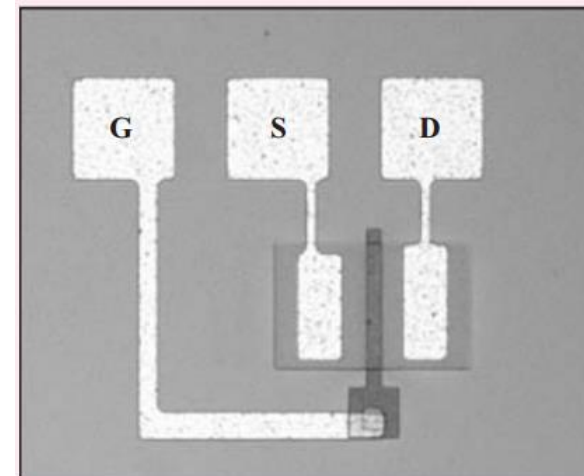
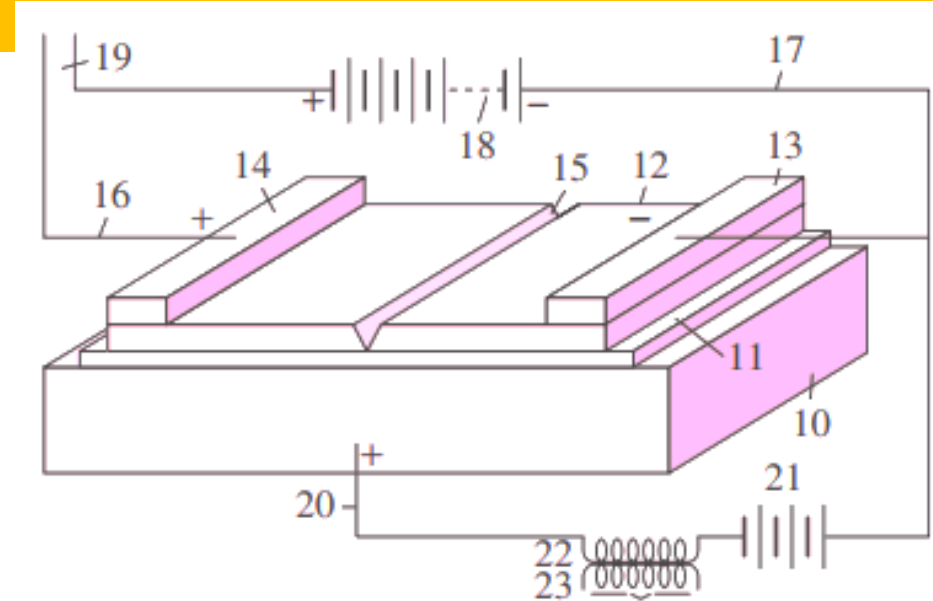


CHƯƠNG 4 TRANSISTOR HIỆU ỨNG TRƯỜNG

NỘI DUNG

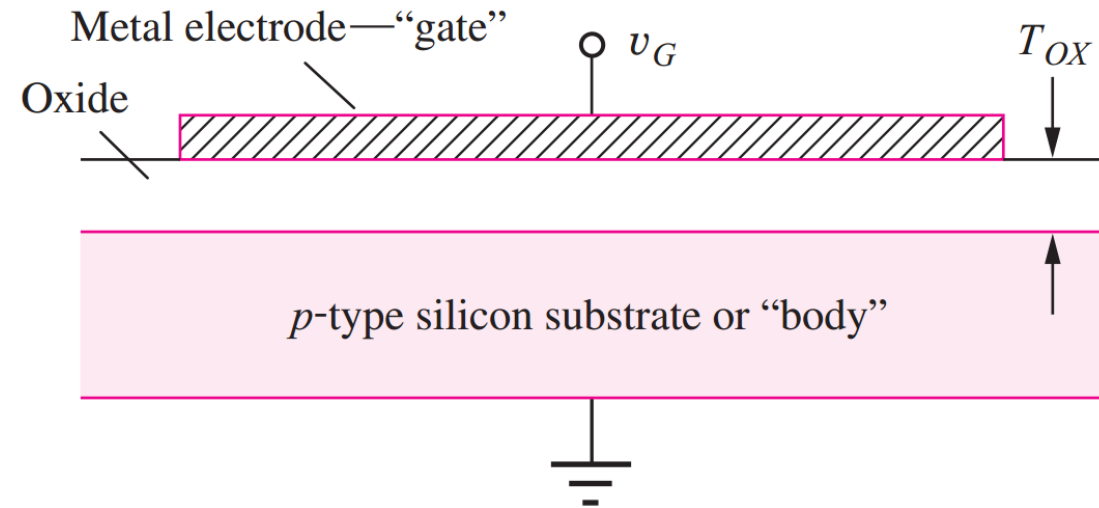
- 4.1 Tụ MOS
- 4.2 Cấu tạo của MOSFET
- 4.3 Nguyên lý hoạt động của MOSFET
- 4.4 Mô hình toán học của MOSFET
- 4.5 Đặc tuyến của MOSFET
- 4.6 Các hiệu ứng trong MOSFET



4.1 TỤ MOS

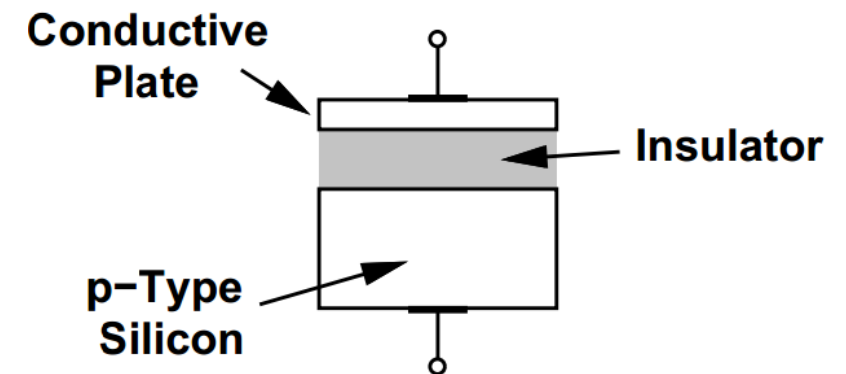
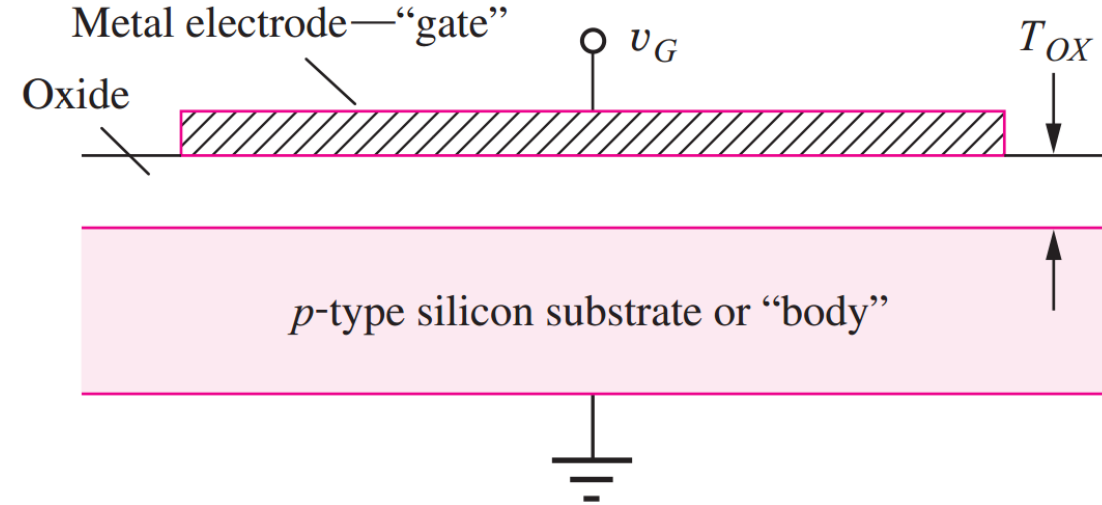
Cấu trúc MOS

- **MOS** = Metal – Oxide – Semiconductor
- Cấu trúc MOS được cấu tạo từ 3 lớp vật liệu:
 - Lớp trên cùng bằng **kim loại** (*metal*), được gọi là **cực cửa** (*gate*).
 - Lớp nằm giữa là **lớp oxit** (*oxide*) - vật liệu cách điện.
 - Lớp dưới cùng là **lớp bán dẫn** (*semiconductor*) *p* hoặc *n* có nồng độ pha tạp thấp, được gọi là **đế** (*substrate* hay *body*).



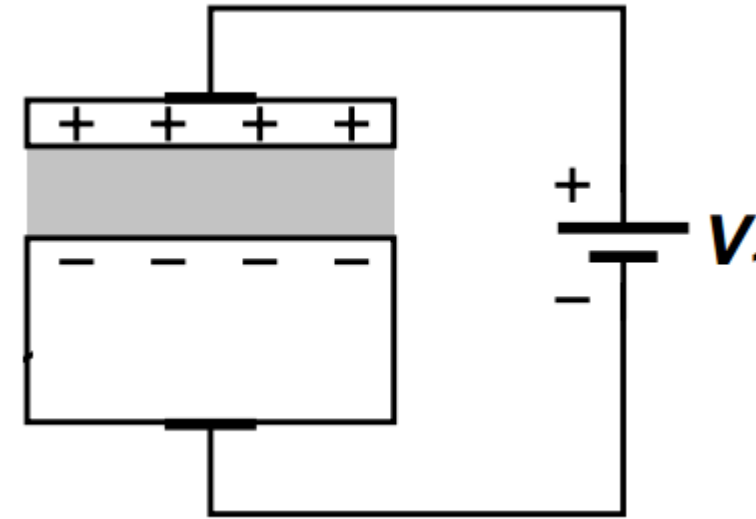
Cấu trúc MOS

- Cấu trúc của MOS tương tự như cấu trúc của tụ điện: 2 lớp vật liệu dẫn điện cách nhau bởi một lớp vật liệu cách điện.
- T_{ox} - độ dày của lớp oxit, là một trong những thông số quan trọng của MOS.
- Nếu lớp bán dẫn đế là loại p , ta có cấu trúc nMOS; nếu là loại n , ta có pMOS.



Nguyên lý hoạt động của MOS

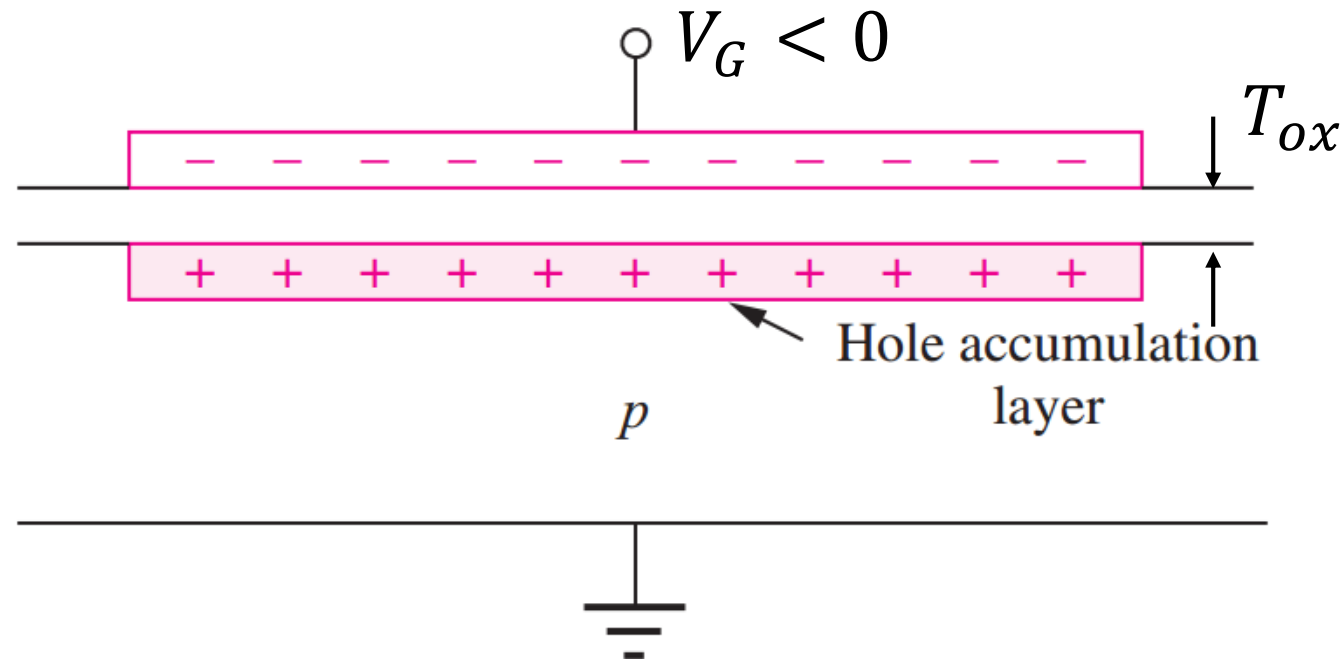
- Khi đặt điện áp vào giữa cực cửa và đế, điện tích trên cực cửa được cân bằng bởi điện tích ở lớp bán dẫn.
- Tùy thuộc vào giá trị điện áp giữa cực cửa và đế, MOS có 3 vùng hoạt động:
 - **vùng tích lũy** (accumulation region),
 - **vùng nghèo** (depletion region),
 - **vùng đảo** (inversion region).
- nMOS được lấy làm ví dụ để xem xét nguyên lý hoạt động.



