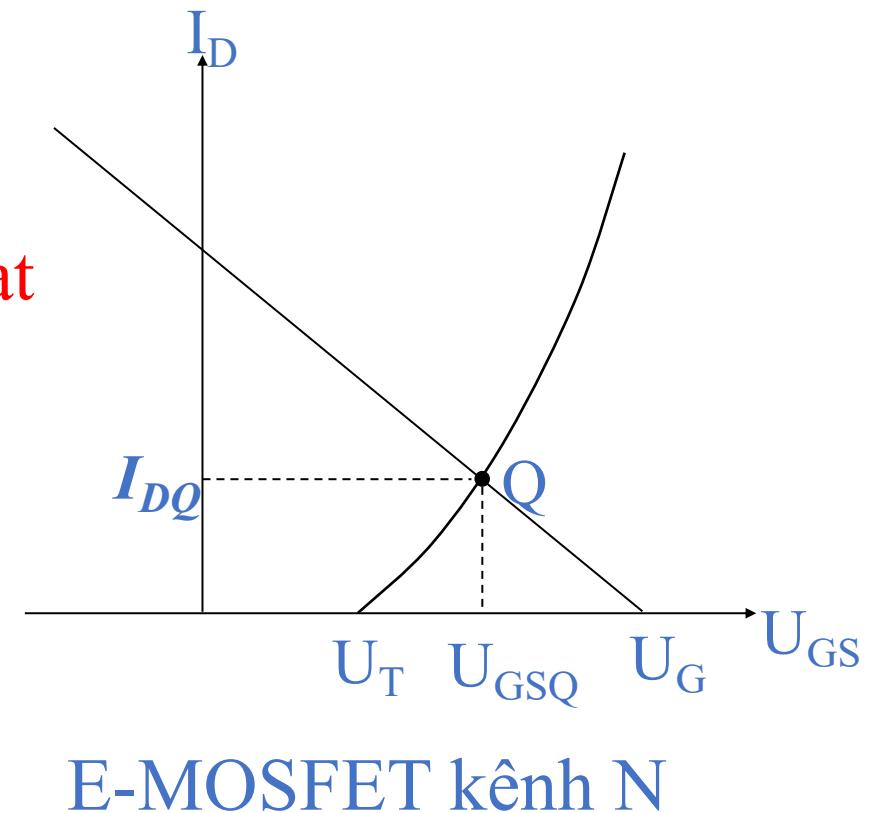


Phân cực cho MOSFET (phân cực bằng phân áp)

Bản • Cach xác định Q: Có thể dùng đặc tuyến truyền đạt để xác định Q



Q là giao điểm của
đặc tuyến truyền đạt
với đường thẳng
 $U_{GS} = V_G - I_D \cdot R_S$



Ví dụ (kiểm tra lại đáp số)

Bản Sô

Xác định V_{GS} và V_{DS} cho E-MOSFET như hình. Giả thiết MOSFET giá trị tối thiểu $I_{D(on)} = 200\text{mA}$ tại $V_{GS} = 4\text{V}$ and $V_{GS(th)} = 2\text{V}$.

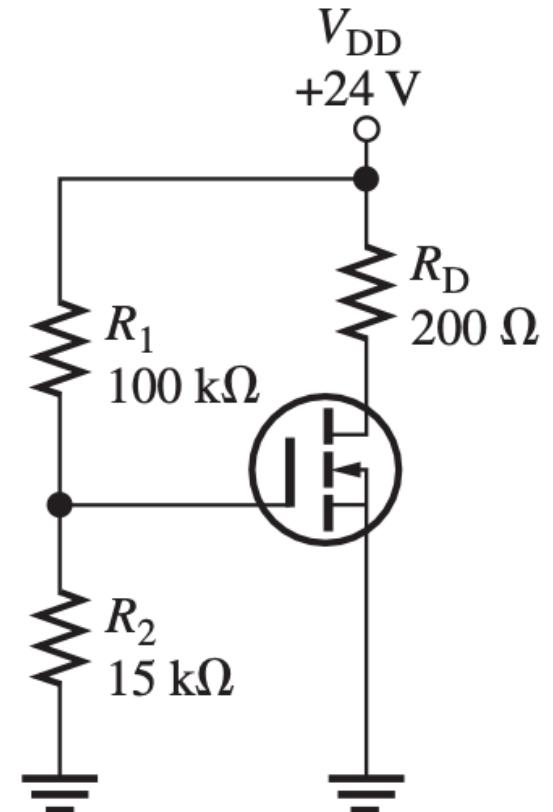
Giải:

$$V_{GS} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{DD} = \left(\frac{100\text{k}\Omega}{115\text{k}\Omega} \right) 24\text{V} = 3.13\text{V}$$

$$k = \frac{I_{D(on)}}{(U_{GS(on)} - U_T)^2} = \frac{200\text{mA}}{(4\text{V} - 2\text{V})^2} = 50\text{mA/V}^2$$

$$I_D = k(V_{GS} - V_{GS(th)})^2 = (50 \text{ mA/V}^2)(3.13\text{V} - 2\text{V})^2 = 63.8 \text{ mA}$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D = 24\text{V} - (63.8\text{mA})(200 \Omega) = 11.2\text{V}$$



Ví dụ số thảo

Xác định điểm làm việc tĩnh Q của E-MOSFET kênh N với phương pháp phân cực bằng phân áp. Cho biết E-MOSFET có các tham số sau: $I_{D(on)} = 3\text{mA}$, $U_{GS(on)} = 10\text{V}$, $U_T = 5\text{V}$, $E_{DS} = 40\text{V}$, $R_D = 3\text{K } \Omega$, $R_S = 1\text{K } \Omega$, $R_1 = 22\text{M } \Omega$, $R_2 = 18\text{M } \Omega$.

