

ĐẠI HỌC QUỐC GIA THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH  
TRƯỜNG KHOA HỌC TỰ NHIÊN

## VẬT LÝ LINH KIỆN ĐIỆN TỬ

### Chap 4:

# FET – FIELD EFFECT TRANSISTOR

Trình bày: NGUYỄN THỊ THIÊN TRANG

# TỔNG QUAN & PHÂN LOẠI

FET chia thành các loại theo cấu trúc của cực G và của kênh dẫn như sau:

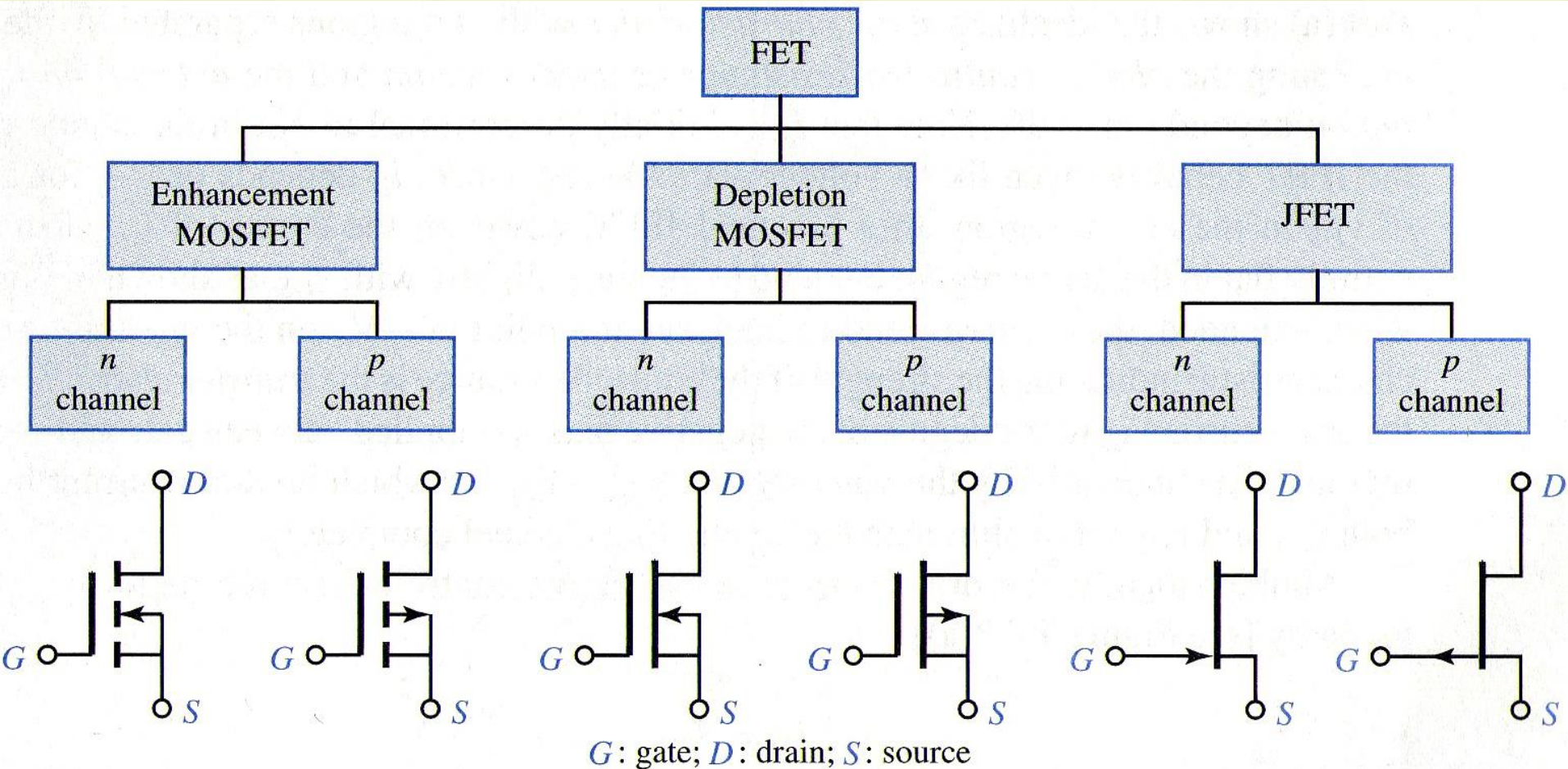
- JFET (Junction FET) : Transistor hiệu ứng trường điều khiển bằng chuyển tiếp PN, cực điều khiển G ngăn cách với kênh dẫn bằng vùng nghèo của chuyển tiếp PN phân cực ngược.
- IGFET (Isolated Gate FET) : Transistor hiệu ứng trường cực cửa cách ly với kênh dẫn, điển hình là linh kiện MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor FET) và MESFET (Metal-Semiconductor FET).

# TỔNG QUAN & PHÂN LOẠI

MESFET: cực điều khiển ngăn cách với kênh dẫn bằng vùng nghèo của chuyển tiếp kim loại-bán dẫn.

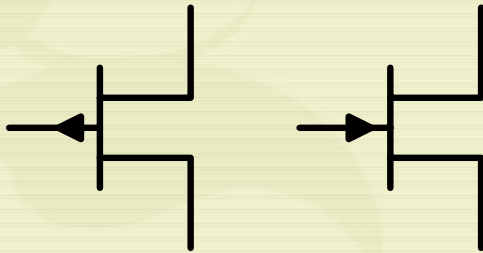
- MOSFET cực điều khiển cách ly hẳn với kênh dẫn thông qua một lớp điện môi ( $\text{SiO}_2$ ). Đây mới đúng là Transistor trường theo đúng nghĩa của thuật ngữ này, vì chỉ có loại này dòng chảy qua kênh dẫn mới được điều khiển hoàn toàn bằng điện trường, dòng điều khiển hầu như bằng không tuyệt đối, trong khi đó dòng rò của chuyển tiếp PN hoặc Schottky phân cực ngược, chưa hoàn toàn bằng không).
- Mỗi loại FET còn được chia thành loại kênh N và kênh P.