Nguyên lý hoạt động của nMOS

- **Vùng tích lũy ($V_G < 0$):**

- Cực cửa tích điện âm sẽ hút các lỗ trống về phía bề mặt tiếp xúc giữa lớp oxit và đế bán dẫn và tạo thành lớp lỗ trống.
- $|Q_{c.cửa}| = Q_{l.t}$ và $d_1 = T_{ox}$

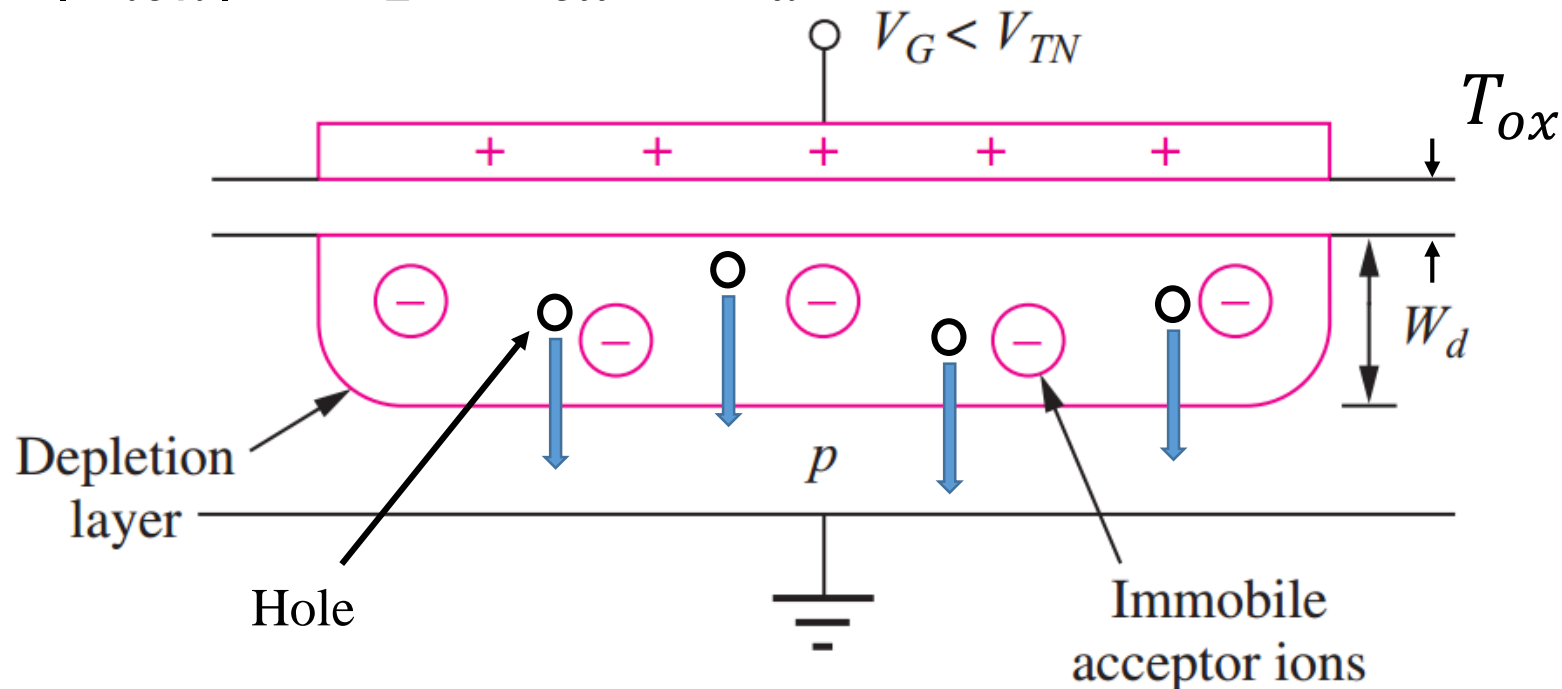


Nguyên lý hoạt động của nMOS

- **Vùng nghèo ($0 < V_G < V_{TN}$):**

- Các lỗ trống nằm sát với lớp oxit sẽ bị đẩy ra xa \rightarrow để lại các ion nguyên tử nhận (bị cố định trong mạng tinh thể) \rightarrow tạo nên vùng nghèo.

- $Q_{c.cửa} = |Q_{ion}|$ và $d_2 = T_{ox} + W_d$.

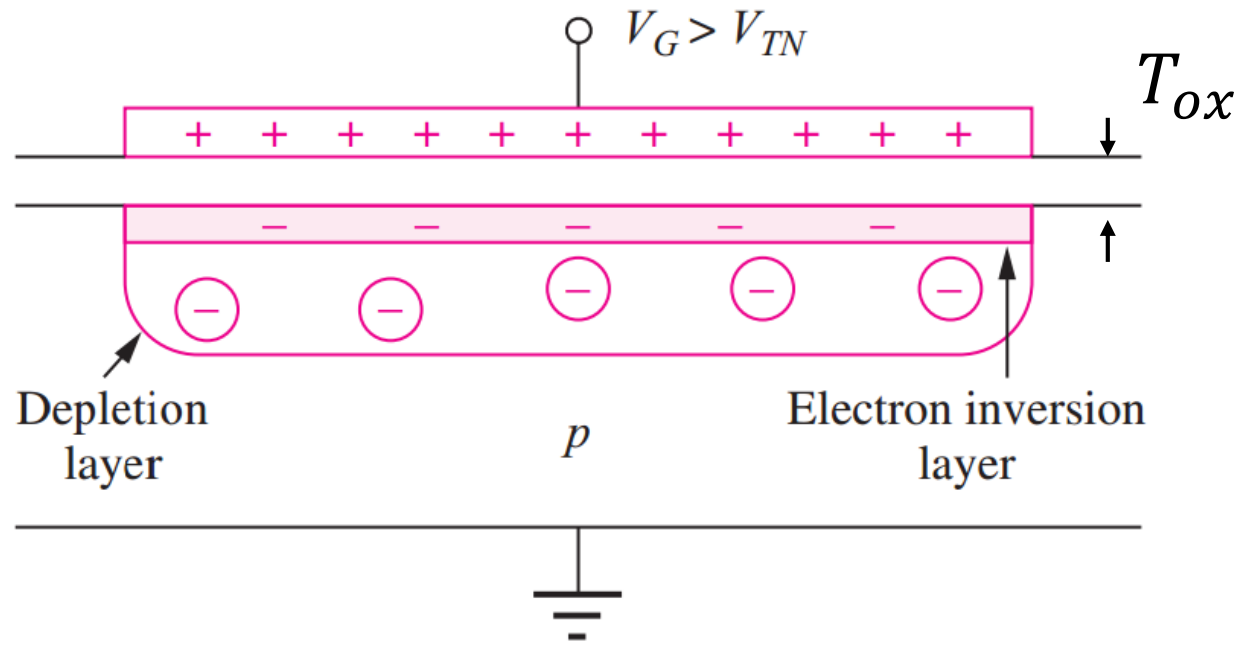


Nguyên lý hoạt động của nMOS

- **Vùng đảo ($V_G \geq V_{TN}$):**

- Các điện tử bị hút về phía mặt tiếp xúc giữa lớp oxit và đế \rightarrow mật độ điện tử $>$ mật độ lỗ trống \rightarrow tạo nên **lớp đảo** (*inversion layer*) hay còn gọi là **kênh** (*channel*).

- $Q_{c.cửa} = |Q_{đ.t} + Q_{ion}|$ và $d_3 = T_{ox}$.



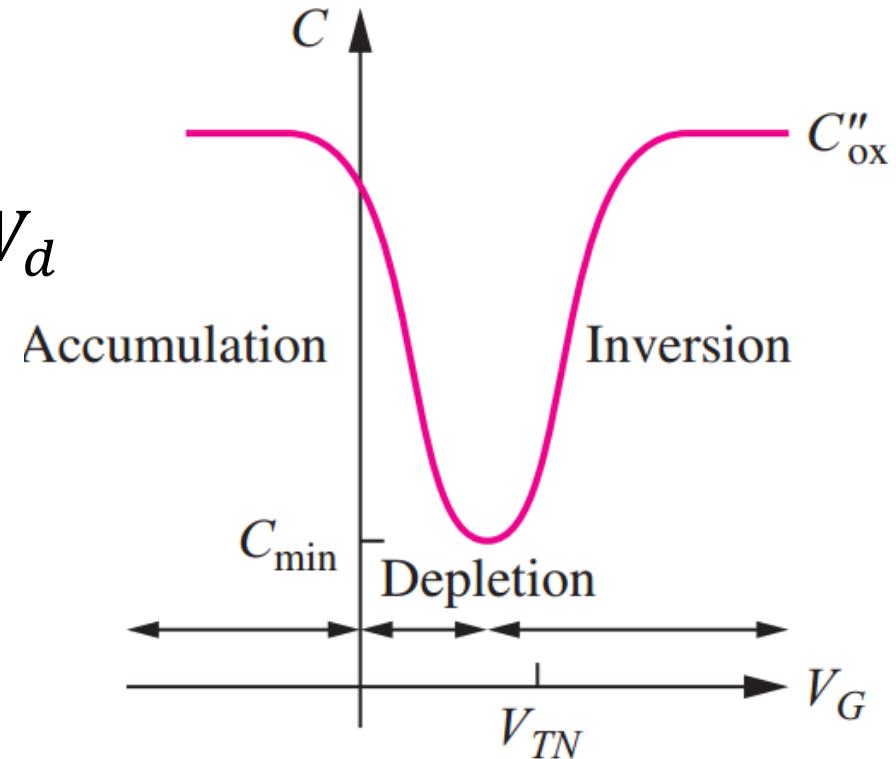
Nguyên lý hoạt động của nMOS

- Sự thay đổi điện dung của tụ MOS theo điện áp cực cửa:

- vùng tích lũy ($V_G < 0$): $d_1 = T_{ox}$
- vùng nghèo ($0 < V_G < V_{TN}$): $d_2 = T_{ox} + W_d$
- vùng đảo ($V_G \geq V_{TN}$): $d_3 = T_{ox}$

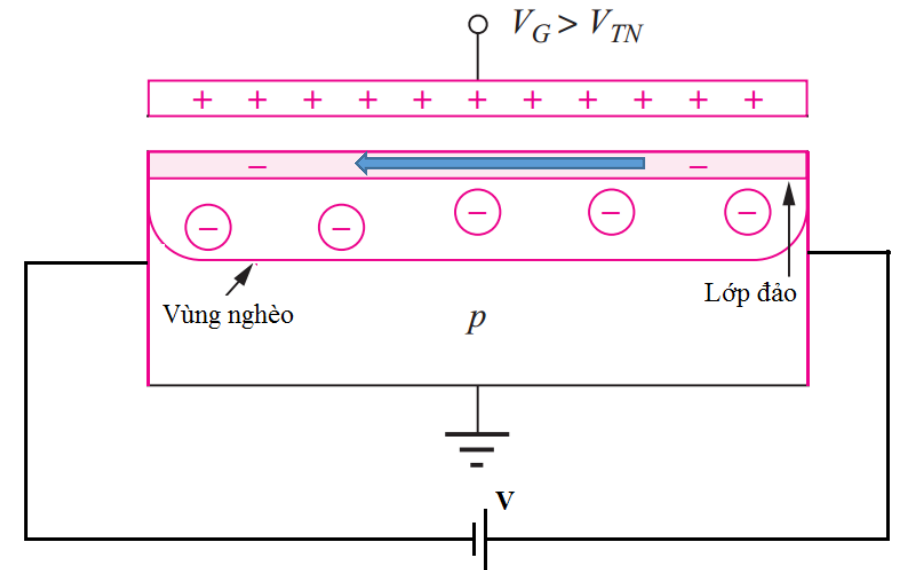
- Được biết, công thức tính điện dung của tụ :

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$$



Nguyên lý hoạt động của nMOS

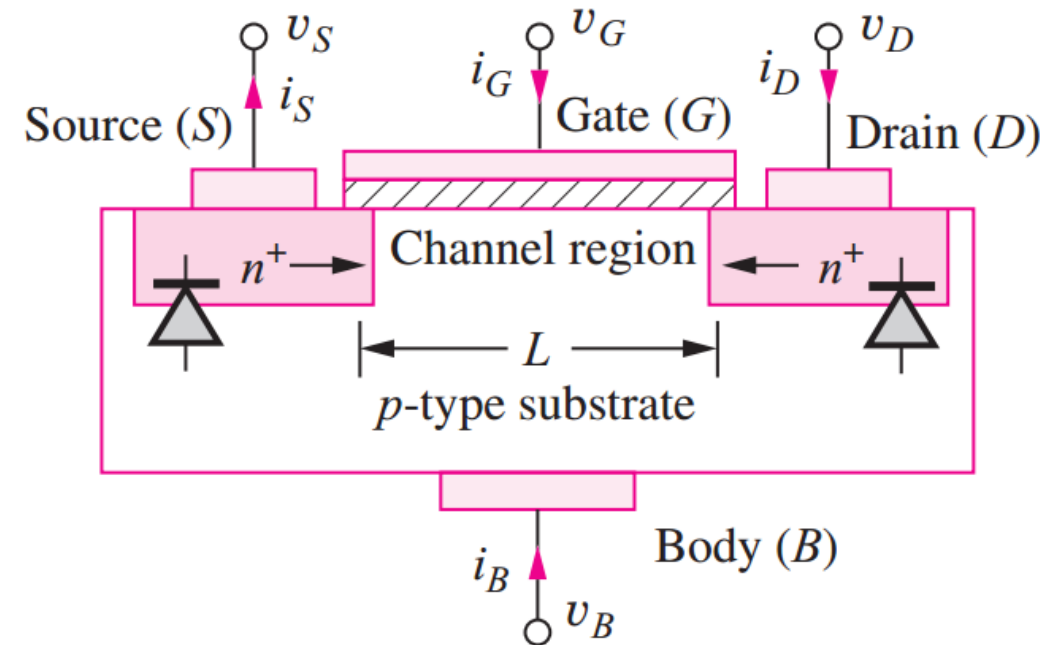
- Nếu đặt điện áp vào hai đầu phần đế, dòng chủ yếu chạy qua kênh.
- MOS có cấu trúc như tụ điện:
 - $Q = CV_G$ và $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{T_{ox}}$.
 - Đối với điện áp V_G không đổi, để tăng điện tích Q cần phải giảm độ dày lớp oxit T_{ox} .