- Với E-MOSFET: ta có $I_D = k \cdot (U_{GS} - U_T)^2$

$$k = \frac{I_{D(on)}}{(U_{GS(on)} - U_T)^2} = \frac{3\text{mA}}{(10\text{V} - 5\text{V})^2} = 0.12\text{mA/V}^2$$

Phương trình: $aU_{GS}^2 + bU_{GS} + c = 0$

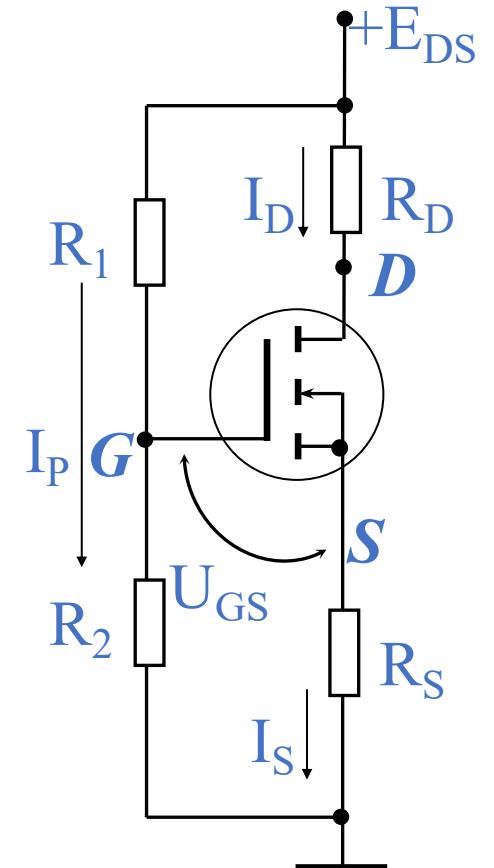
$$\begin{cases} a = kR_S = 0.12 \\ b = (1 - 2kR_S U_T) = -0.2 \\ c = (kR_S U_T^2 - U_G) = -15 \end{cases}$$

\Rightarrow kết hợp U_{GS} trên \Rightarrow giải phương trình bậc 2 của U_{GS}

$\Rightarrow U_{GS1} = 12\text{V}; U_{GS2} = -10.4\text{V}$ chọn nghiệm $U_{GS} > U_P \Rightarrow U_{GSQ} = 12\text{V}$

$$I_{DQ} = k \cdot (U_{GSQ} - U_T)^2 = 0.12 \cdot 10^{-3}\text{A/V}^2 (12\text{V} - 5\text{V})^2 = 5.88\text{mA}$$

Tính được $U_{DSQ} = E_{DS} - I_{DQ} \cdot (R_D + R_S) = 40\text{V} - 5.88\text{mA} (3\text{K } \Omega + 1\text{K } \Omega) = 16.5\text{V} \Rightarrow$
Xác định được Q (U_{GSQ} , I_{DQ} , U_{DSQ})



E-MOSFET
kênh N

Phân cực cho MOSFET (phân cực bằng hồi tiếp điện áp)

Bản
cách
không áp dụng cho D-MOSFET chế độ nghèo

- Có thể áp dụng cho D-MOSFET ở chế độ giàu nhưng ít dùng (D-MOSFET chủ yếu hoạt động ở chế độ nghèo)

- Áp dụng tốt cho E-MOSFET:

$$V_G = V_D \text{ (vì } I_G = 0\text{)}$$

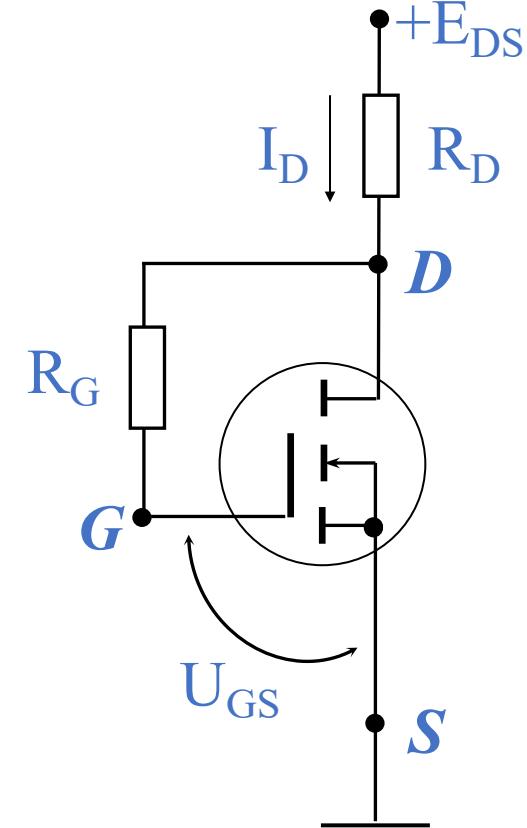
$$\Rightarrow U_{GS} = U_{DS} = E_{DS} - I_D \cdot R_D$$

$$I_D = k \cdot (U_{GS} - U_T)^2 \Rightarrow \text{kết hợp } U_{GS} \text{ trên}$$

\Rightarrow giải phương trình bậc 2 của U_{GS}

\Rightarrow chọn nghiệm $|U_{GS}| > |U_P|$

\Rightarrow Xác định được Q (U_{GSQ} , I_{DQ} , U_{DSQ})



E-MOSFET kênh N

Phân cực cho MOSFET (phân cực bằng hồi tiếp điện áp)

Bản

Giải thích công thức với E-MOSFET:

$$V_G = V_D \text{ (vì } I_G = 0\text{)}$$

$$\Rightarrow U_{GS} = U_{DS} = E_{DS} - I_D \cdot R_D \Rightarrow I_D = (E_{DS} - U_{GS}) / R_D$$

$$\text{Sử dụng } I_D = k \cdot (U_{GS} - U_T)^2 = (E_{DS} - U_{GS}) / R_D$$

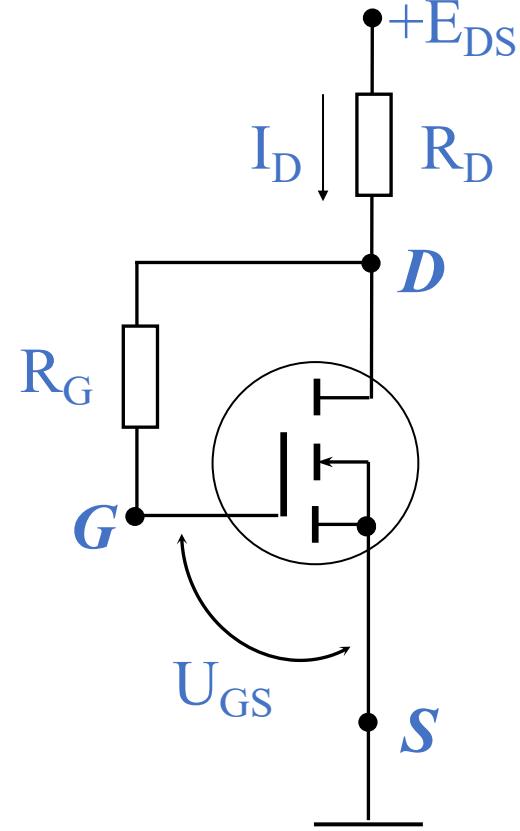
$$k \cdot U_{GS}^2 + U_{GS} \left(\frac{1}{R_D} - 2k \cdot U_T \right) + kU_T^2 - \frac{E_{DS}}{R_D} = 0$$