# TỔNG QUAN & PHÂN LOẠI



# PHÂN LOẠI

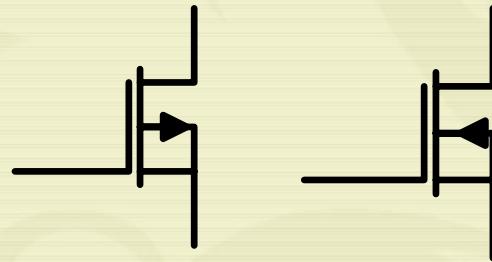
## Ký hiệu



P

N

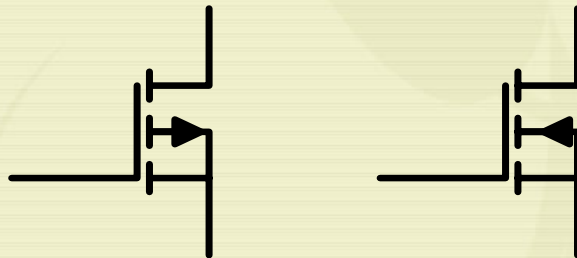
a). JFET



P

N

b). MOSFET kênh sẵn



P

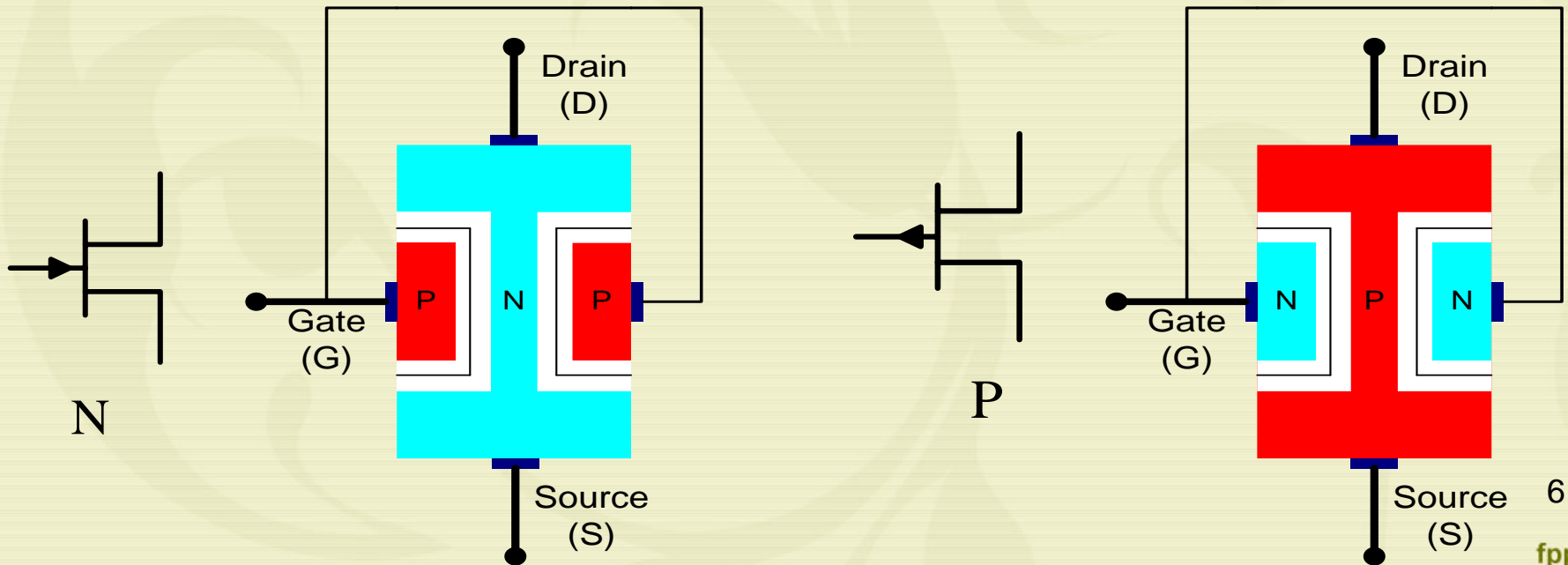
N

c). MOSFET kênh cảm ứng

# JFET – CẤU TẠO & HOẠT ĐỘNG

Có 2 loại JFET: kênh N và P. JFET kênh N thông dụng hơn.

JFET có 3 cực: cực Nguồn S (source); cực Cổng G (gate); cực Máng D (drain). Cực D và cực S được kết nối vào kênh N. Cực G được kết nối vào vật liệu bán dẫn P.

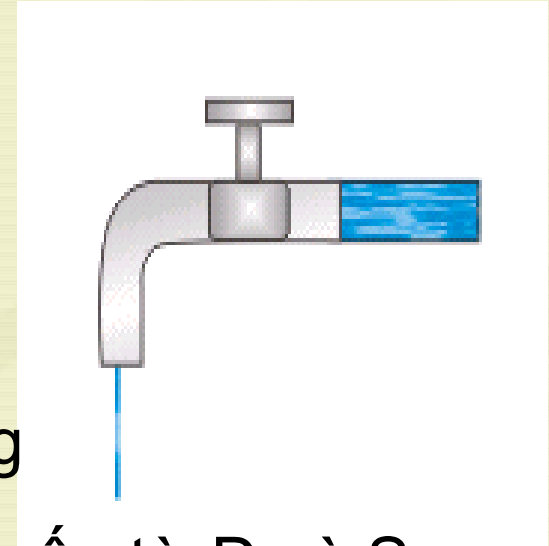




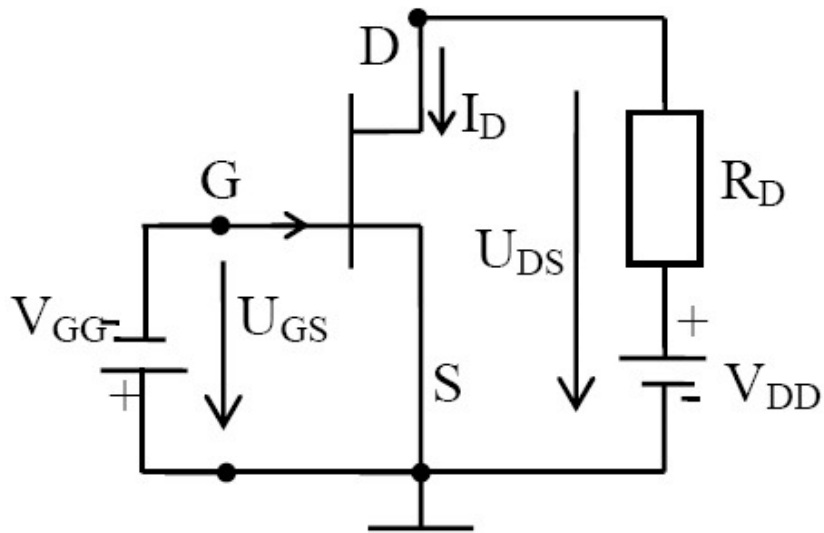
# HOẠT ĐỘNG CỦA JFET

JFET hoạt động giống như hoạt động của một khóa nước.

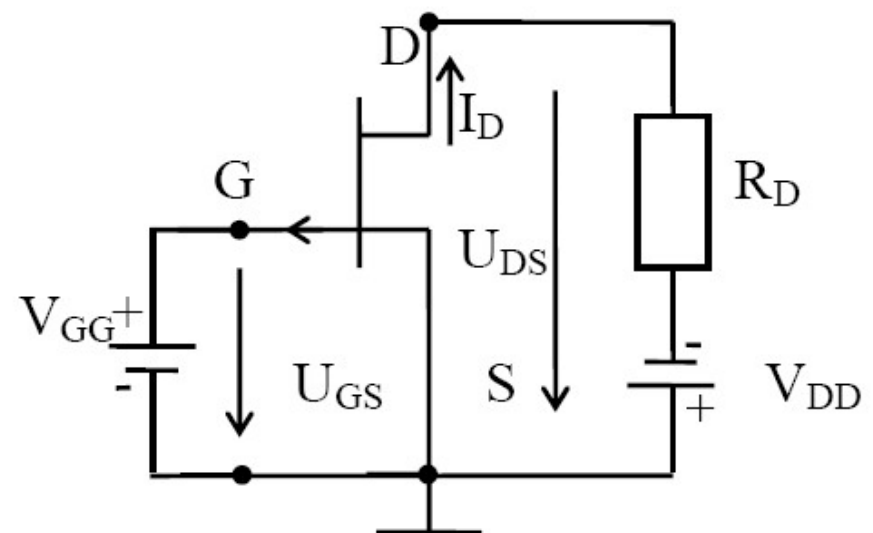
- Nguồn áp lực nước-tích lũy các hạt  $e^-$  ở điện cực âm của nguồn điện áp cung cấp từ D và S.
- Ống nước ra - thiếu các  $e^-$  hay lỗ trống tại cực dương của nguồn điện áp cung cấp từ D và S.
- Điều khiển lượng đóng mở nước-điện áp tại G điều khiển độ rộng của kênh n, kiểm soát dòng chảy  $e^-$  trong kênh n từ S tới D.