4.2 CẤU TẠO CỦA MOSFET

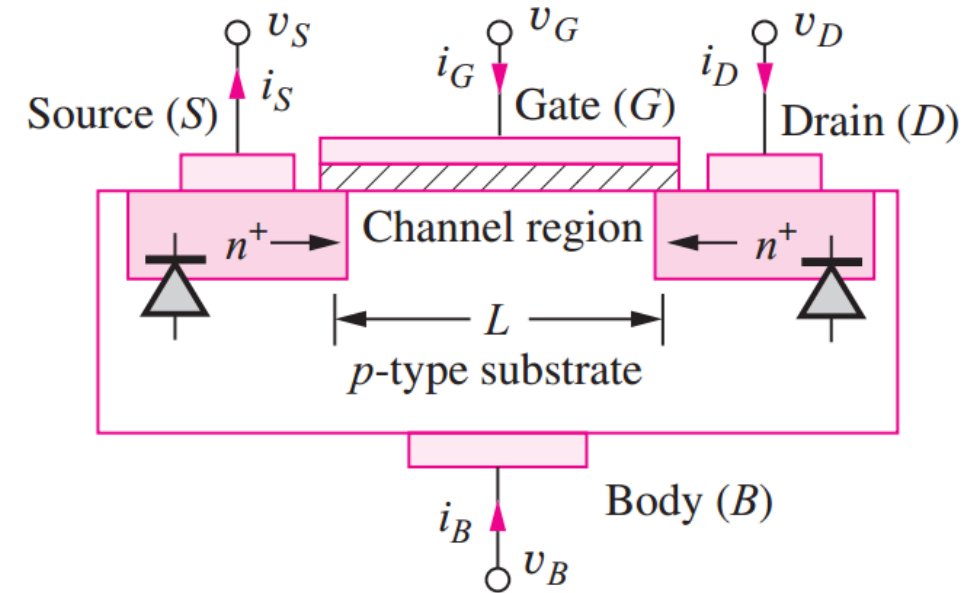
Cấu tạo của MOSFET kênh n

- MOSFET = Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor.
- MOSFET kênh n được lấy làm ví dụ xem xét.
- MOS là trung tâm trong cấu tạo của MOSFET. Cực nối với lớp kim loại được gọi là **cực cửa** – **G** (*gate*); cực nối với lớp đế bán dẫn – **cực đế** **B** (*body*).
- Hai vùng bán dẫn n^+ với nồng độ pha tạp cao được khuếch tán vào đế, tương ứng với hai cực – **cực nguồn** **S** (*source*) và **cực máng** **D** (*drain*). Hai vùng n^+ cung cấp điện tử cho kênh.



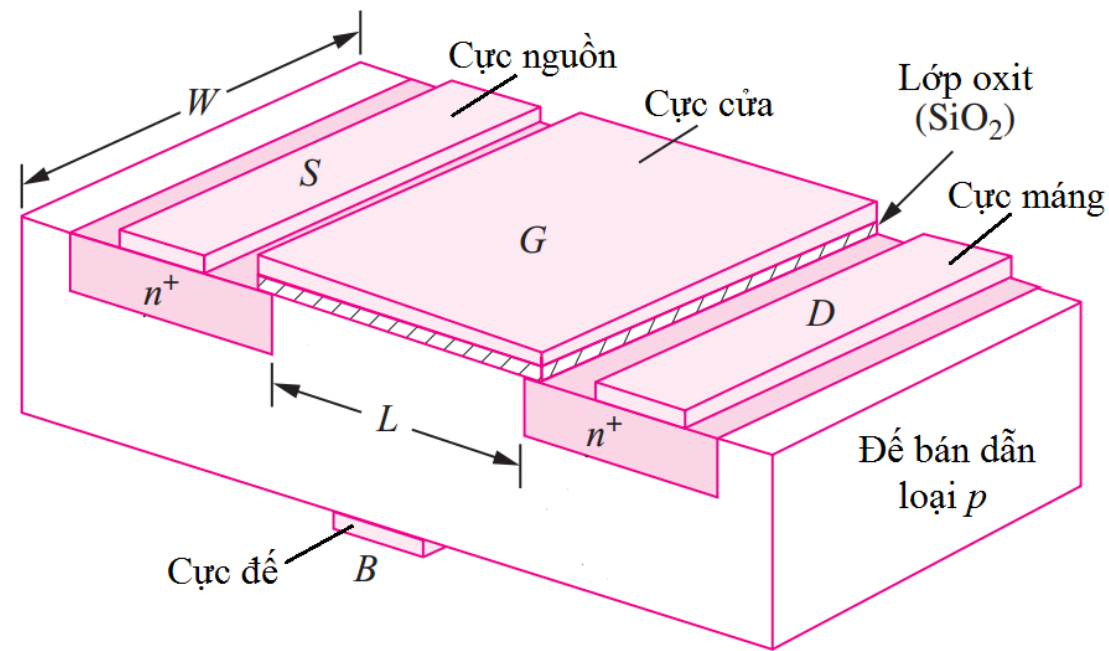
Cấu tạo của MOSFET kênh n

- Các vùng bán dẫn n^+ của 2 cực nguồn và cực máng và đế bán dẫn loại p hình thành nên các tiếp giáp pn .
- Hai tiếp giáp này cần phải phân cực ngược hoặc không phân cực để không ảnh hưởng đến hoạt động của MOSFET.
- Điện thế của cực đế luôn nhỏ hơn hoặc bằng điện thế của cực nguồn và cực máng.
- Thông thường, cực đế được nối với cực nguồn, còn cực máng được nối với nguồn điện áp dương. Đối với MOSFET kênh p , cực máng được nối với nguồn điện áp âm.



Cấu tạo của MOSFET kênh n

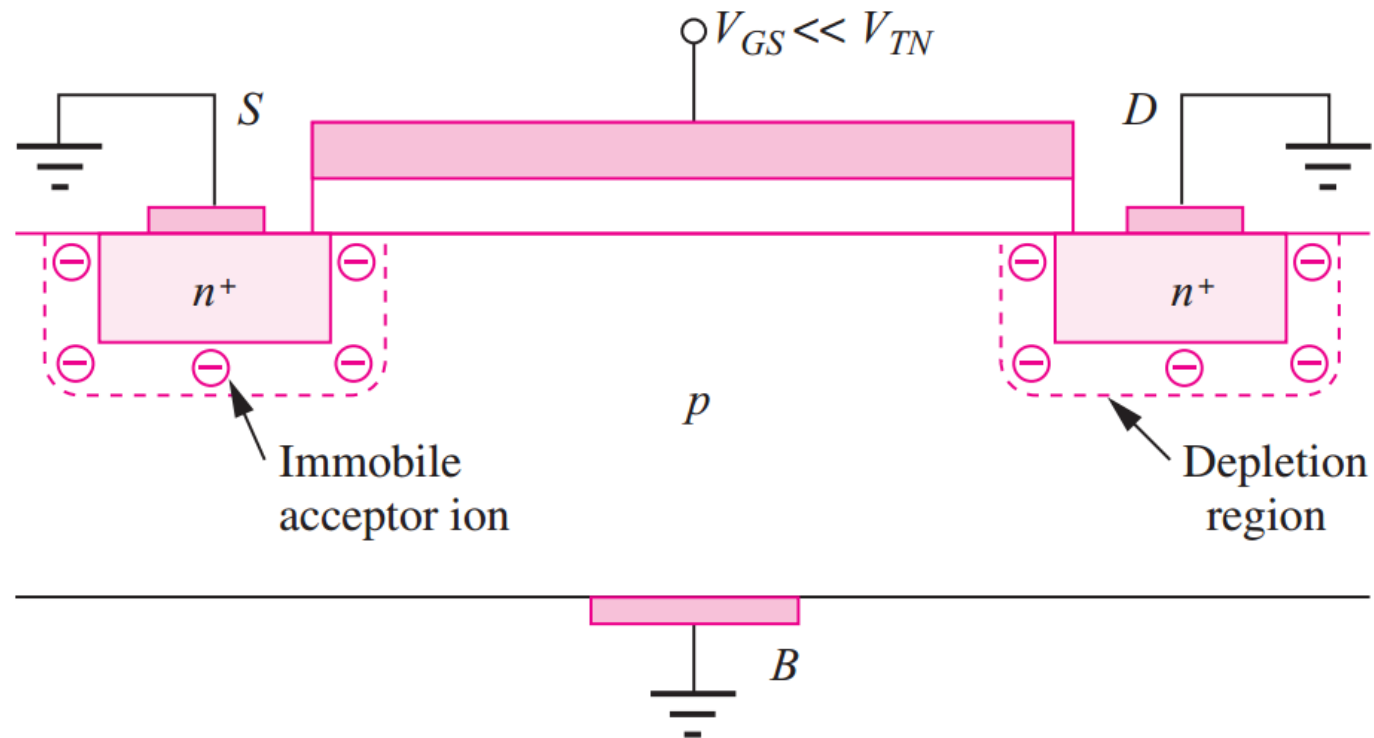
- Các thông số cấu tạo quan trọng của MOSFET:
 - L – độ dài của kênh,
 - W – độ rộng của kênh,
 - T_{ox} - độ dày của lớp oxit.
- Các thông số kích thước nêu trên ảnh hưởng đến các tính chất về điện của MOSFET, và được sử dụng trong thiết kế vi mạch.



4.3 NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG CỦA MOSFET

Nguyên lý hoạt động của MOSFET kênh n

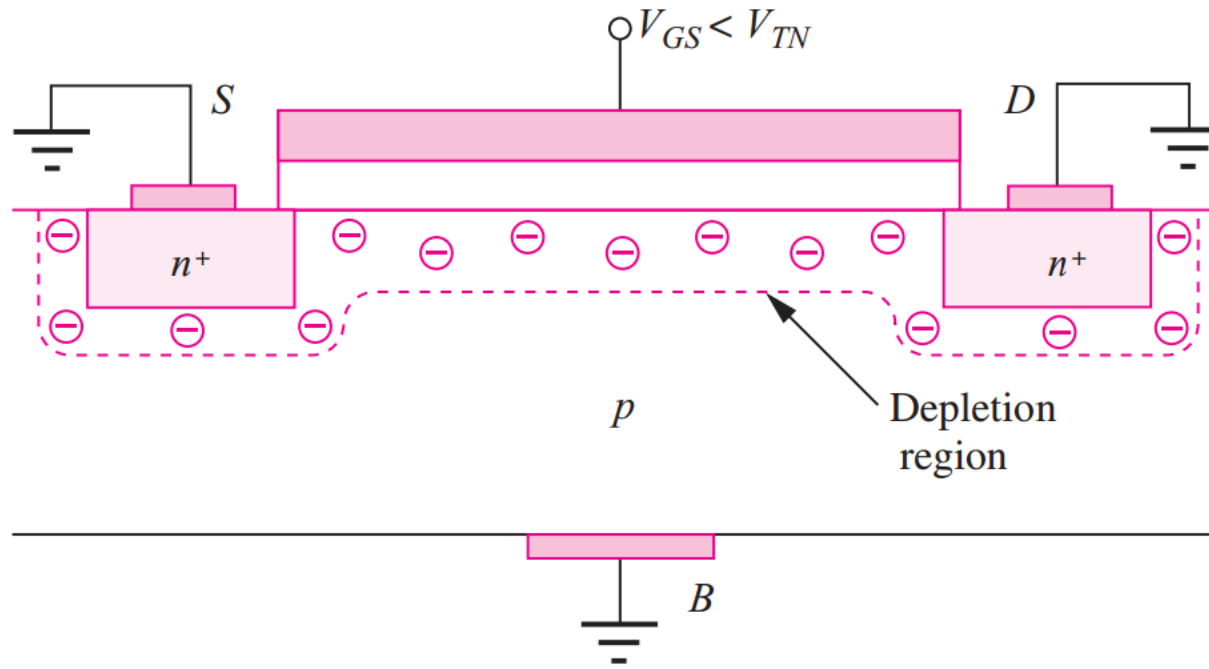
- Khi $V_{GS} < 0$:
 - tồn tại 2 vùng nghèo giữa vùng cực nguồn, cực màng và đế.
 - chỉ có dòng rò rất nhỏ.