Phương trình: $aU_{GS}^2 + bU_{GS} + c = 0$

$$\begin{cases} a = k \\ b = \left(\frac{1}{R_D} - 2k \cdot U_T \right) \\ c = \left(kU_T^2 - \frac{E_{DS}}{R_D} \right) \end{cases}$$

$$\Rightarrow U_{GS1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad \text{chọn nghiệm } |U_{GS}| > |U_P|$$

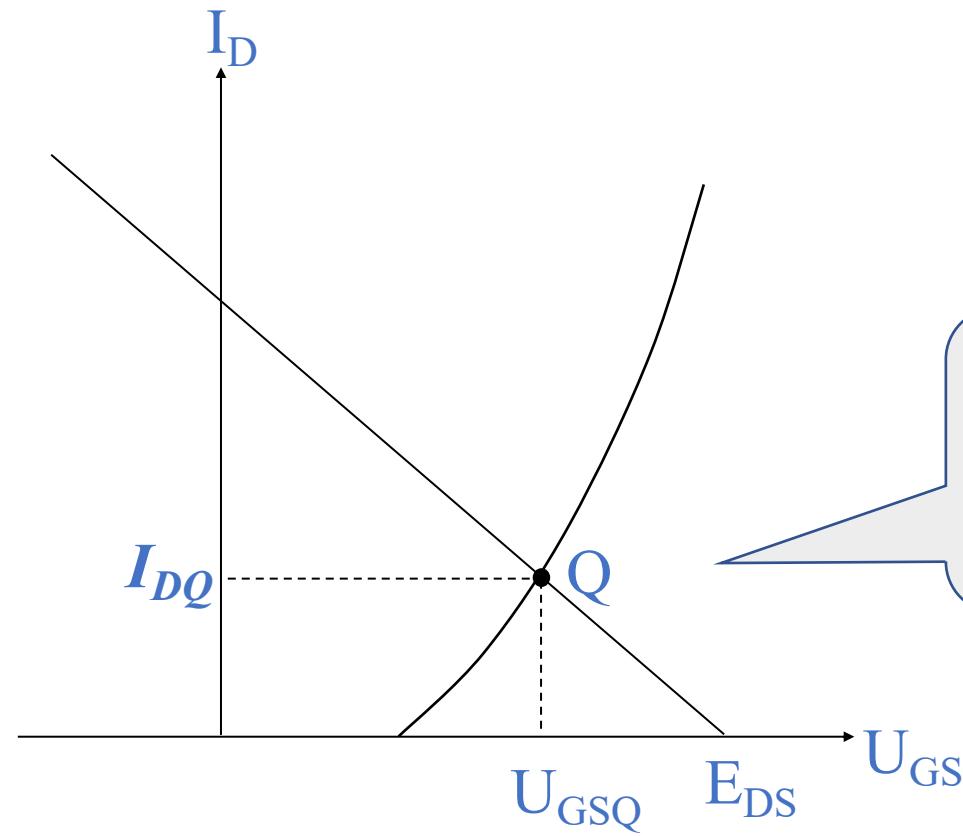
\Rightarrow Xác định được Q (U_{GSQ} , I_{DQ} , U_{DSQ})



E-MOSFET kênh N

Phân cực cho MOSFET (phân cực bằng hồi tiếp điện áp)

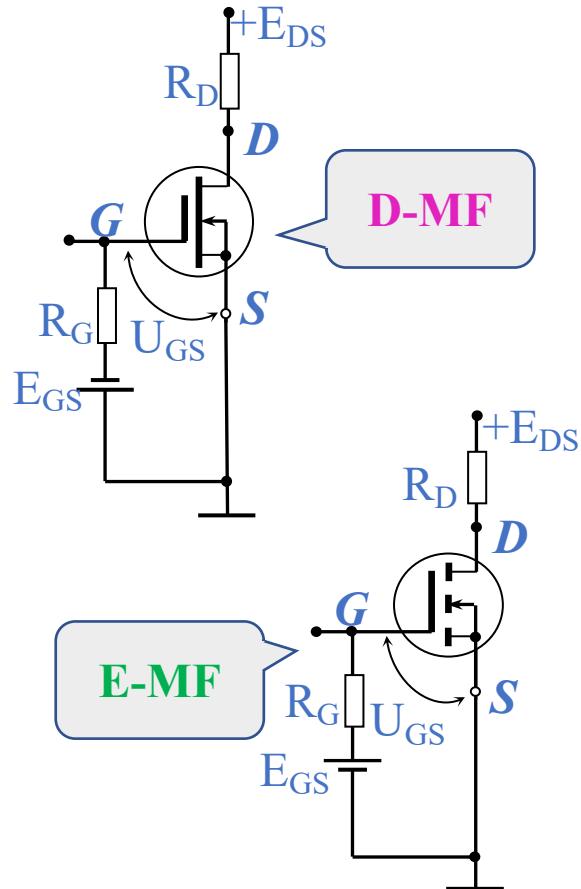
Bản• C



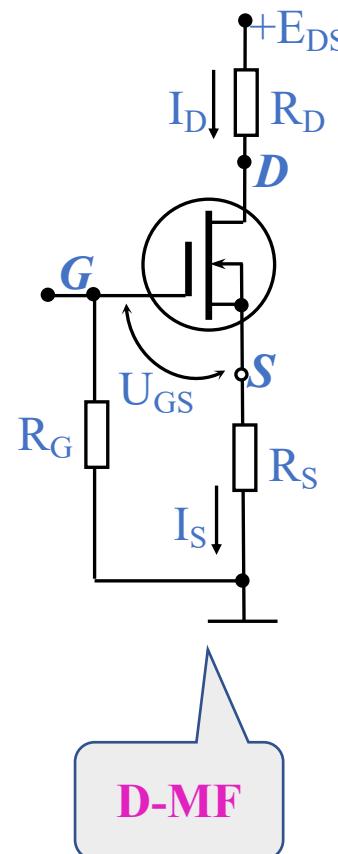
Q là giao điểm của đặc tuyến
truyền đạt với đường thẳng
 $U_{GS} = E_{DS} - I_D \cdot R_D$