# SƠ ĐỒ MẠCH JFET



a/ JFET kênh N



b/ JFET kênh P



# ĐẶC ĐIỂM HOẠT ĐỘNG CỦA JFET

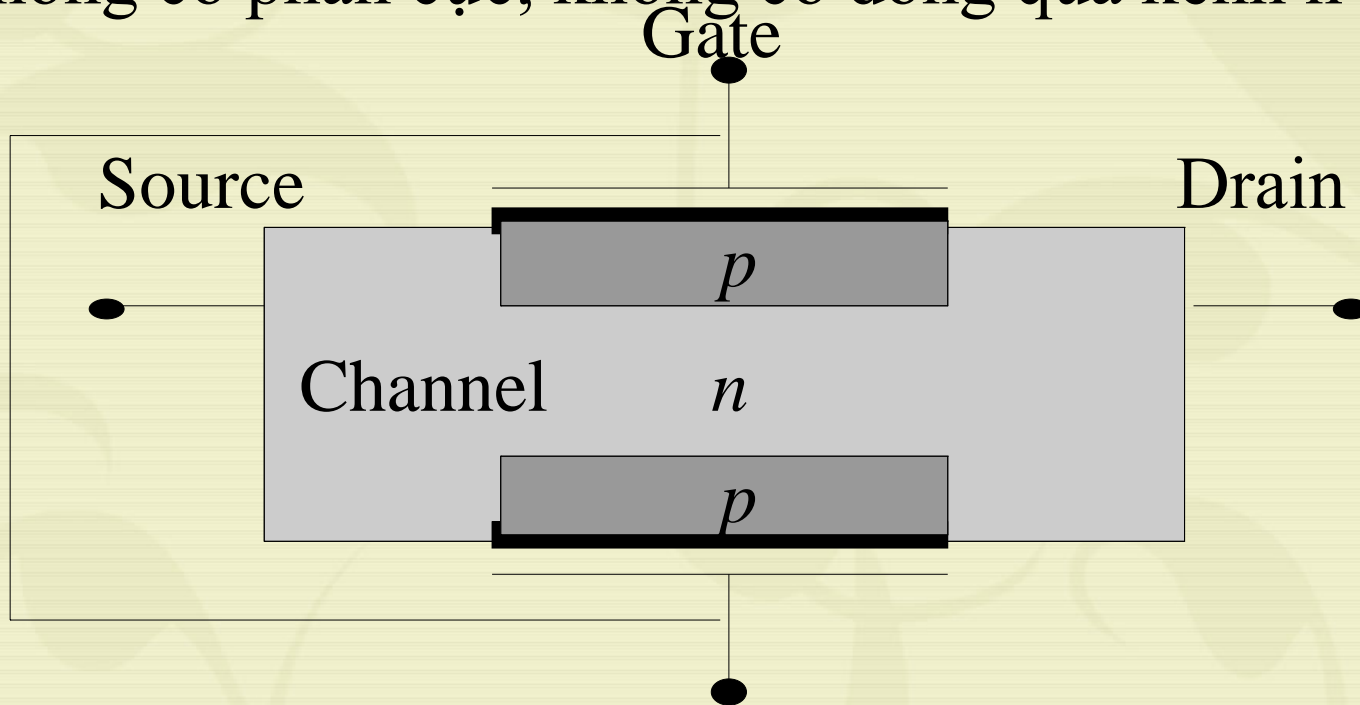
**JFET kênh N có 3 chế độ hoạt động cơ bản khi  $V_{DS} > 0$ :**

- A.  $V_{GS} = 0$ , JFET hoạt động bão hòa,  $I_D = I_{D_{max}}$**
- B.  $V_{GS} < 0$ , JFET hoạt động tuyến tính,  $I_D \downarrow$**
- C.  $V_{GS} = -V_{ngắt}$ , JFET ngưng hoạt động,  $I_D = 0$**

# ĐẶC ĐIỂM HOẠT ĐỘNG CỦA JFET

## Với JFET kênh n

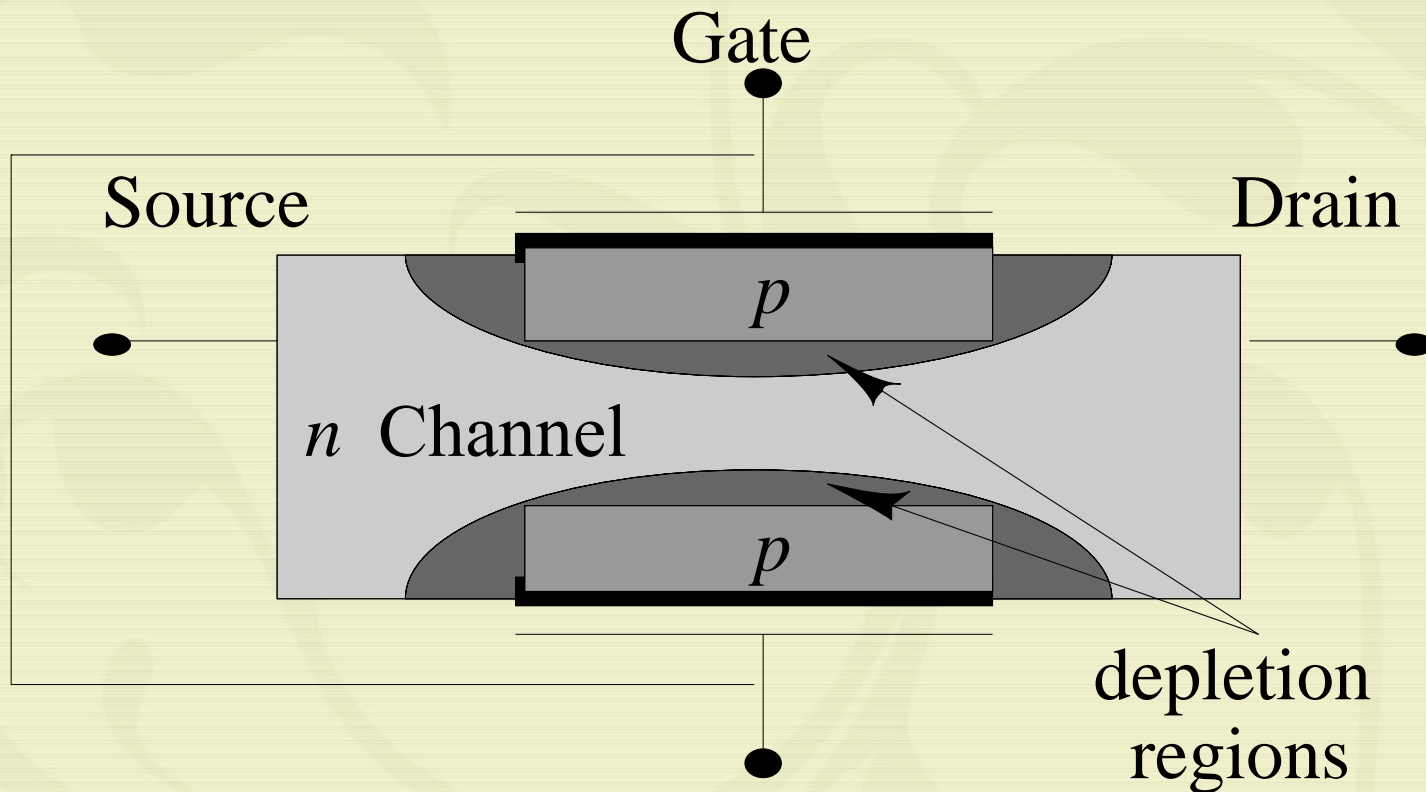
Khi không có phân cực, không có dòng qua kênh n