Nguyên lý hoạt động của MOSFET kênh n

- Khi $0 < V_{GS} < V_{TN}$:

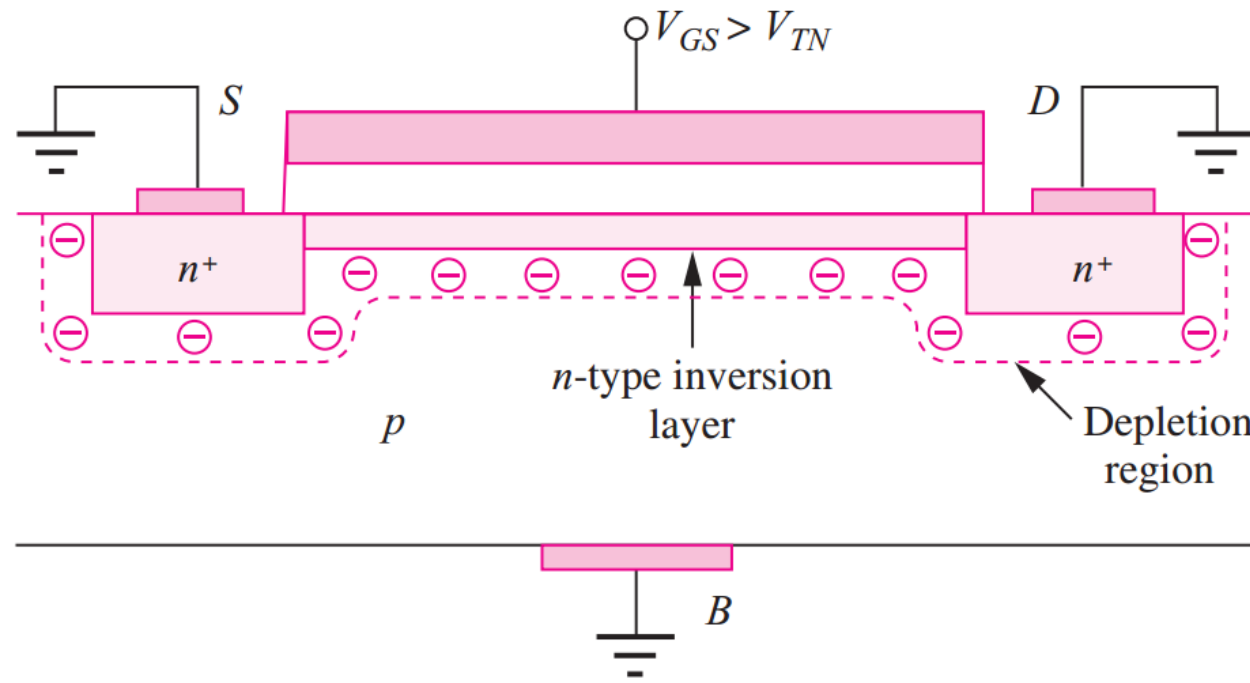
- Các lỗ trống ở vùng bán dẫn nằm dưới lớp oxit bị đẩy ra xa \rightarrow để lại các ion nguyên tử nhận \rightarrow hình thành vùng nghèo.
- các vùng nghèo dưới lớp oxit và của các tiếp giáp hợp lại với nhau \rightarrow không có dòng giữa cực nguồn và cực máng.



Nguyên lý hoạt động của MOSFET kênh n

- Khi $V_{GS} \geq V_{TN}$:

- Các điện tử trong bán dẫn p và vùng n^+ bị hút về phía dưới bề mặt lớp oxit \rightarrow tạo nên **kênh n** (lớp đảo) nối cực nguồn và cực máng.
- Nếu đặt nguồn điện áp giữa cực nguồn và cực máng, sẽ tạo ra dòng chạy từ cực máng, qua kênh và về cực nguồn.



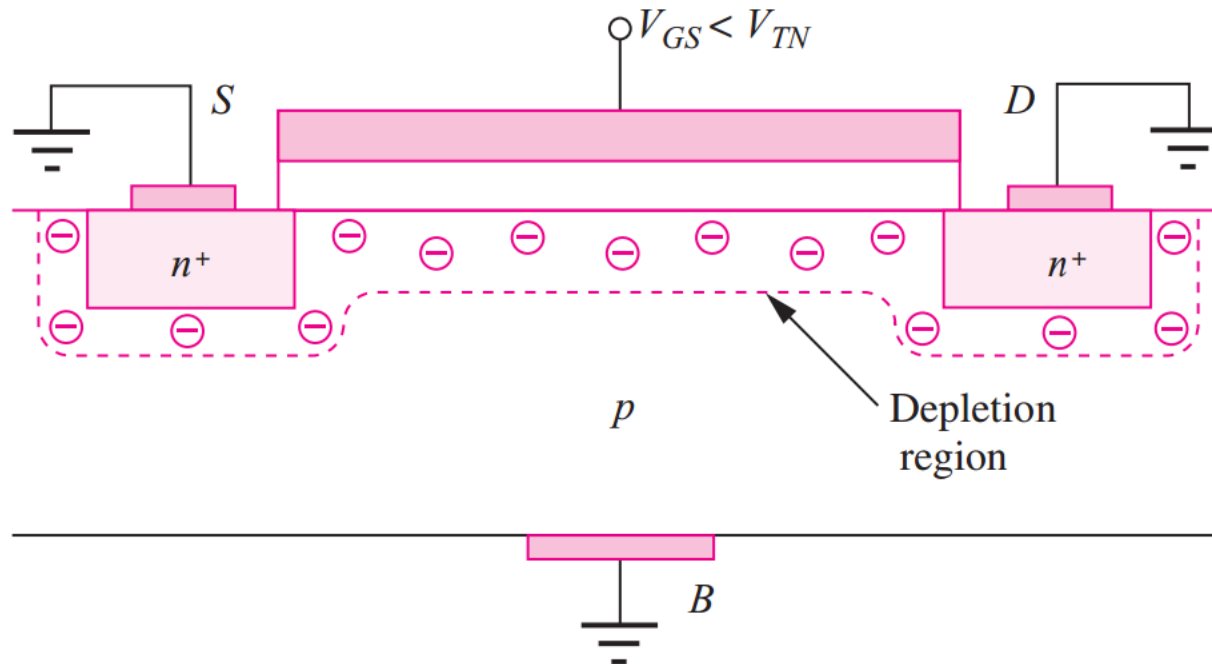
4.4 CÁC VÙNG HOẠT ĐỘNG CỦA MOSFET

Các vùng hoạt động của MOSFET

- MOSFET có 3 vùng hoạt động phụ thuộc vào mối quan hệ giữa v_{GS} và v_{DS} :
 - **Vùng ngắt** (cut-off region)
 - **Vùng tuyến tính** (linear region)
 - **Vùng bão hòa** (saturation region)

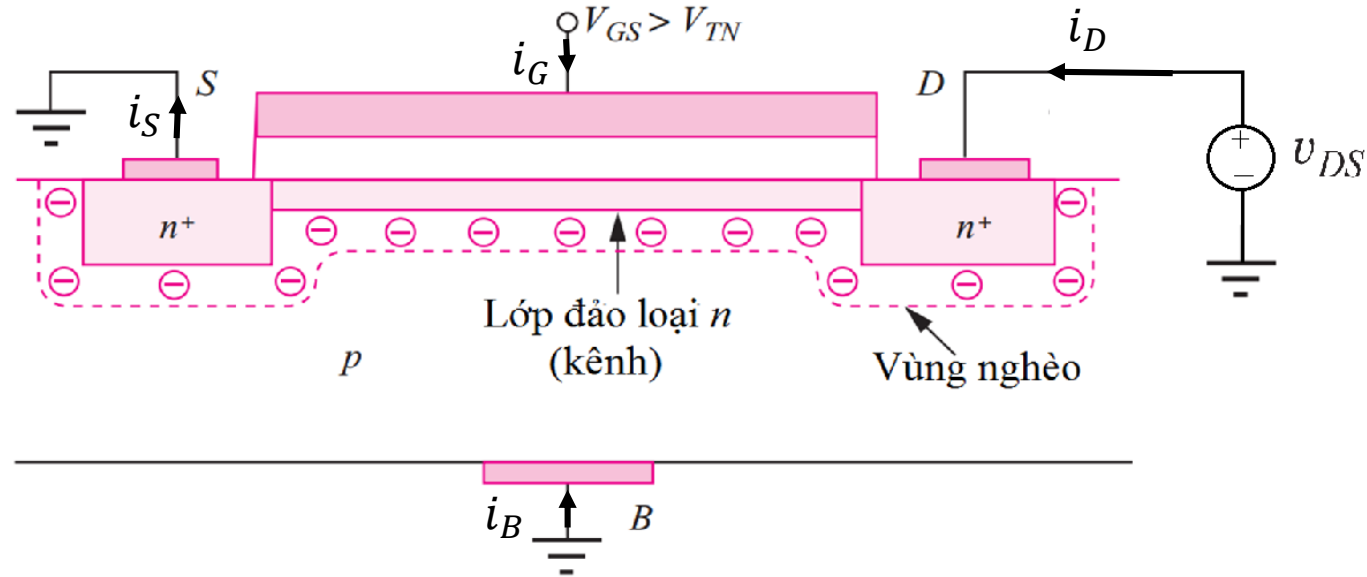
Vùng ngắt

- Vùng ngắt tương ứng với điện áp $v_{GS} < V_{TN}$.
- Khi đó, không có kênh nối liền cực máng và cực nguồn nên không có dòng chạy qua MOSFET.



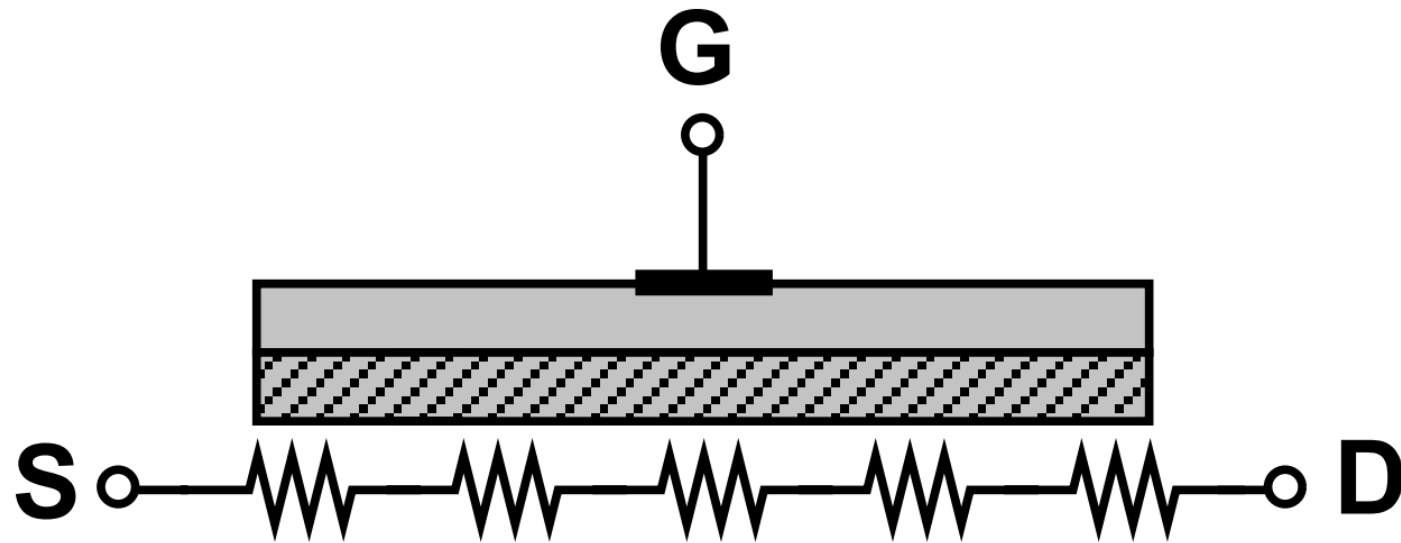
Vùng tuyến tính

- Vùng tuyến tính tương ứng với $v_{GS} \geq V_{TN}$ và v_{DS} nhỏ.
- Khi đó, kênh được hình thành, nối liền cực nguồn và cực máng.
- Điện áp dương v_{DS} giữa cực D và S sẽ tạo **dòng máng** i_D chạy qua kênh.
- Do lớp ô-xít cách điện nên $i_G \approx 0$. Ngoài ra, các tiếp giáp B-S và B-D phân cực ngược nên $i_B \approx 0$. Do đó, $i_D = i_S$.