Phân cực cho MOSFET

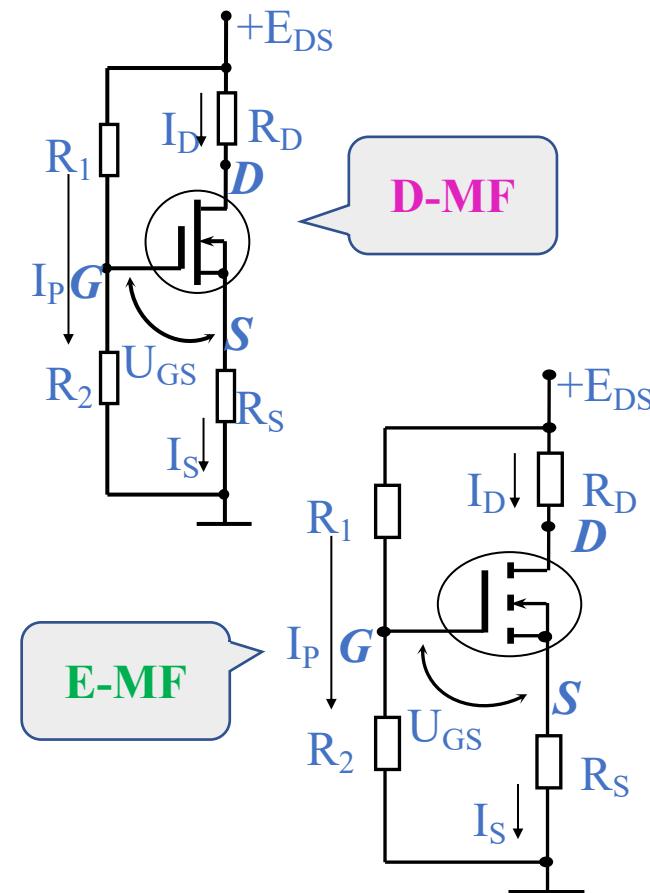
Điện áp cố định



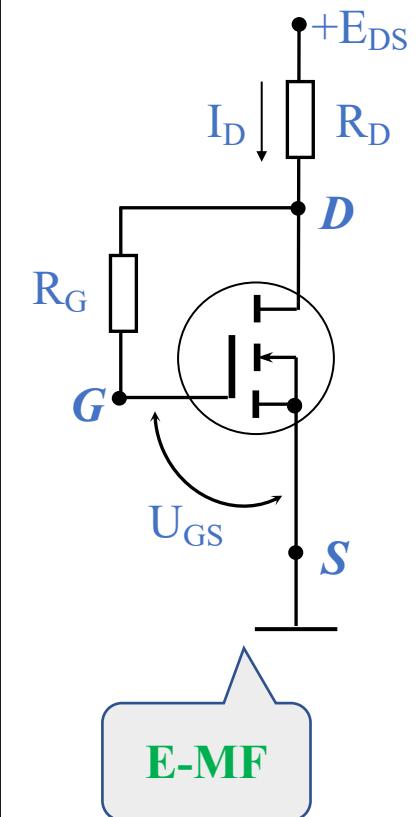
Tụ phân cực



Phân áp

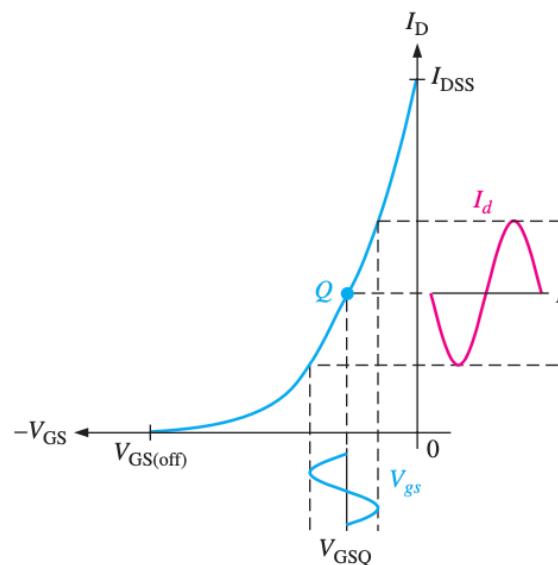


Hồi tiếp đ/áp

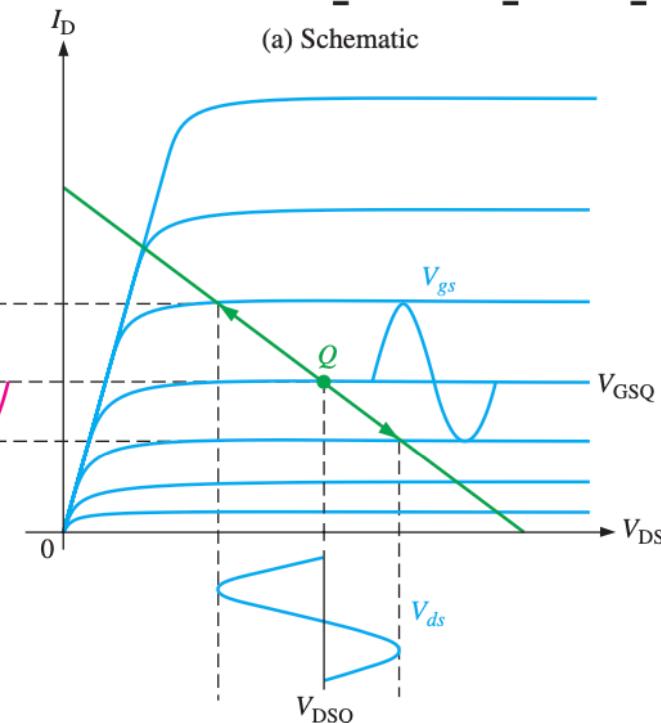


Chế độ khuếch đại JFET

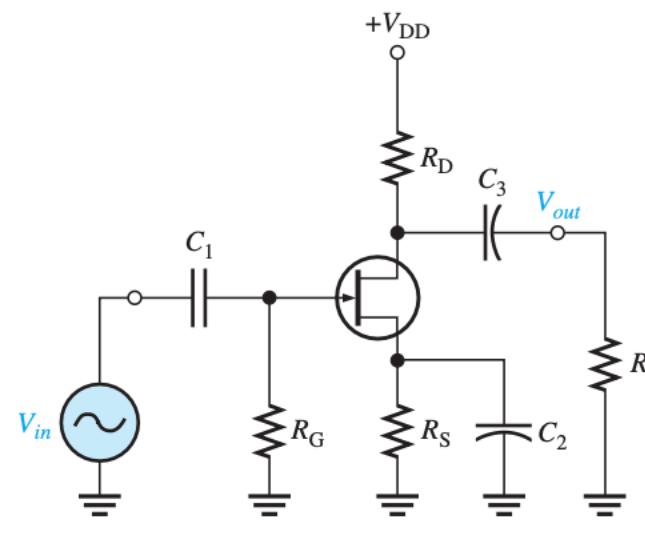
Bản số