$V_{GS} > 0$  nối pn phân cực thuận và do đó sẽ có dòng điện từ cực nguồn S đến cực thoát D lớn nhưng không điều khiển được

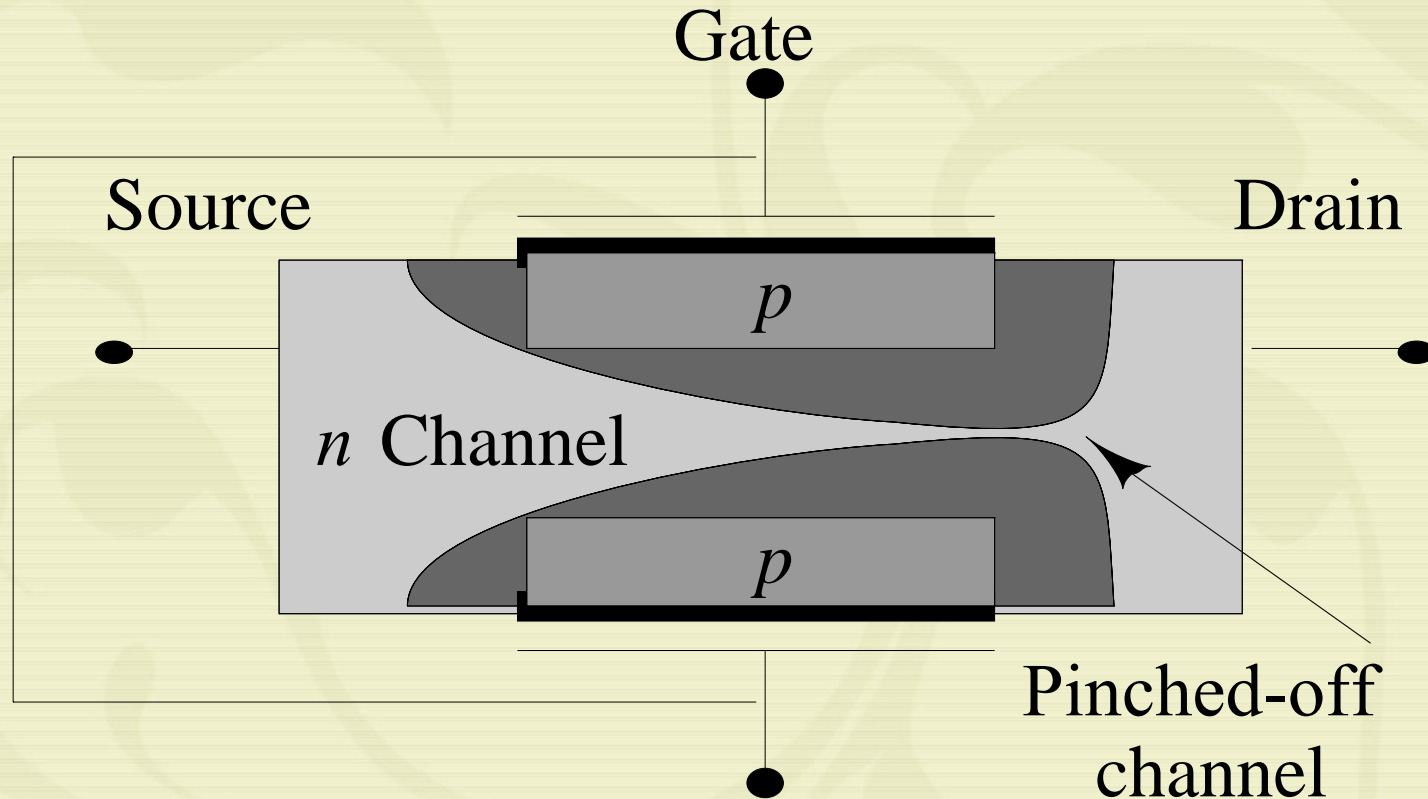
# ĐẶC ĐIỂM HOẠT ĐỘNG CỦA JFET

Khi  $V_{GS} = 0\text{ V}$  và  $V_{ds} > 0$  thấp, vùng hiếm nhỏ, kênh n còn rộng, dòng điện tăng nhanh



# ĐẶC ĐIỂM HOẠT ĐỘNG CỦA JFET

Khi  $V_{ds}$  tăng, vùng hiếm càng rộng gần như chạm vào nhau, kênh n bị nghẽn, Fet dẫn bão hòa



# ĐẶC TUYẾN VÀ CÔNG THỨC DÒNG THOÁT $I_D$

1. Đặc tuyến ngõ ra  $I_D = f(V_{DS})$  tại  $V_{GS} = h, s$ .

Có 3 vùng:

Vùng điện trở

Vùng bão hoà

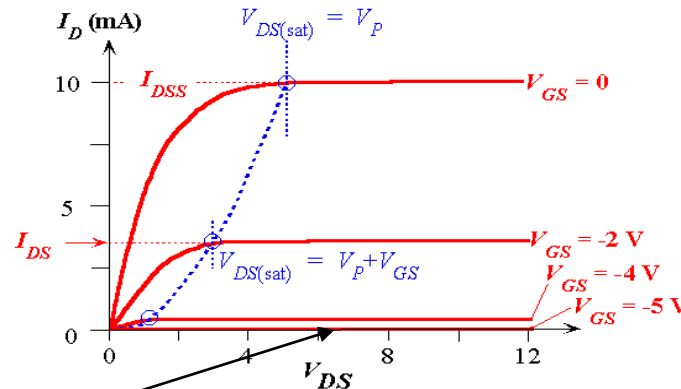
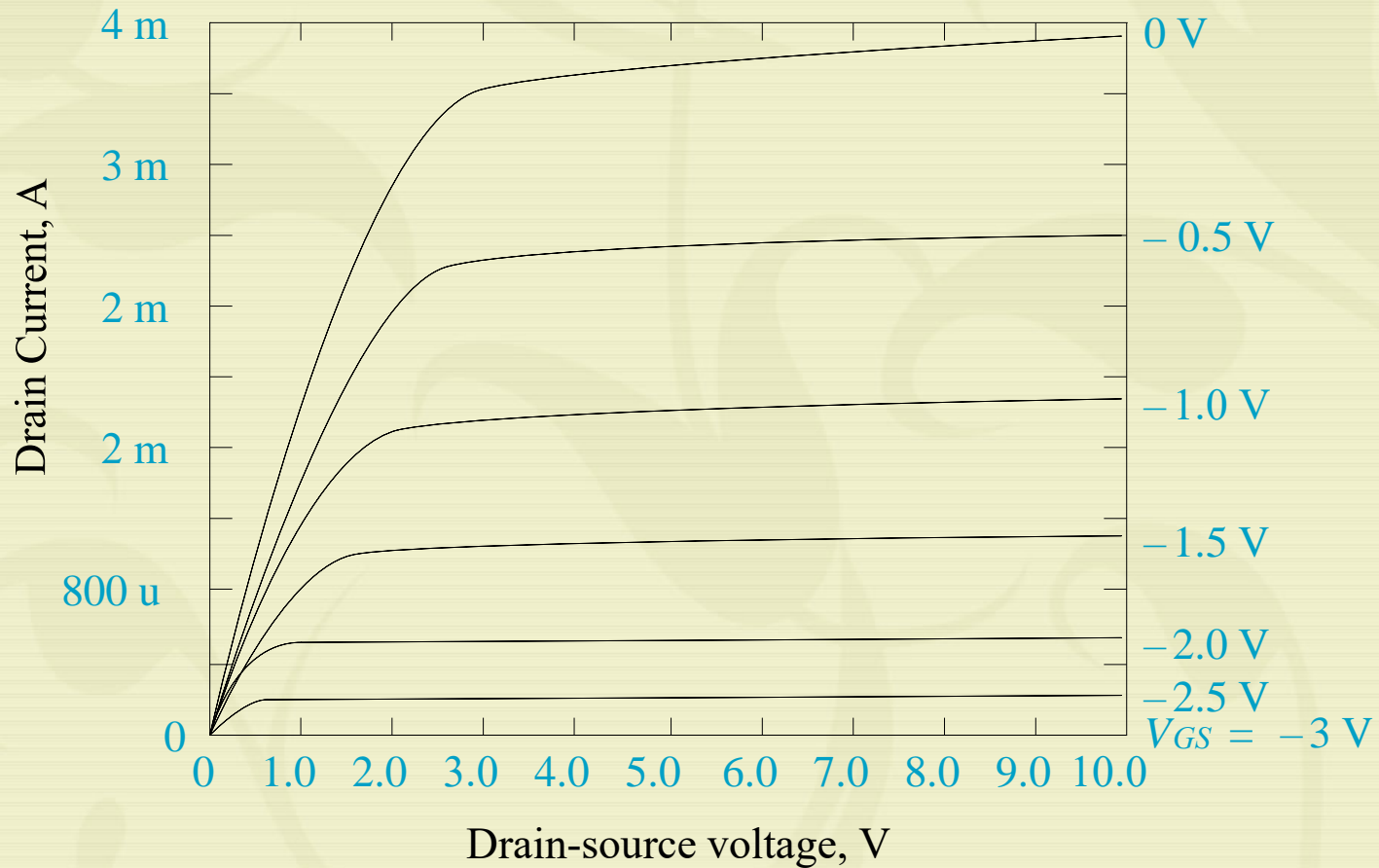


Fig. 6.29: Typical  $I_D$  vs  $V_{DS}$  characteristics of a JFET for various fixed gate voltages  $V_{GS}$ .

From *Principles of Electronic Materials and Devices, Second Edition*, S.O. Kasap (© McGraw-Hill, 2002)  
<http://Materials.USask.ca>

Vùng ngưng

# ĐẶC TUYẾN NGỒ RA JFET



# ĐẶC TUYẾN TRUYỀN $I_D = f(V_{GS})$

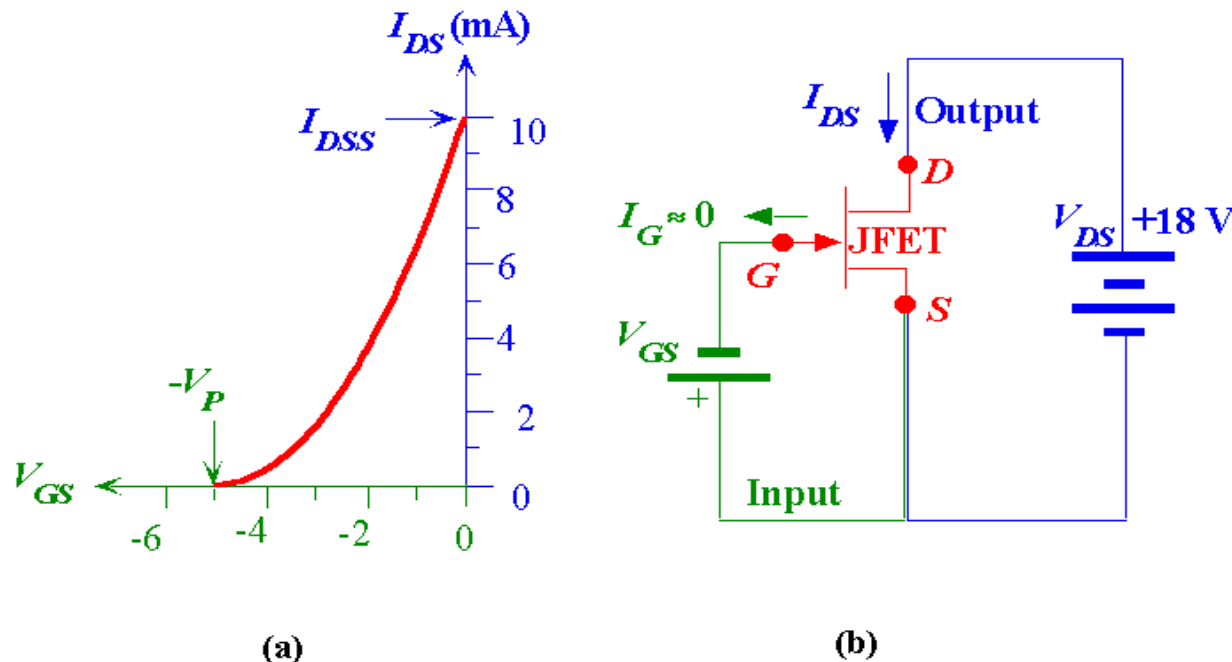


Fig. 6.33: (a) Typical  $I_{DS}$  vs  $V_{GS}$  characteristics of a JFET (b). The *DC* circuit in which  $V_{GS}$  in the gate-source circuit (input) controls the drain current  $I_{DS}$  in the drain-source (output) circuit in which  $V_{DS}$  is kept constant and large ( $V_{DS} > V_P$ ).