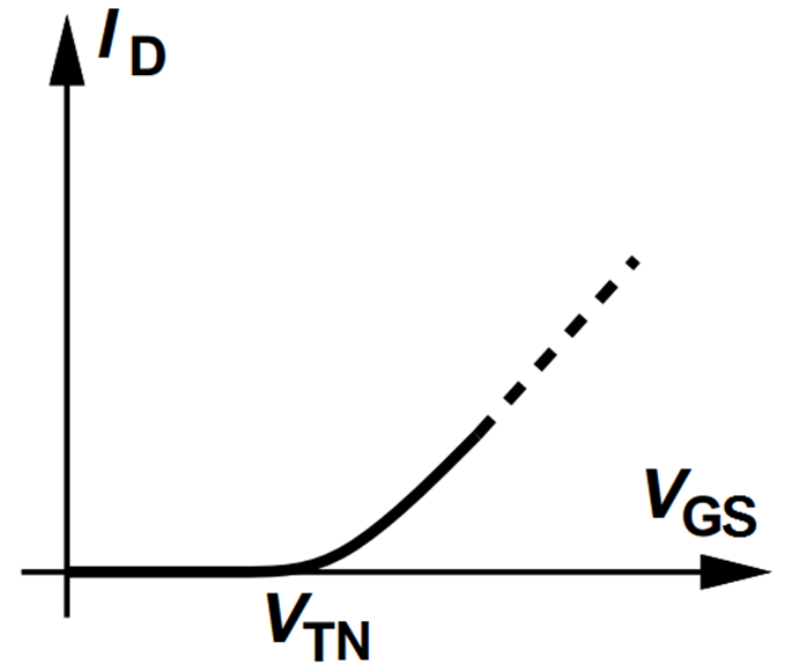
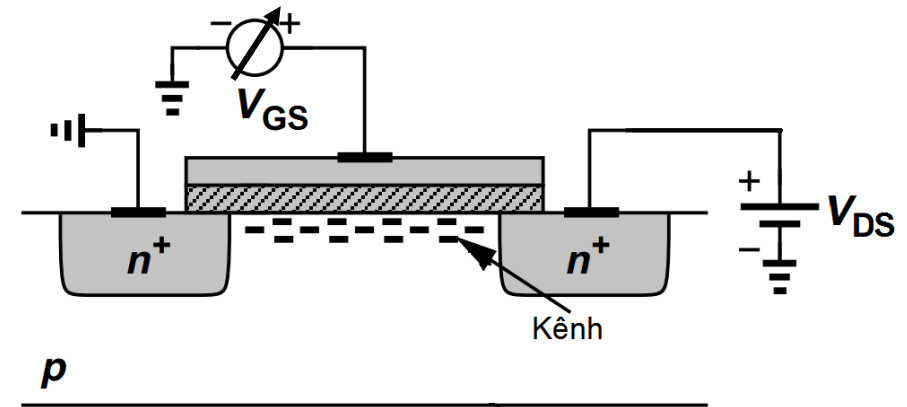
Vùng tuyến tính

- Kênh nối cực D và cực S được xem như một điện trở.
- Khi $v_{GS} > V_{TN}$ và điện áp v_{DS} nhỏ, MOSFET kênh n hoạt động trong **vùng tuyến tính**.



Vùng tuyến tính

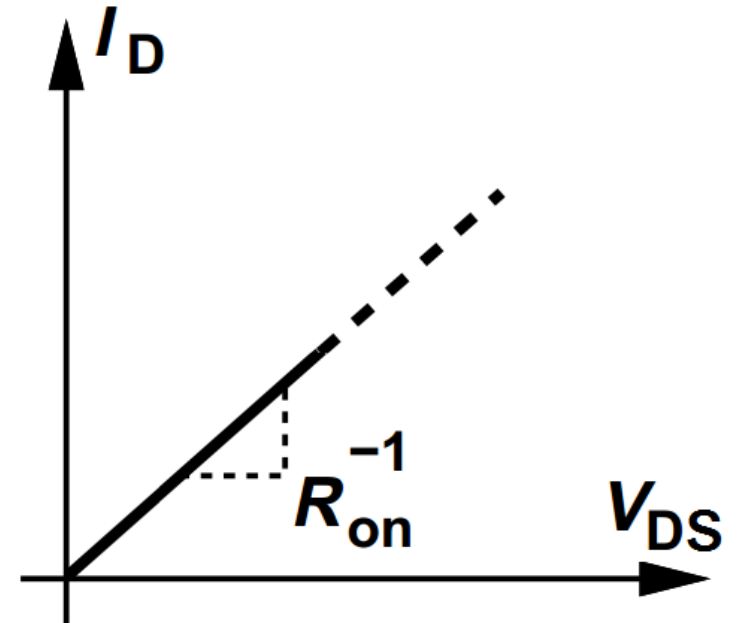
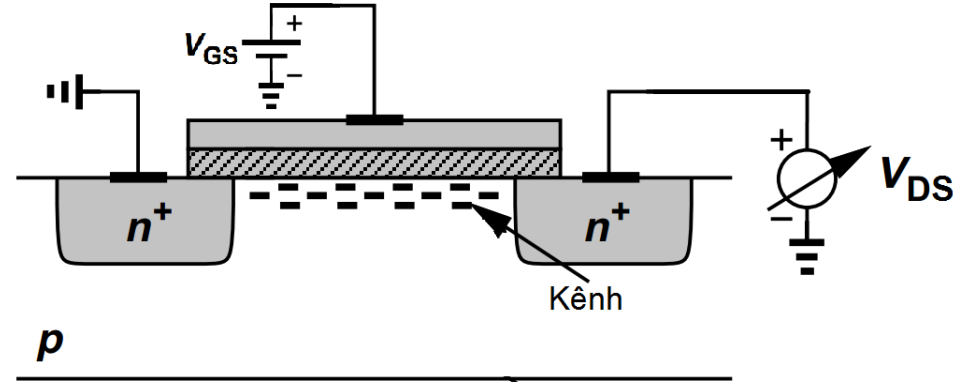
- Khi điện áp $v_{GS} < V_{TN}$, không có dòng chạy qua MOSFET do không có kênh.
- Khi điện áp $v_{GS} \geq V_{TN}$, kênh được hình thành và có dòng máng i_D chạy qua kênh.
- Nếu giữ điện áp V_{DS} không đổi và tăng v_{GS} , kênh sẽ càng giàu điện tử nên dòng máng i_D tăng.



Vùng tuyến tính

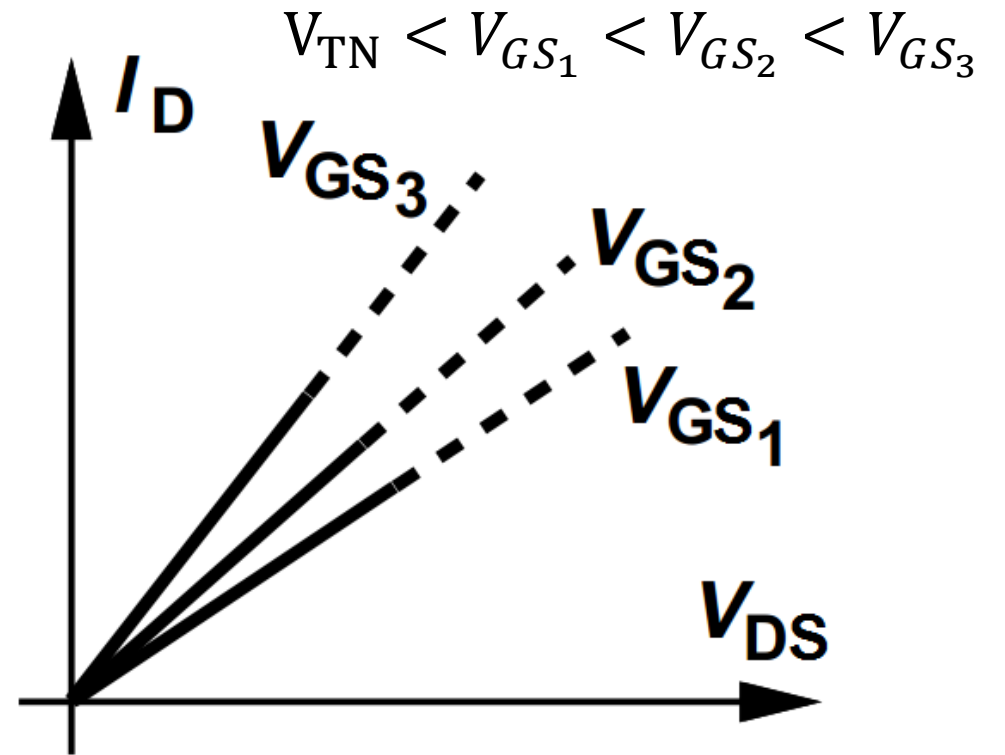
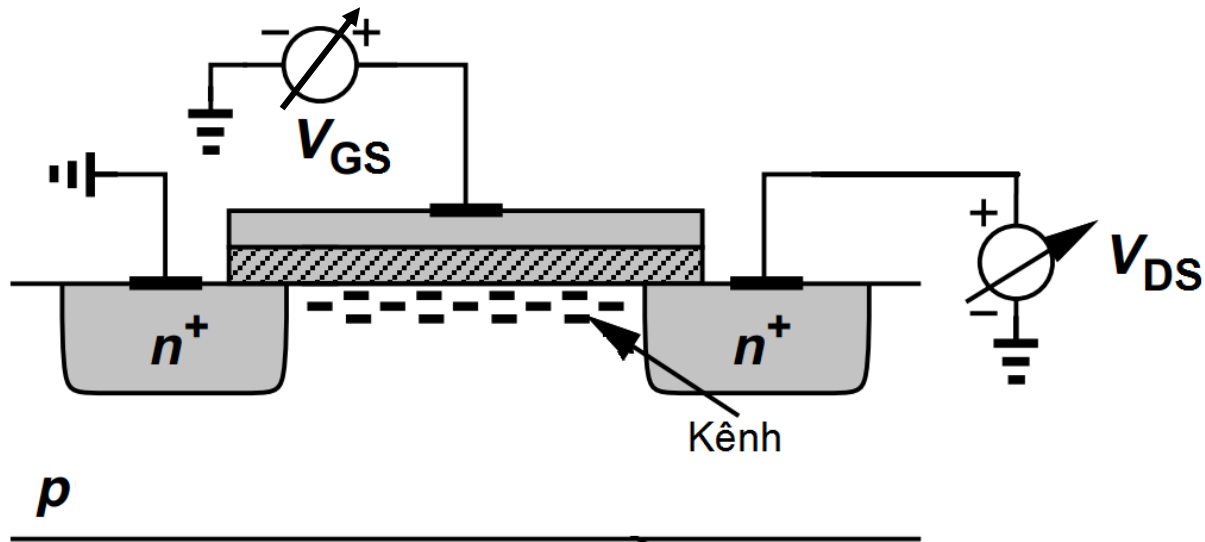
- Nếu giữ V_{GS} không đổi và tăng điện áp v_{DS} thì dòng i_D tăng tuyến tính.
- Độ dốc của đặc tuyến $i_D - v_{DS}$ chính bằng nghịch đảo điện trở giữa cực máng và cực nguồn R_{on} (bao gồm kênh):

$$\tan \alpha = \frac{i_D}{v_{DS}} = \frac{1}{R_{on}}$$



Vùng tuyến tính

- Đặc tuyến $i_D - v_{DS}$ tăng khi điện áp v_{GS} tăng.