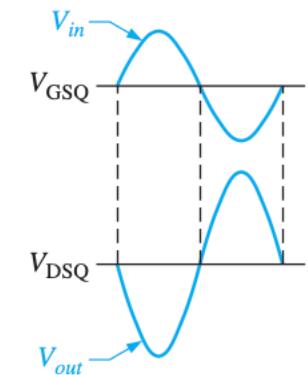
(a) JFET (*n*-channel) transfer characteristic curve showing signal operation



(b) JFET (*n*-channel) drain curves showing signal operation
TS. Trần Anh Vũ (Electronics Dept. SEEE, HUST)



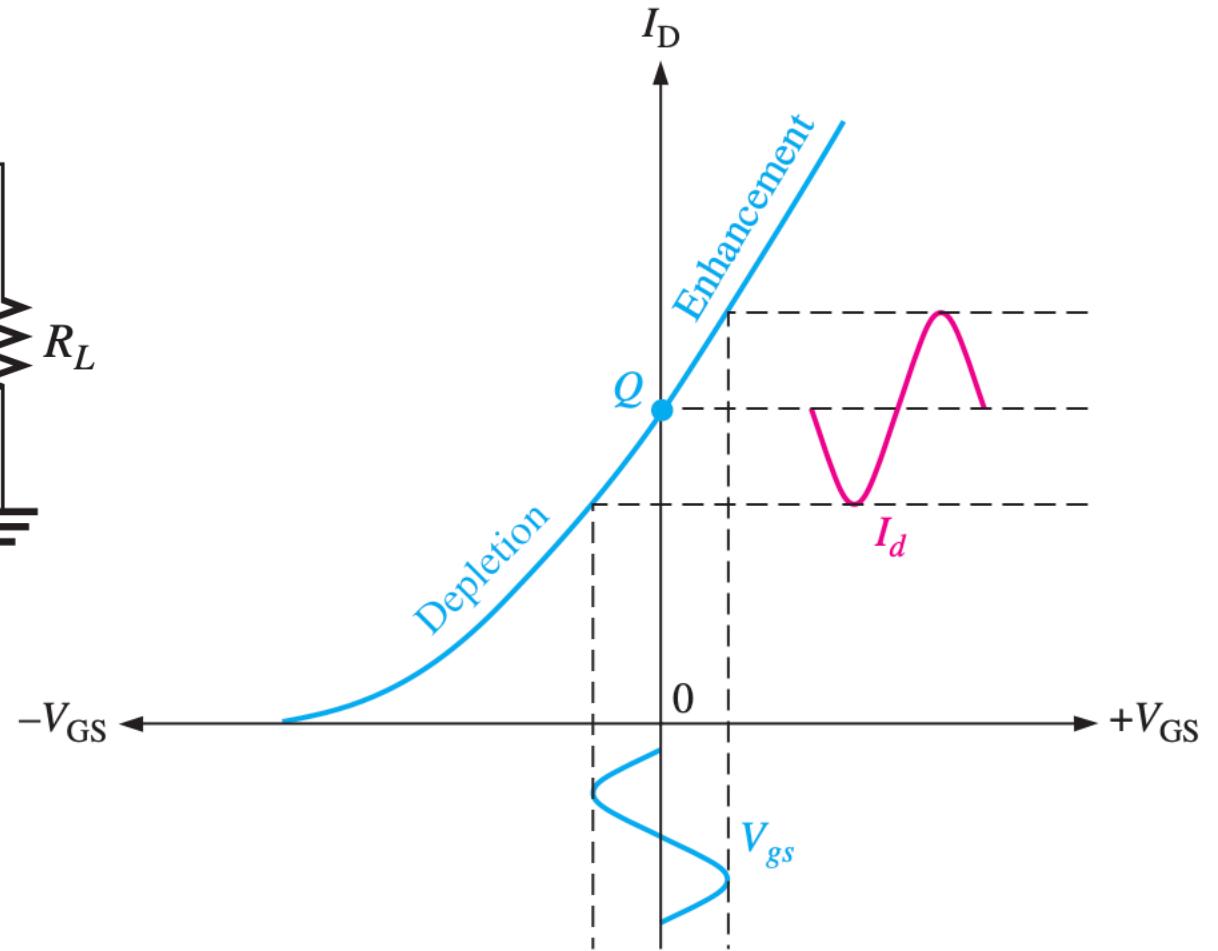
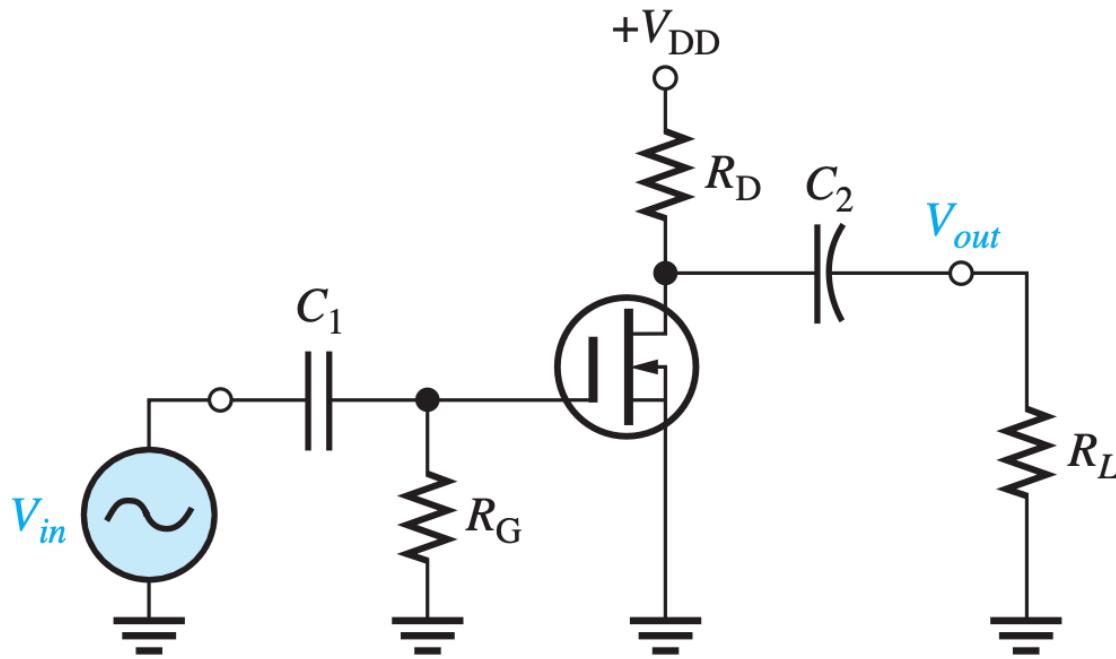
(a) Schematic