From *Principles of Electronic Materials and Devices*, Second Edition, S.O. Kasap (© McGraw-Hill, 2002)  
<http://Materials.Usask.ca>



Lưu ý rằng đặc tuyến truyền còn được suy ra từ đặc tuyến ra cho sẵn như sau:

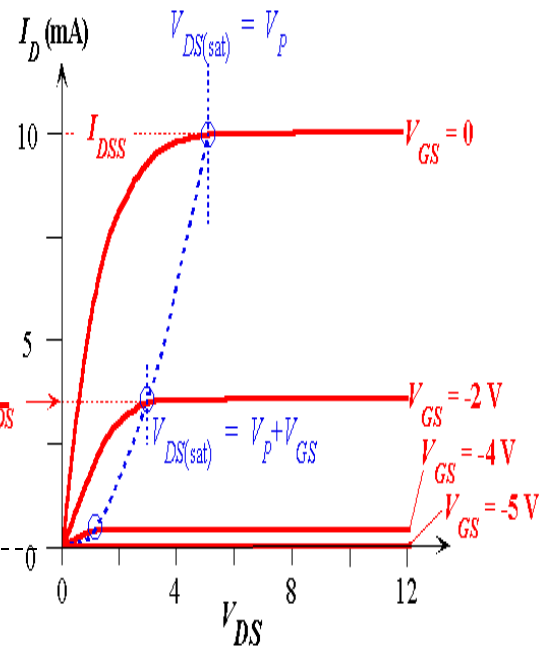
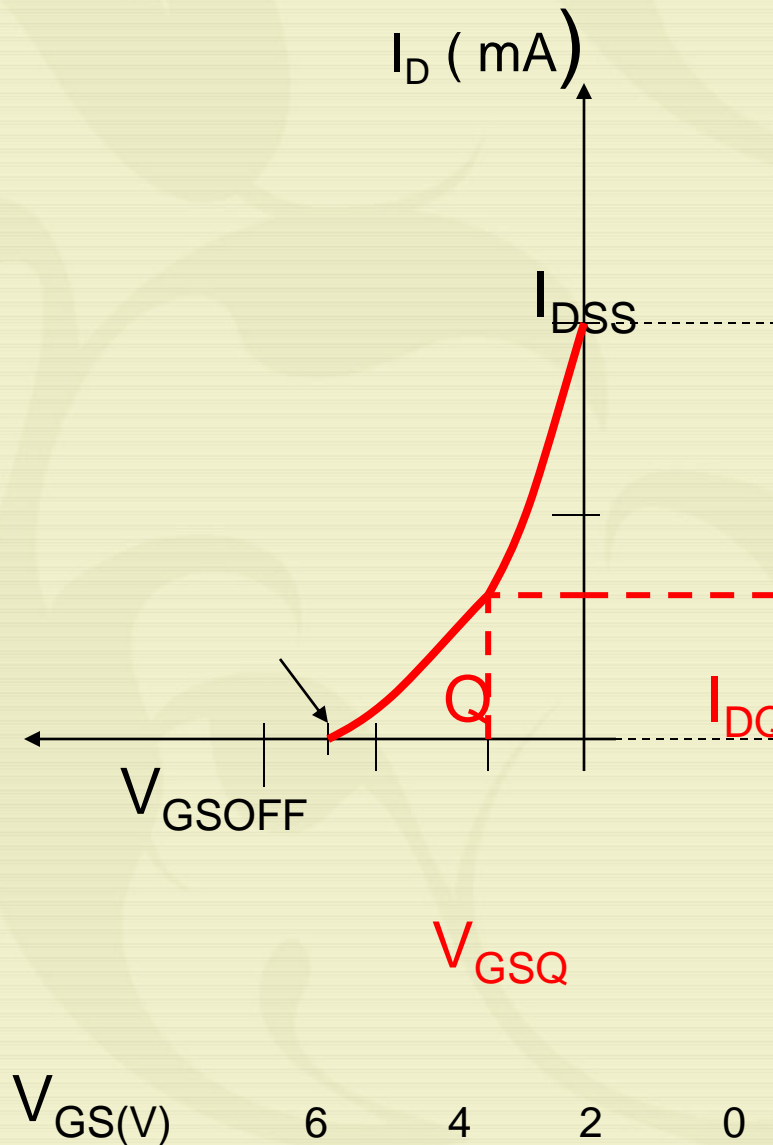
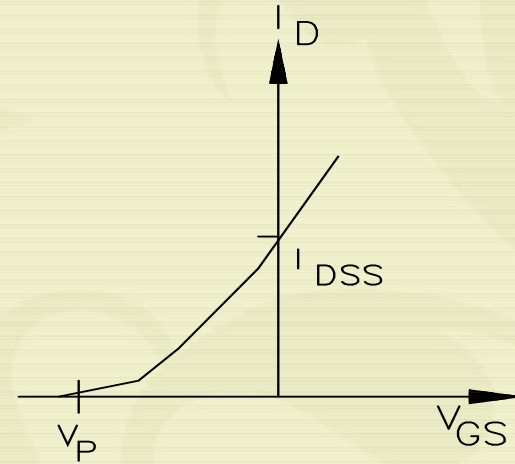
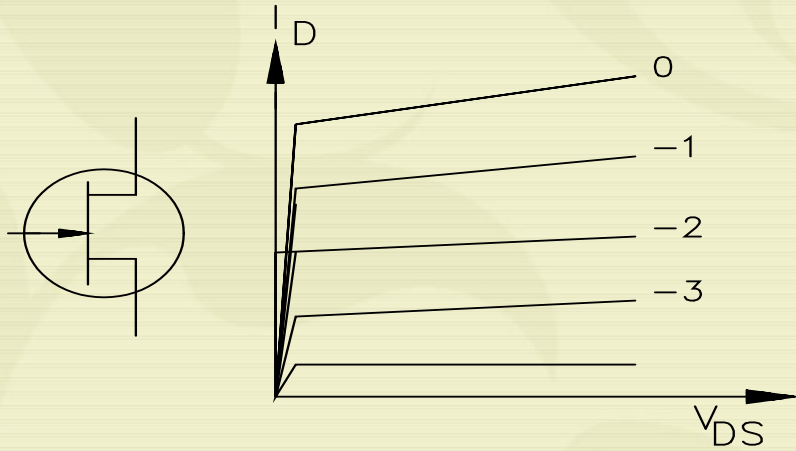


Fig. 6.29: Typical  $I_D$  vs  $V_{DS}$  characteristics of a JFET for various fixed gate voltages  $V_{GS}$ .