Vùng tuyến tính

Bài tập ví dụ:

Đặc tuyến $i_D - v_{DS}$ thay đổi như thế nào khi:

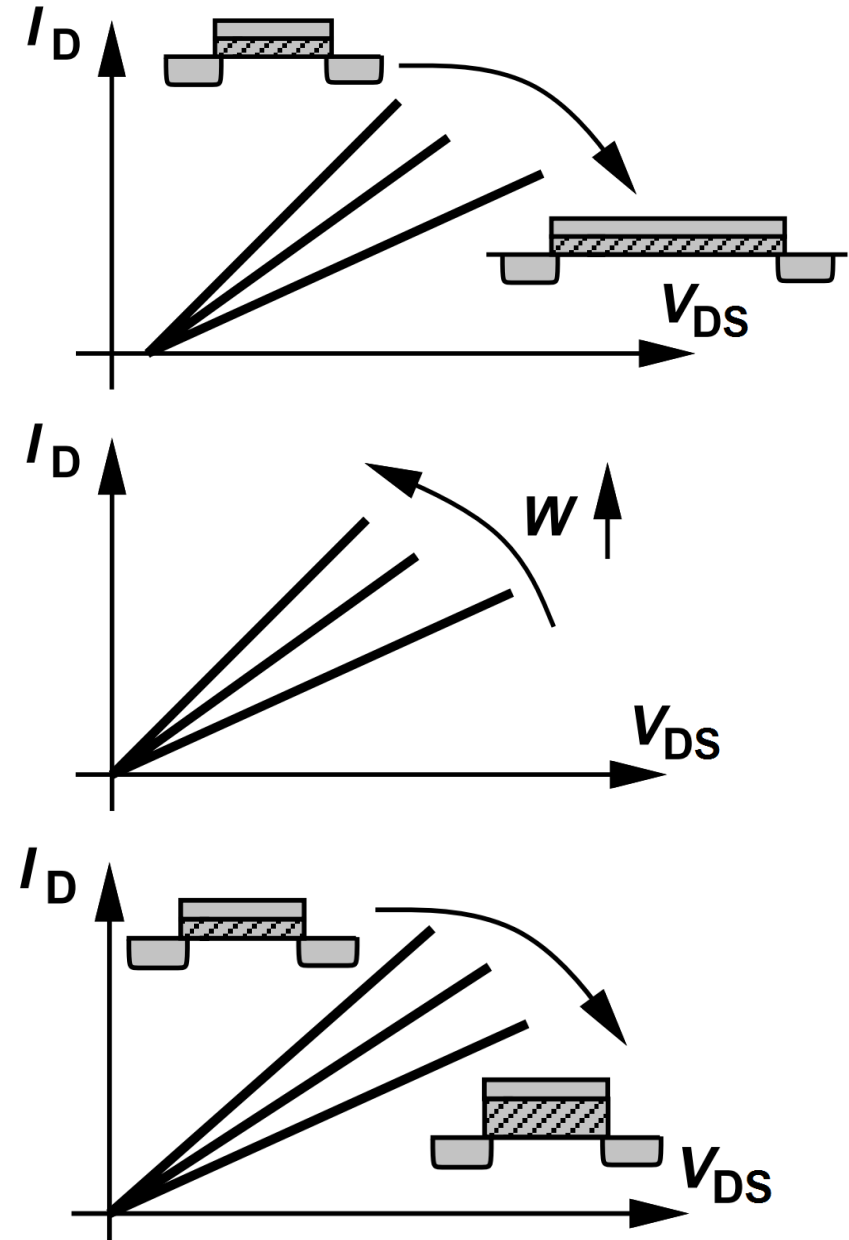
- a) độ dài kênh tăng
- b) độ rộng kênh tăng
- c) độ dày lớp ô-xít tăng

Vùng tuyến tính

Đáp án:

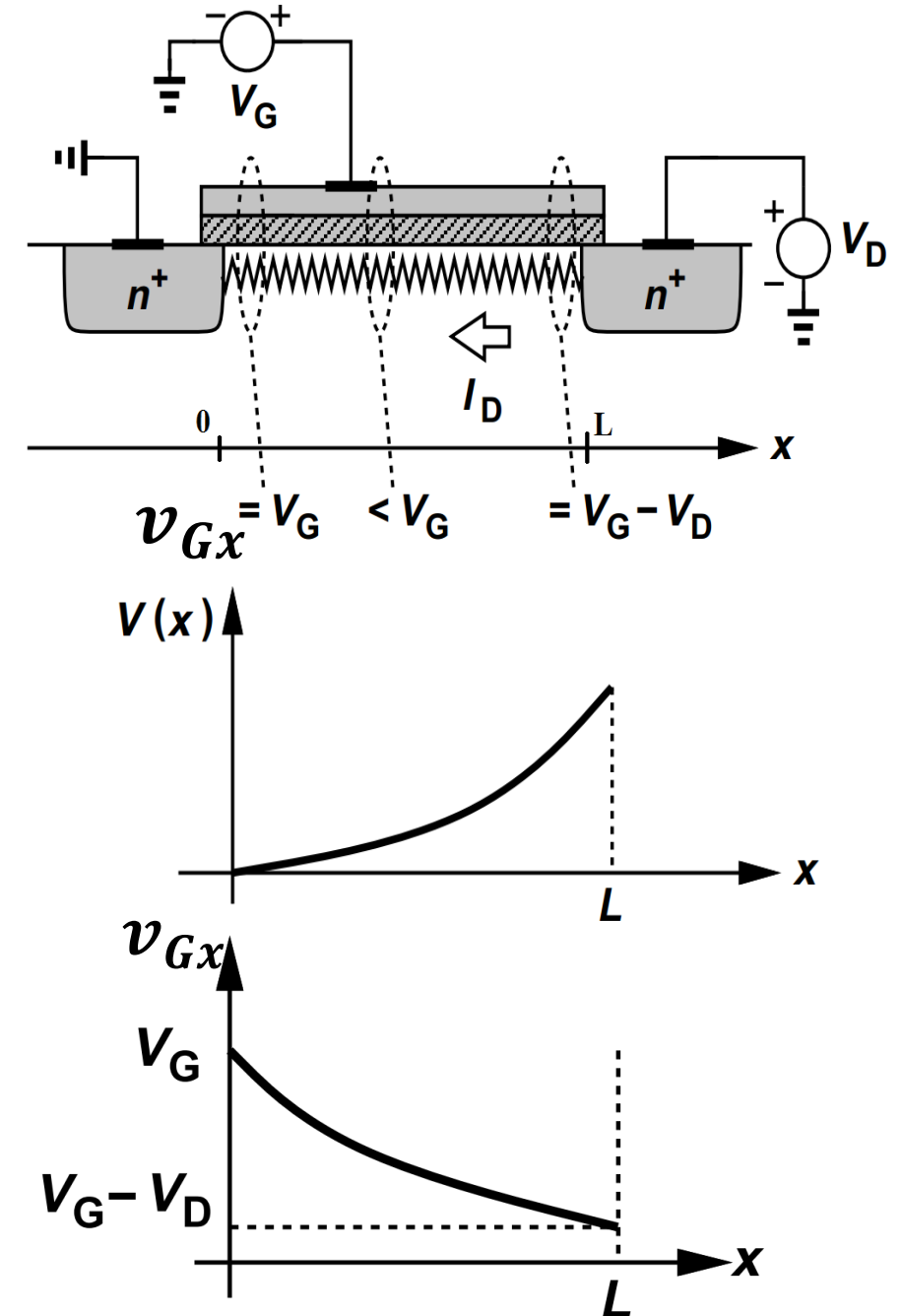
Đặc tuyến $i_D - v_{DS}$:

- a) giảm khi độ dài kênh tăng.
- b) tăng khi độ rộng kênh tăng.
- c) giảm khi độ dày lớp ô-xít tăng.



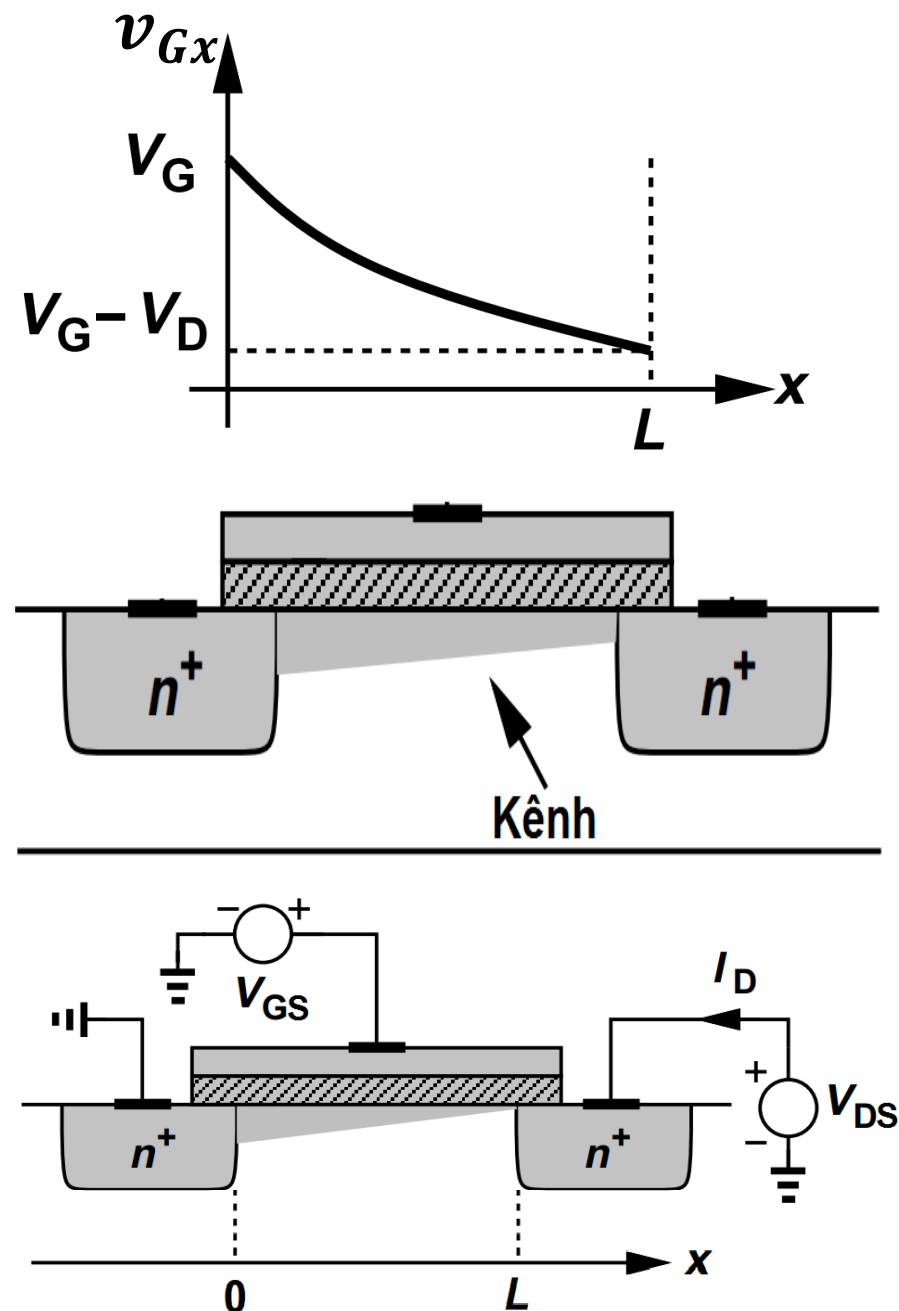
Vùng bão hòa

- Xét một điểm bất kỳ trên kênh cách cực nguồn một khoảng x .
- Gọi L là độ dài của kênh; điện áp tại cực cửa và cực máng lần lượt là V_G và V_D .
- Điện áp v_x giữa một điểm trên kênh so với cực nguồn tăng dần về phía cực máng D.
- Điện áp v_{Gx} giữa cực cửa và một điểm trên kênh giảm dần về phía cực máng D.



Vùng bão hòa

- Do điện áp v_{Gx} giữa cực cửa và một điểm trên kênh giảm dần về phía cực máng D nên độ dày của kênh giảm dần về phía cực máng.
- Điều kiện để tạo nên kênh:
$$v_{Gx} > V_{TN}$$
- Nếu giữ V_{GS} không đổi và tăng v_{DS} thì đến một giá trị điện áp V_{DS} sao cho điện áp V_{GD} bắt đầu nhỏ hơn điện áp ngưỡng thì kênh sẽ bị mất tại cực máng. Hiện tượng này được gọi là **thắt kênh** (pinch-off).



Vùng bão hòa

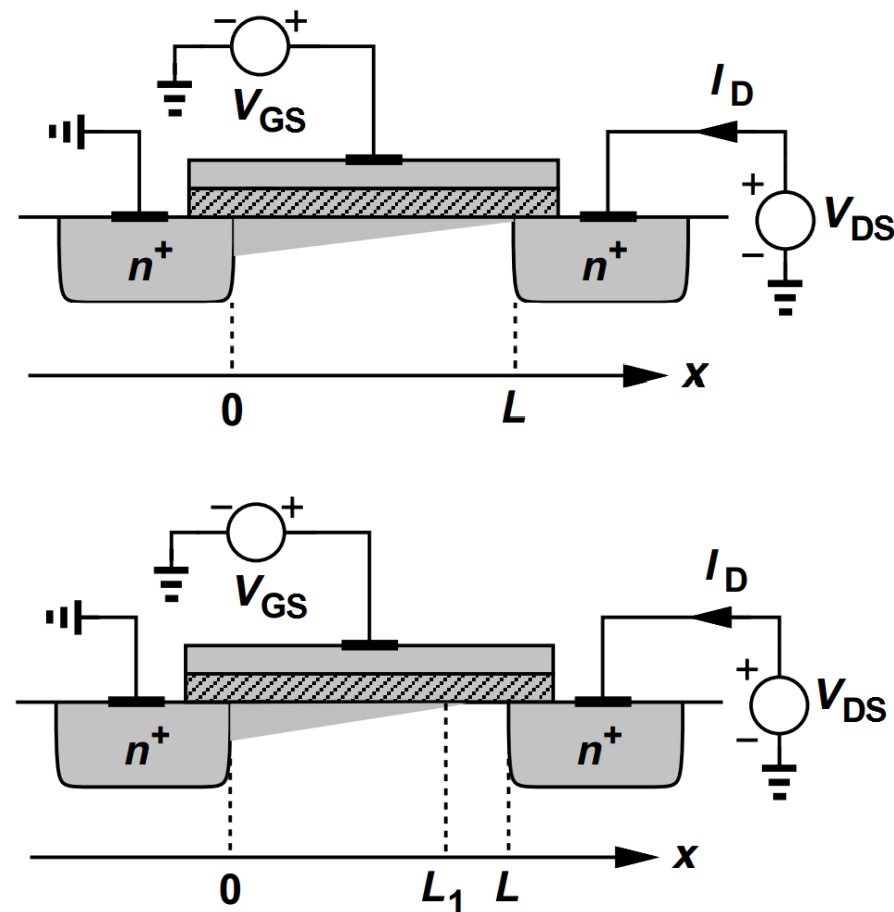
- Điện áp v_{DS} tại đó xảy ra thắt kênh tại cực máng được ký hiệu là V_{DSAT} :

$$V_{GD} = V_{GS} - V_{DSAT} = V_{TN}$$
$$\Rightarrow V_{DSAT} = V_{GS} - V_{TN}$$

- Nếu tiếp tục tăng v_{DS} thì điểm kế tiếp cực máng sẽ có điện áp V_{Gx} giảm xuống bằng V_{TN} và kênh bị thắt:

$$V_{Gx} = V_{GS} - V_{x_{p.o}} = V_{TN}$$
$$\Rightarrow V_{x_{p.o}} = V_{GS} - V_{TN}$$

- Như vậy, khi điện áp v_{DS} tăng điểm thắt kênh sẽ dịch chuyển dần về phía cực nguồn.