(b) Voltage waveform relationship

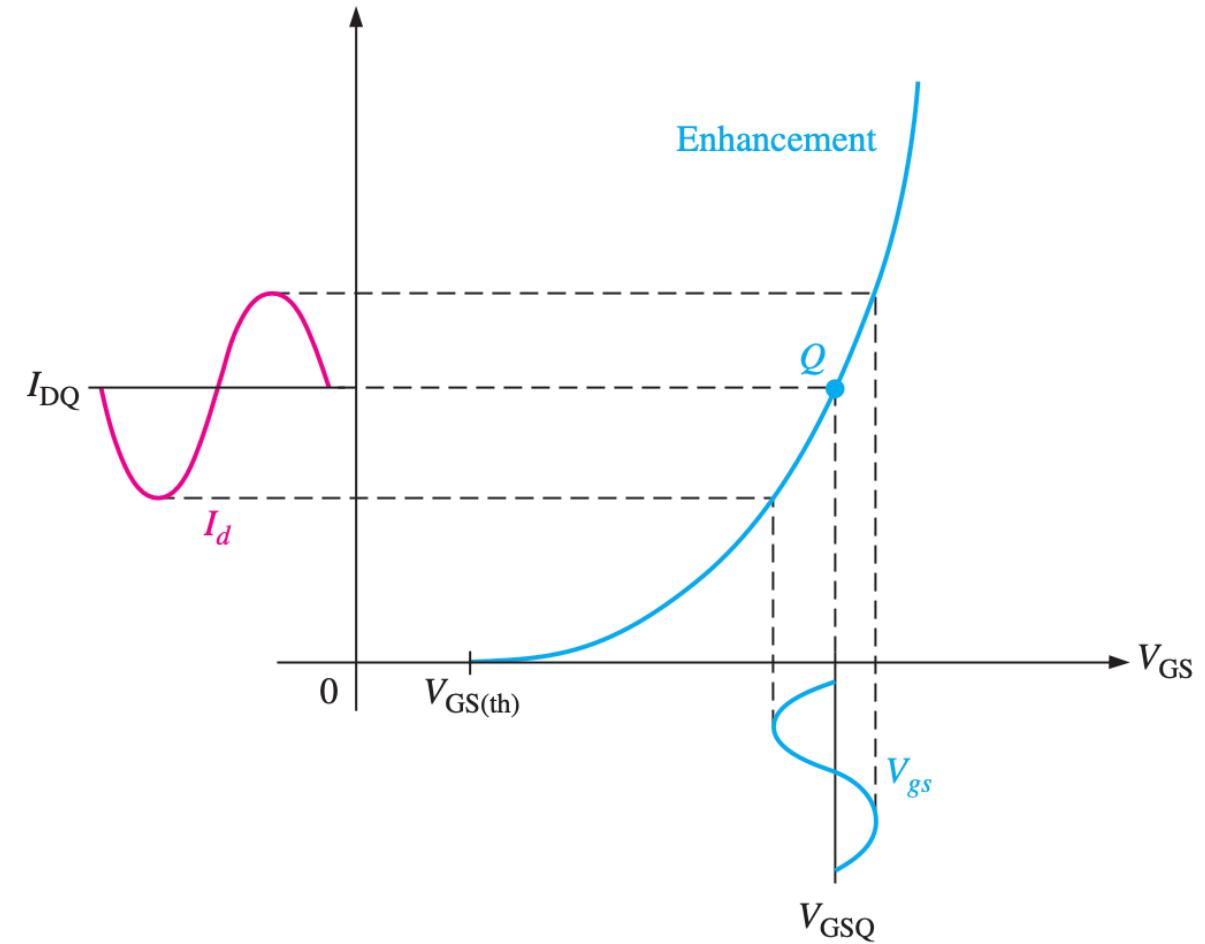
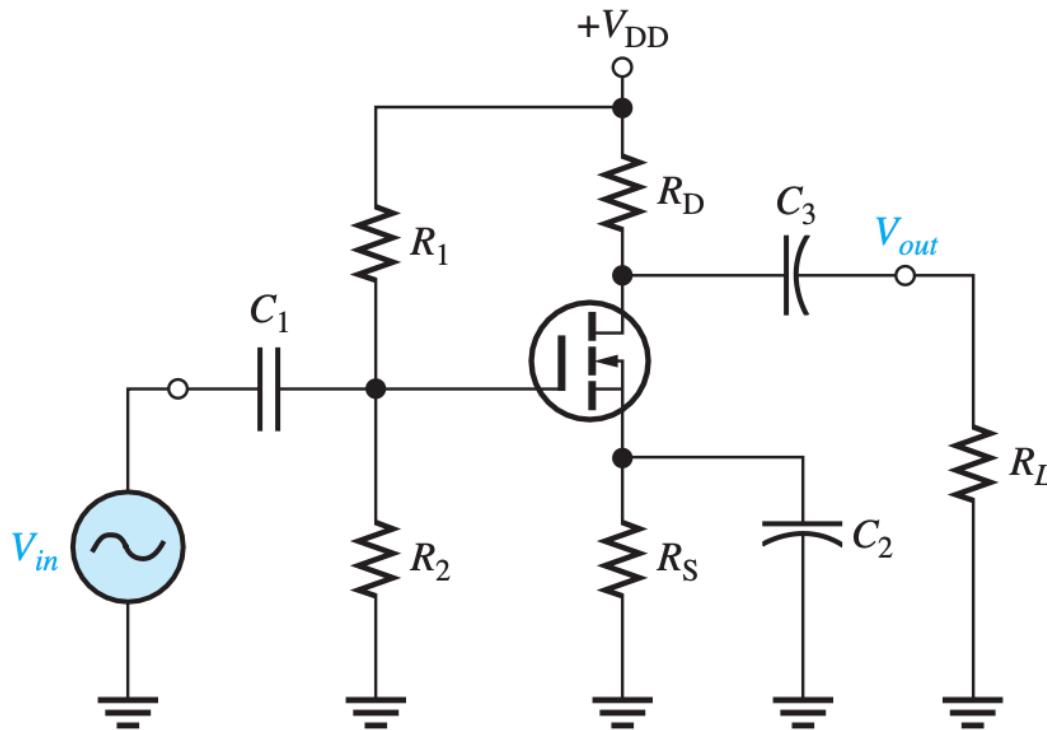
Chế độ khuếch đại D-MOSFET