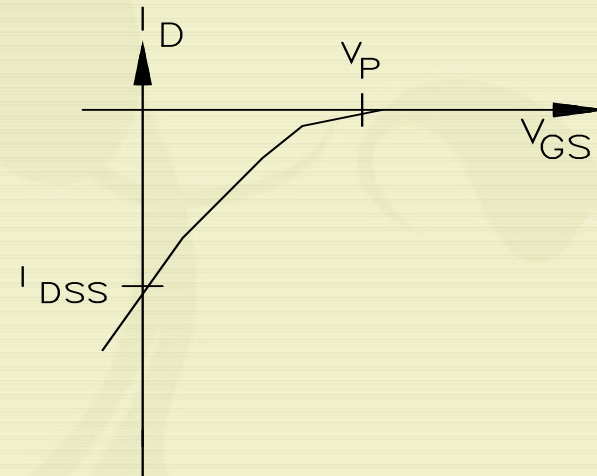
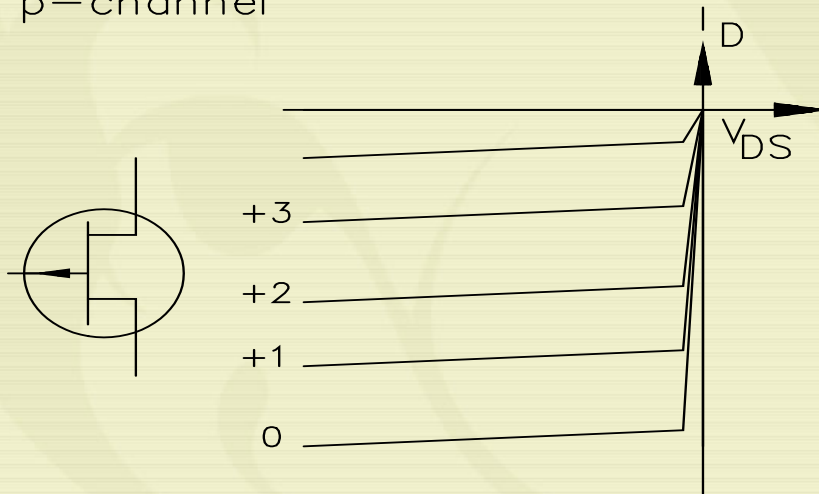
From Principles of Electronic Materials and Devices, Second Edition, S.O. Kasap (© McGraw-Hill, 2002)  
<http://Materials.Utsask.ca>

n-channel



$V_{DS}$	+
$V_{GS}$	-
$I_D$	+
$V_{po}$	-
$I_{DSS}$	+

p-channel



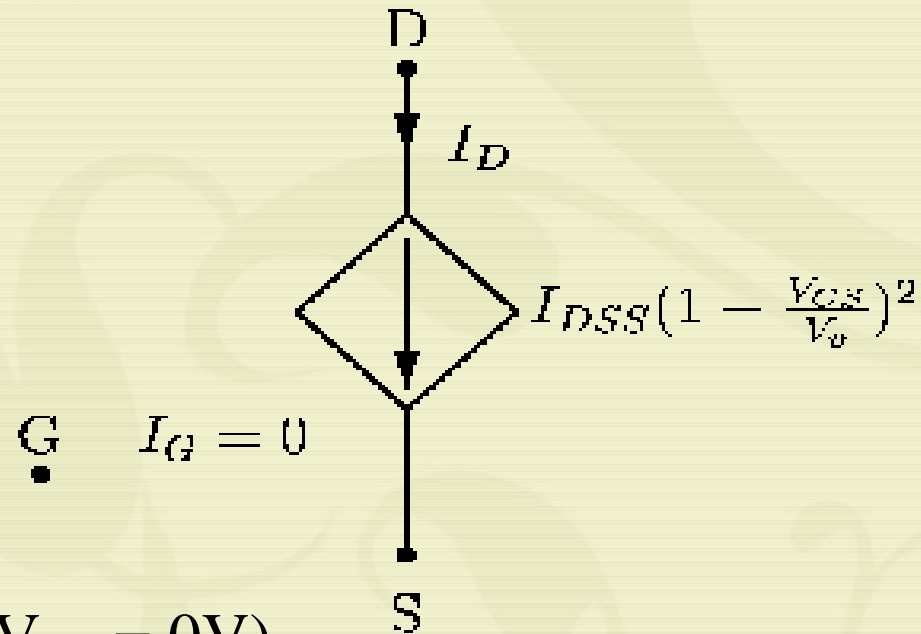
$V_{DS}$	-
$V_{GS}$	+
$I_D$	-
$V_{po}$	+
$I_{DSS}$	-

# CÔNG THỨC DÒNG THOÁT $I_D$

## Công thức dòng điện thoát $I_D$

Trong vùng bão hoà, dòng điện thoát cho bởi phương trình Shockley:

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GSOFF}} \right)^2 \quad (2)$$



$I_{DSS}$  dòng bão hoà cực đại ( khi  $V_{GS} = 0V$ ).

$V_{GS}$  điện thế phân cực cổng - nền.

$V_{GSOFF}$  (hoặc  $-V_{P0}$ ) điện thế ngưng tùy thuộc vào JFET được sử dụng.

# PHÂN CỰC JFET

- Khi hoạt động trong vùng tuyến tính, JFET là 1 điện trở có trị thay đổi theo điện thế phân cực, trong vùng này  $V_{DS}$  rất bé.
- Khi hoạt động trong vùng tuyến tính kết hợp với vùng ngưng JFET hoạt động kiểu giao hoán ( chuyển mạch).
- Khi hoạt động trong vùng bão hoà (hay vùng điện trở không đổi), JFET có tính khuếch đại.

Các cách hoạt động nói trên tùy thuộc vào điện thế phân cực  $V_{GS}$  và  $V_{DS}$ .

# PHÂN CỰC JFET

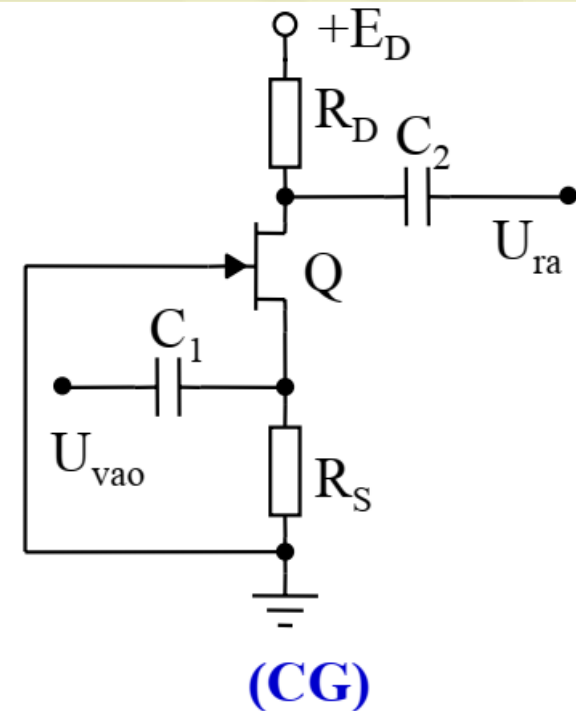
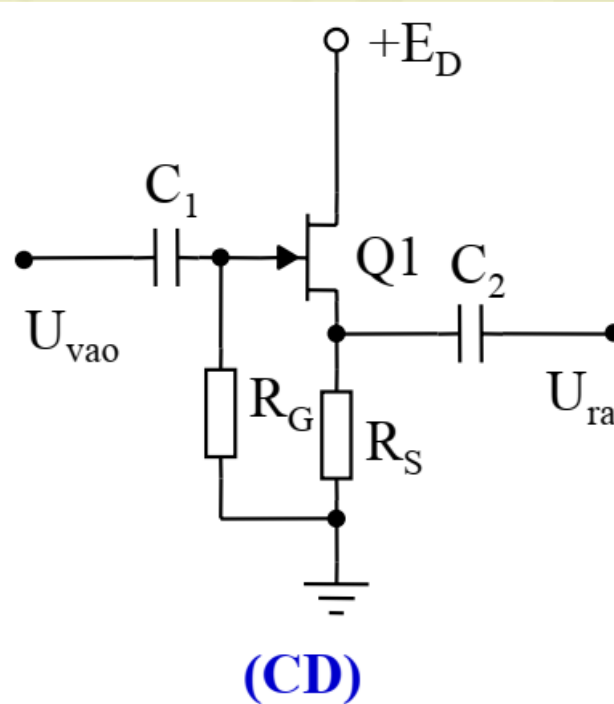
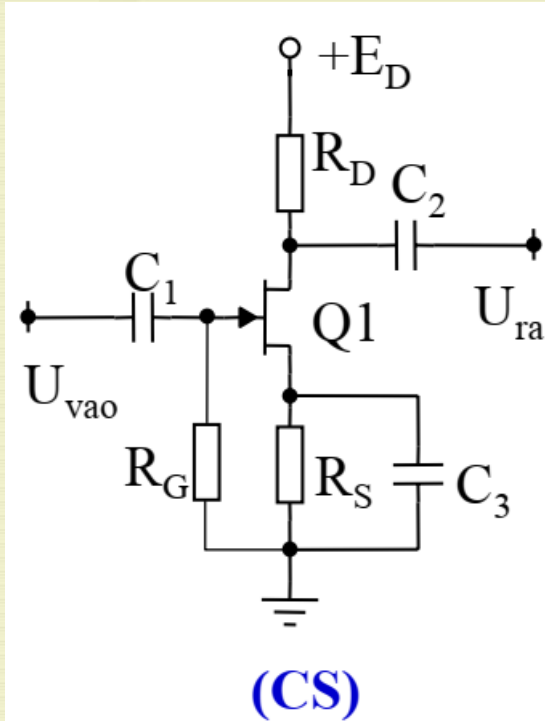
## Đặc tính kỹ thuật- Trị số giới hạn