Vùng bão hòa

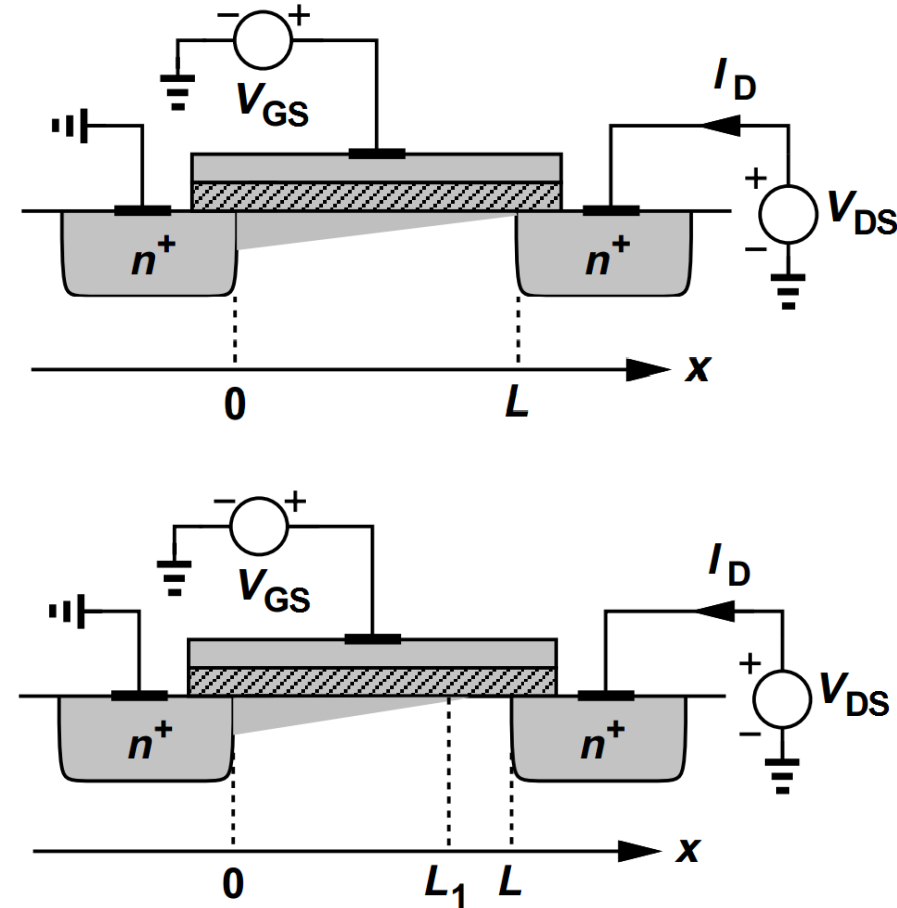
- Điện áp v_{DS} tại đó xảy ra thắt kênh tại cực máng được ký hiệu là V_{DSAT} :

$$V_{GD} = V_{GS} - V_{DSAT} = V_{TN}$$
$$\Rightarrow V_{DSAT} = V_{GS} - V_{TN}$$

- Nếu tiếp tục tăng v_{DS} thì điểm kế tiếp cực máng sẽ có điện áp V_{Gx} giảm xuống bằng V_{TN} và kênh bị thắt:

$$V_{Gx} = V_{GS} - V_{x_{p.o}} = V_{TN}$$
$$\Rightarrow V_{x_{p.o}} = V_{GS} - V_{TN}$$

- Như vậy, hiện tượng xảy ra đầu tiên tại cực máng và khi điện áp v_{DS} tăng điểm thắt kênh sẽ dịch chuyển dần về phía cực nguồn.



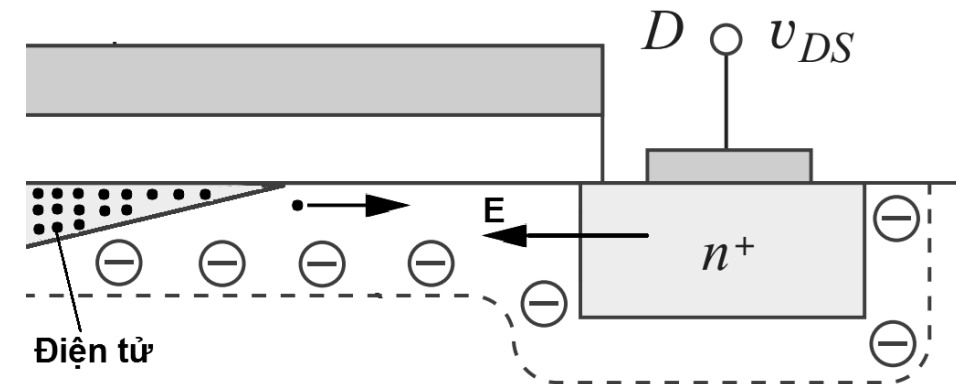
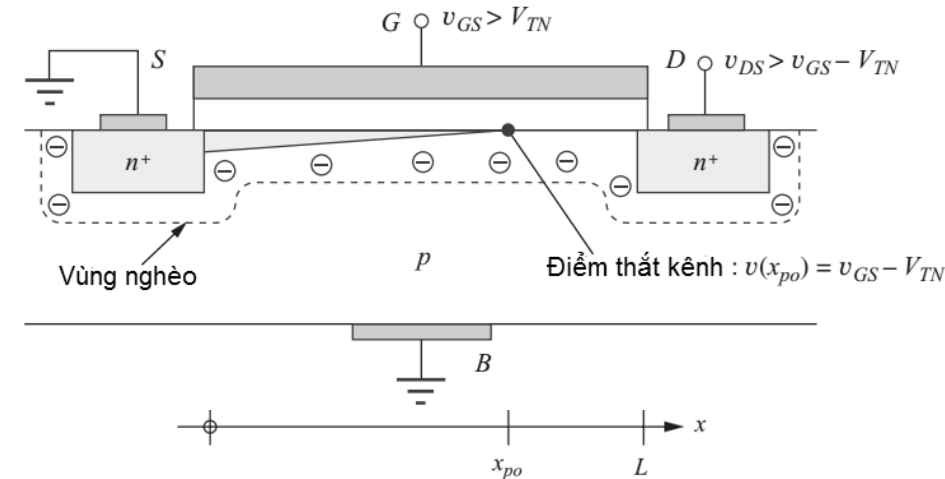
Vùng bão hòa

- Điện áp giữa điểm thắt kênh bất kỳ và cực nguồn S là không đổi:

$$V_{x_{p.o}} = V_{GS} - V_{TN}$$

- Khi điện tử dịch chuyển đến điểm thắt kênh sẽ được điện trường tiếp xúc của vùng nghèo của tiếp giáp B-D cuốn sang cực máng D, sinh ra dòng i_D .
- Khi bắt đầu xảy ra hiện tượng thắt kênh tại cực máng, MOSFET bắt đầu hoạt động trong vùng bão hòa và dòng máng xem như không đổi.
- MOSFET hoạt động trong vùng bão hòa khi v_{DS} đủ lớn và thỏa mãn điều kiện:

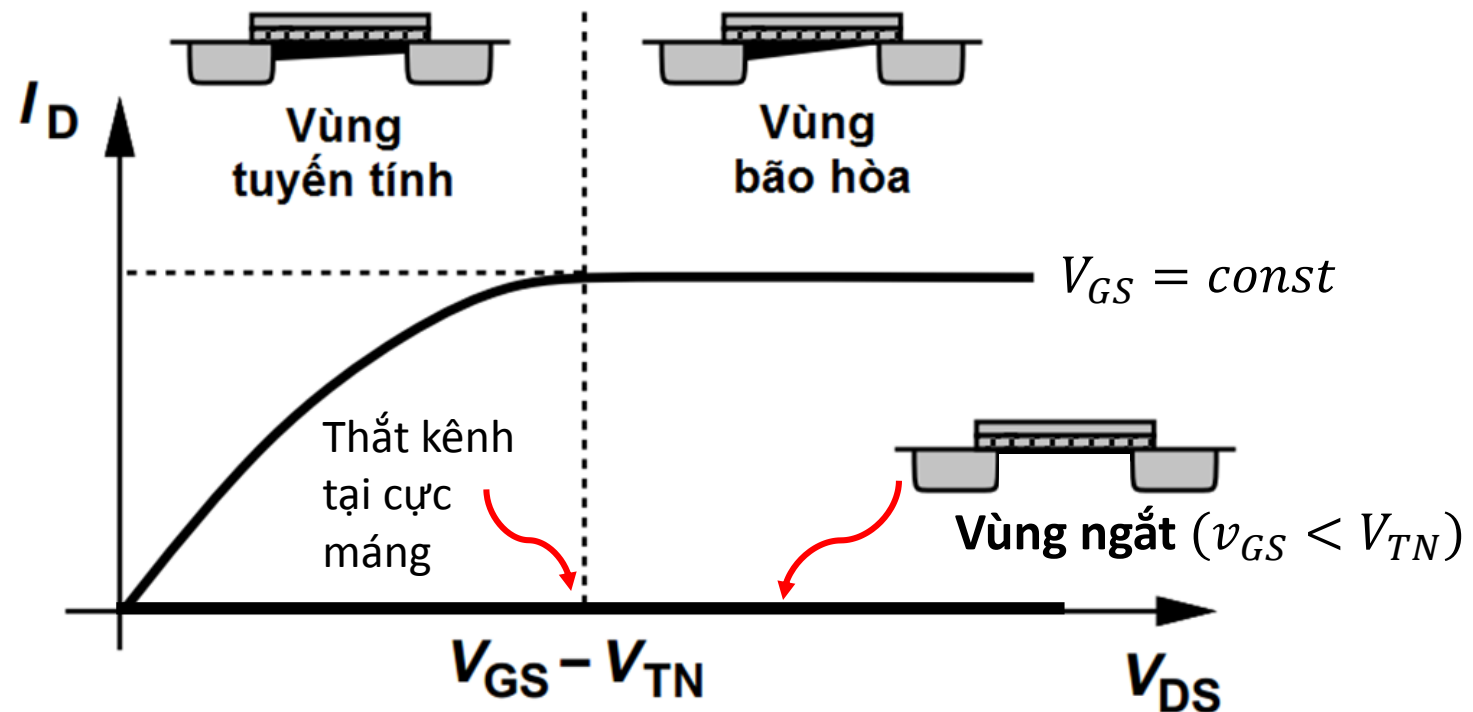
$$v_{DS} \geq V_{GS} - V_{TN}$$



Đặc tuyến của MOSFET kênh n

Đặc tuyến $i_D - v_{DS}$ của MOSFET được phân thành 3 vùng:

- Vùng ngắt: $v_{GS} < V_{TN}$
- Vùng tuyến tính: $v_{DS} < V_{GS} - V_{TN}$
- Vùng bão hòa: $v_{DS} \geq V_{GS} - V_{TN}$



4.5 MÔ HÌNH TOÁN HỌC CỦA MOSFET

Mô hình toán học của MOSFET kênh n

- Đối với vùng tuyến tính $v_{GS} - V_{TN} \geq v_{DS} \geq 0$:

$$i_D = K_n \left(v_{GS} - V_{TN} - \frac{v_{DS}}{2} \right) v_{DS} ,$$

với $K_n = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}$ - hệ số hỗ dẫn (A/V^2); μ_n - độ linh động của điện tử;
 C_{ox} - điện dung cực cửa.