B2



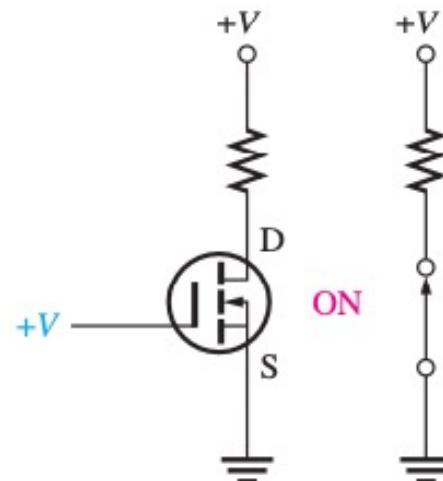
Chế độ khuếch đại E-MOSFET

B

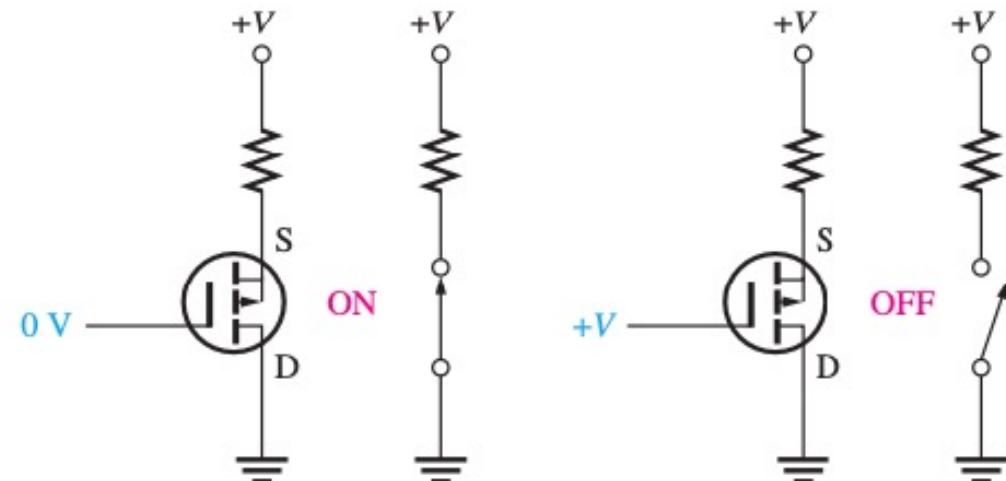
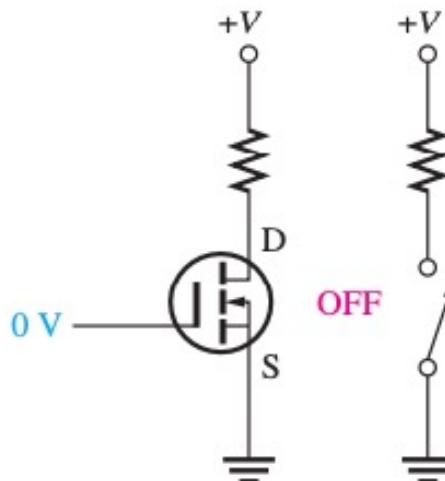


Chế độ chuyển mạch của MOSFET

- Bản 5.6
- MOSFET thường được dùng làm chuyển mạch tương tự và số
 - E-MOSFET thường được dùng làm chuyển mạch do đặc tính $V_{GS(th)}$
 - Khi $V_{GS} < V_{GS(th)} \Rightarrow$ MOSFET *off*
 - Khi $V_{GS} > V_{GS(th)} \Rightarrow$ MOSFET *on*



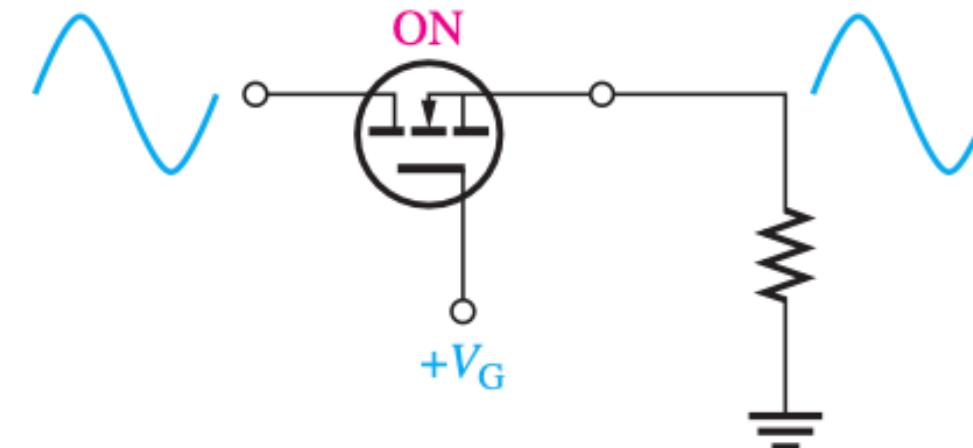
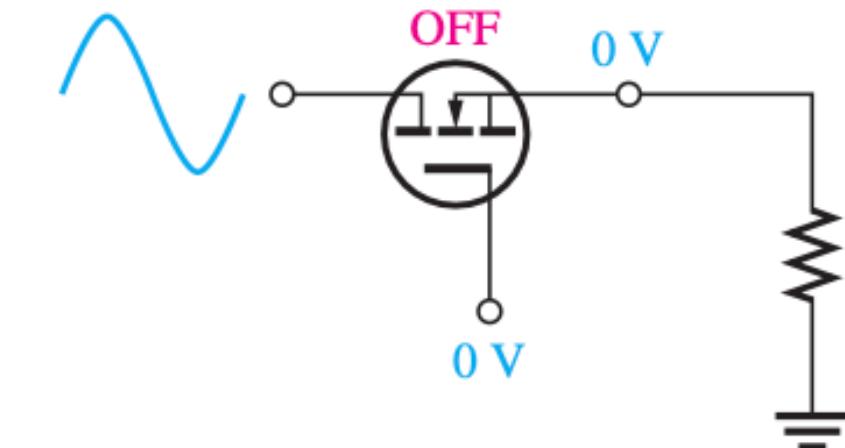
(a) *n*-channel MOSFET and switch equivalent