- Đối với vùng bão hòa $v_{DS} \geq v_{GS} - V_{TN} \geq 0$:

$$i_D = \frac{1}{2} K_n (v_{GS} - V_{TN})^2$$

4.5 ĐẶC TUYẾN CỦA MOSFET

Đặc tuyến của MOSFET kênh n

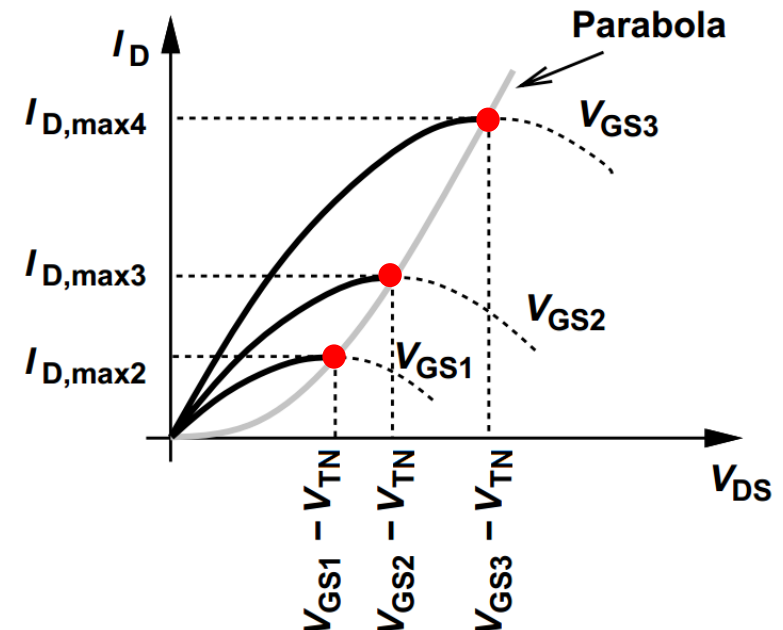
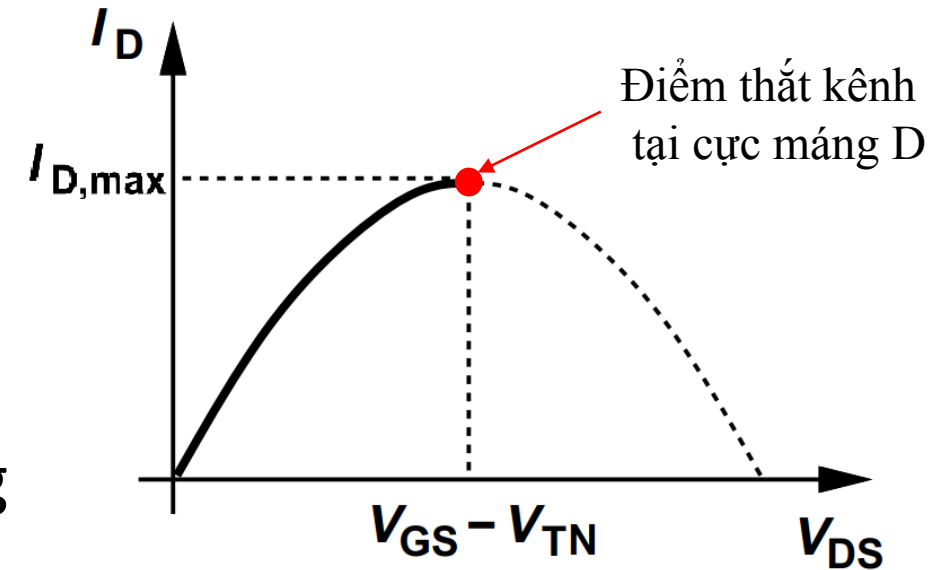
- Đối với vùng tuyến tính $v_{GS} - V_{TN} \geq v_{DS} \geq 0$:

$$i_D = K_n \left(v_{GS} - V_{TN} - \frac{v_{DS}}{2} \right) v_{DS}.$$

- Đặc tuyến $i_D - v_{DS}$ trong vùng này có dạng parabol với đỉnh tại:

$$\begin{cases} I_{Dmax} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (v_{GS} - V_{TN})^2 \\ V_{DS} = V_{GS} - V_{TN} \end{cases}$$

- Khi v_{GS} tăng: $I_{Dmax} \propto (v_{GS} - V_{TN})^2$



Đặc tuyến của MOSFET kênh n

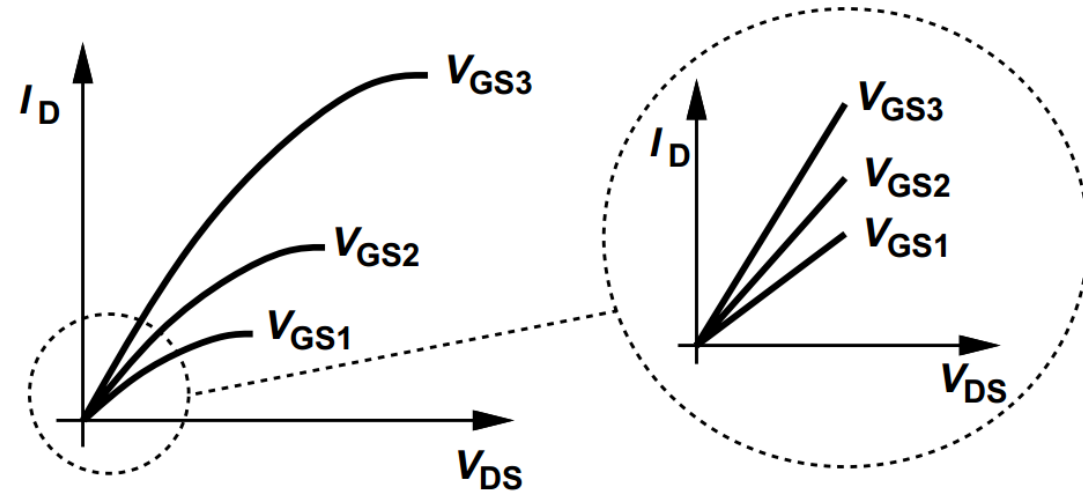
- Đối với vùng tuyến tính, khi $v_{GS} - V_{TN} \gg \frac{v_{DS}}{2} \geq 0$:

$$i_D \cong \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (v_{GS} - V_{TN}) v_{DS}.$$

⇒ đặc tuyến xem như tuyến tính.

- Điện trở R_{on} :

$$R_{on} = \left[\frac{\partial i_D}{\partial v_{DS}} \right]^{-1} = \frac{1}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (v_{GS} - V_{TN})}$$

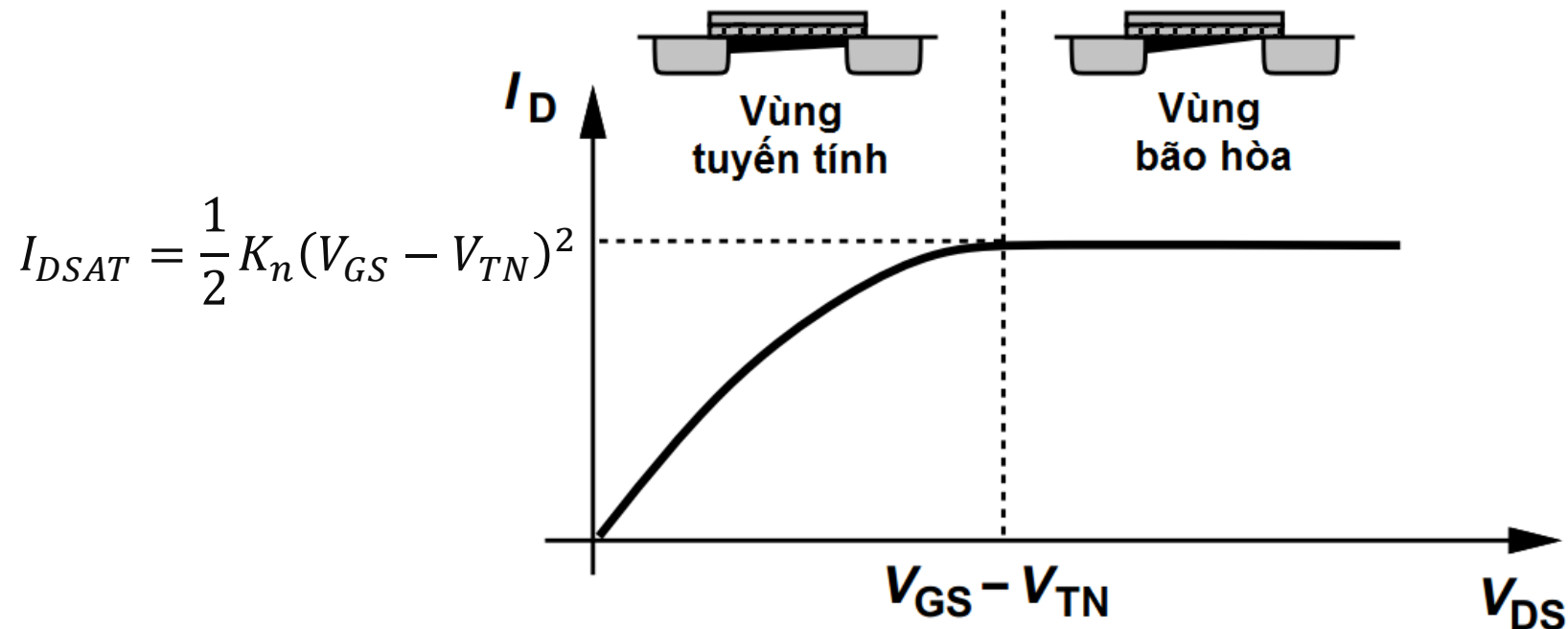


Đặc tuyến của MOSFET kênh n

- Đối với vùng bão hòa $v_{DS} \geq v_{GS} - V_{TN} \geq 0$:

$$i_D = \frac{1}{2} K_n (v_{GS} - V_{TN})^2$$

⇒ dòng máng không đổi đối với giá trị V_{GS} cố định.



4.6 CÁC HIỆU ỨNG TRONG MOSFET

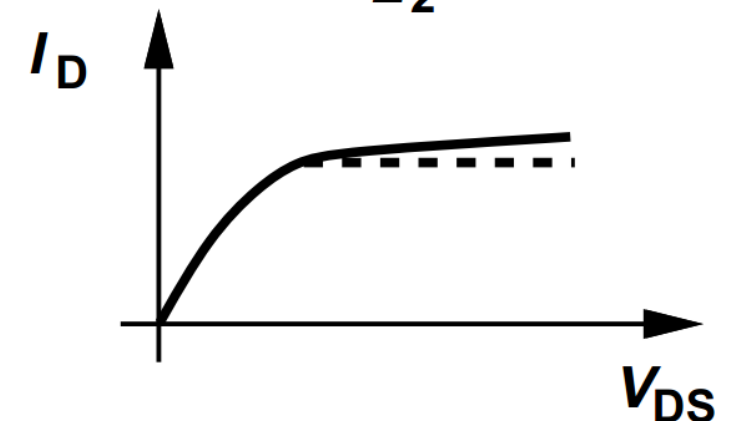
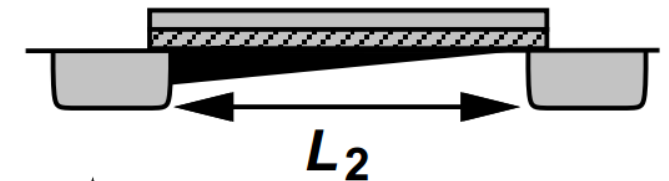
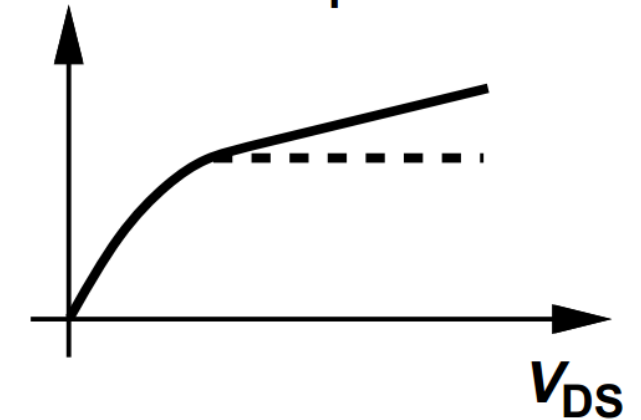
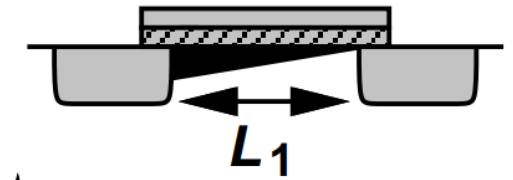
Điều chế độ dài kênh

- Trong vùng bão hòa, khi tăng v_{DS} lớn hơn $(v_{GS} - V_{TN})$, điểm thắt kênh dịch chuyển dần về phía cực nguồn S, khiến cho độ dài kênh giảm, dẫn đến dòng i_D tăng thay vì bão hòa. Hiệu ứng này được gọi là **điều chế kênh** (channel length modulation).

- Khi đó, dòng máng được xác định bởi:

$$i_D = \frac{1}{2} K_n (v_{GS} - V_{TN})^2 (1 + \lambda v_{DS}),$$

với λ – hệ số điều chế độ dài kênh ($0 \text{ V}^{-1} \leq \lambda \leq 0.2 \text{ V}^{-1}$), tỉ lệ nghịch với độ dài kênh L .



Hiệu ứng thân đế

- Khi $v_{SB} = 0$, MOSFET hoạt động như một linh kiện 3 cực.
- Khi $v_{SB} \neq 0$, điện áp ngưỡng V_{TN} bị ảnh hưởng, dẫn đến đặc tuyến thay đổi. Hiệu ứng này được gọi là **hiệu ứng thân đế** (body effect).
- Điện áp ngưỡng được xác định bởi:

$$V_{TN} = V_{TO} + \gamma \left(\sqrt{v_{SB} + 2\phi_F} - \sqrt{2\phi_F} \right),$$

với V_{TO} - giá trị V_{TN} khi $v_{SB} = 0$; γ - hệ số hiệu ứng thân đế; $2\phi_F$ - hệ số điện thế bề mặt.