(b) *p*-channel MOSFET and switch equivalent

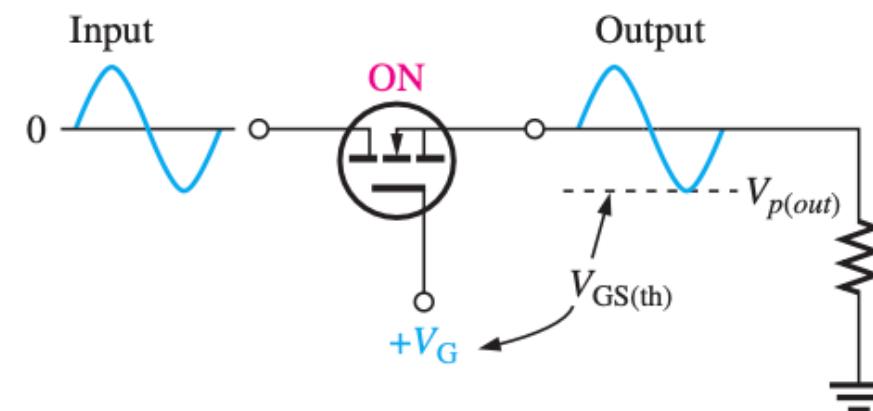
Chế độ chuyển mạch tương tự của MOSFET

Bản
MOSFET



(a)

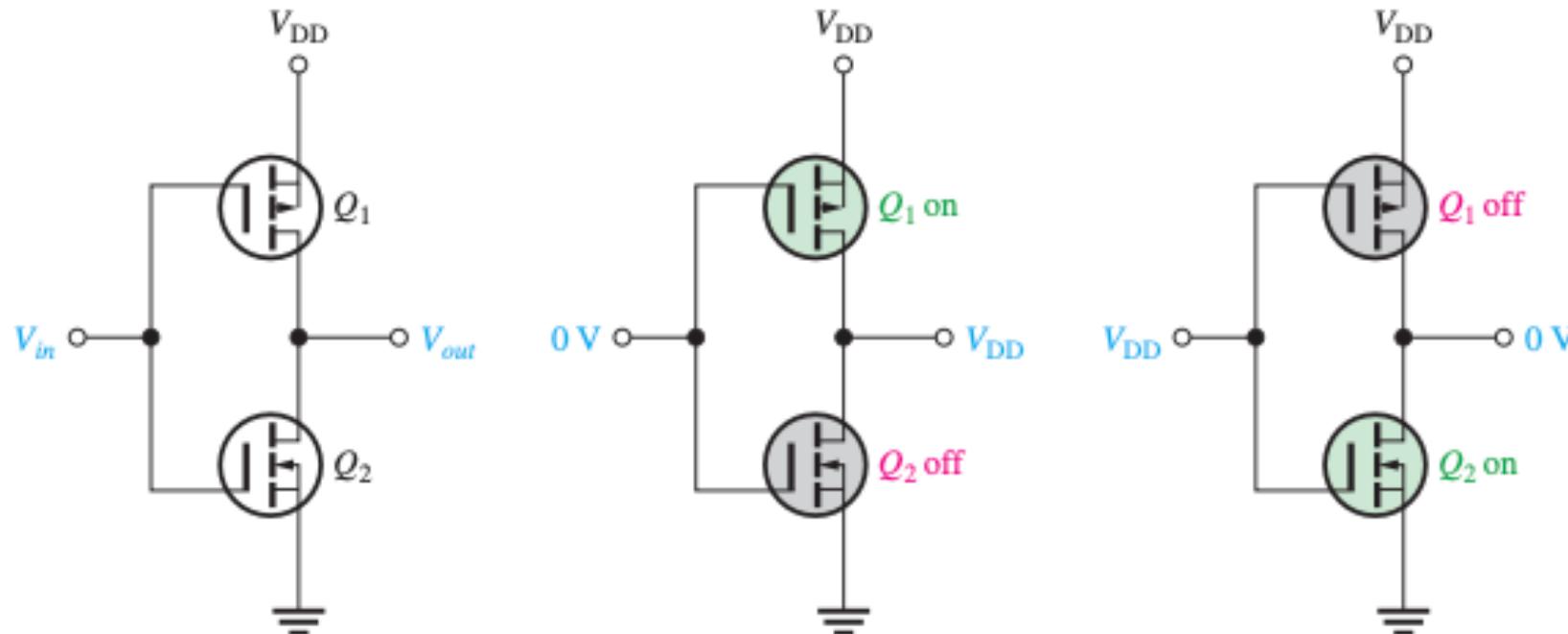
(b)



MOSFET kết hợp – CMOS (chuyển mạch số)

Bản

- CMOS = Complementary MOS = MOS kiểu bù = kết hợp E-MOSFET kênh N với kênh P
- Ưu điểm: tiêu tốn rất ít năng lượng, chuyển mạch nhanh, dễ chế tạo => thông dụng trong vi mạch số



Tổng kết chương

Bản ~~sơ~~ kế

- Nội dung đã học

- ✓ Transistor trường JFET
- ✓ Transistor trường MOSFET

- Nội dung quan trọng (tăng GPA, CPA):

- ✓ Cấu tạo, nguyên lý làm việc của FET
- ✓ Đặc tuyến của FET
- ✓ Phương trình Shockley
- ✓ Các mạch phân cực cho FET, xác định điểm làm việc, vẽ hình minh họa