JFET có các trị số giới hạn sau:

- Điện thế cực đại  $V_{DSmax}$ , nếu vượt quá sẽ xảy ra hiện tượng hủy thác làm hư FET.
- Dòng thoát  $I_D$  không được vượt quá  $I_{Dmax}$
- Công suất cực đại  $P_{DM}$  không được vượt quá
- Vùng điện tích an toàn (SOA) giới hạn bởi 3 vùng điện trở, vùng bão hoà, vùng ngưng, và 3 đường do 3 trị cực đại nêu trên. Muốn thiết kế mạch khuếch đại điểm tĩnh điều hành phải nằm trong vùng điện tích an toàn.

# CÁC CÁCH MẮC & HỌ ĐẶC TUYẾN

- ❖ Tương tự như BJT, JFET cũng có 3 cách mắc chủ yếu là: CS, CD và CG
- ❖ Trong đó, kiểu CS thường được dùng nhiều hơn cả vì kiểu mắc này cho hệ số khuếch đại điện áp cao, trở kháng vào cao. Còn các kiểu mắc CD, CG thường được dùng trong tầng khuếch đại đệm và khuếch đại tần số cao



# SO SÁNH CHẾ ĐỘ LÀM VIỆC GIỮA JFET & BJT

BJT	JFET
Vùng bão hòa	Vùng dẫn
Vùng dẫn	Vùng bão hòa
Vùng ngắt	Vùng ngắt

Sơ đồ	CS	CG	CD
Đầu vào/ Đầu ra	G / D	S / D	G / S
Khuếch đại dòng	có	không	có
Khuếch đại áp	Có (=1/10 BJT)	có	không
Pha tín hiệu	Đảo pha	Đồng pha	Đồng pha
Trở kháng đầu vào	Rất lớn ( $R_{GS}$ )	nhỏ	Rất lớn ( $R_{GD}$ )
Trở kháng đầu ra	Nhỏ ( $R_D // r_i$ )	Lớn	Nhỏ ( $R_S // 1/g_m$ )
Ứng dụng		Hầu như không sử dụng	



# BJT vs JFET

## 1. Về cấu tạo:

### FET

Có hai loại:

- ❖ JFET: Kênh N và Kênh P. JFET kênh N thông dụng hơn. JFET có 3 cực:

- ❖ MOSFET: có 2 loại:
  - MOSFET loại tăng cường (EMOSFET)
  - MOSFET loại hiếm (DMOSFET)

→ MOSFET có cấu trúc bán dẫn cho phép điều khiển bằng điện áp với dòng điện điều khiển cực nhỏ.

### BJT

- ❖ Gồm 2 nối tiếp xúc xen kẽ nhau.
- ❖ Có 2 loại Transistor nối: npn và pnp .

# PHÂN BIỆT BJT & FET

## 2. Về chức năng:

Giống nhau:

- Sử dụng làm bộ khuếch đại.
- Làm thiết bị đóng ngắt bán dẫn.
- Thích ứng với những mạch trở kháng.

Tuy nhiên MOSFET thường có **công suất** lớn hơn rất nhiều so với BJT.

# PHÂN BIỆT BJT & FET

## 3. Về hoạt động:

### FET

- ❖ JFET hoạt động giống như hoạt động của một khóa nước.
- ❖ Mosfet hoạt động ở 2 chế độ đóng và mở. Do là một phần tử với các hạt mang điện cơ bản nên Mosfet có thể đóng cắt với tần số rất cao. Nhưng mà để đảm bảo thời gian đóng cắt ngắn thì vấn đề điều khiển lại là vấn đề quan trọng.

### BJT

Có 4 kiểu phân cực tùy theo cách cấp điện:

- Ngưng.
- Bảo hòa.
- Tác động thuận.
- Tác động nghịch.

# PHÂN BIỆT BJT & FET

Khác nhau:

BJT	FET
Phân cực bằng dòng.	Phân cực bằng điện áp.
Có hệ số khếch đại cao.	Có trở kháng lớn.
Nhạy cảm với nhiệt độ.	Ít nhạy cảm với nhiệt độ nên thường sử dụng trong các IC tích hợp.
Trạng thái ngắt không tốt .	Trạng thái ngắt tốt hơn.

# PHÂN BIỆT BJT & FET

## Ưu điểm của FET so với BJT:

- Dòng điện qua transistor chỉ do một loại hạt dẫn đa số tạo nên. Do vậy FET là loại cấu kiện đơn cực.
- FET có trở kháng vào rất cao.
- Tiếng ồn trong FET ít hơn nhiều so với transistor lưỡng cực.
- FET không bù điện áp tại dòng  $I_D = 0$  và do đó có tác dụng ngắt điện tốt.
- Có độ ổn định nhiệt cao.
- Tần số làm việc cao.

# PHÂN BIỆT BJT & FET

## Nhược điểm của FET so với BJT:

- Nhược điểm chính của FET là hệ số khếch đại thấp hơn nhiều so với transistor lưỡng cực.

# TÓM TẮT

- ❖ BJT phân cực bằng dòng, còn FET phân cực bằng điện áp.
- ❖ BJT có hệ số khuếch đại cao, FET có trở kháng vào lớn.
- ❖ FET ít nhạy cảm với nhiệt độ, nên thường được sử dụng trong các IC tích hợp.
- ❖ Trạng thái ngắt của FET tốt hơn so với BJT

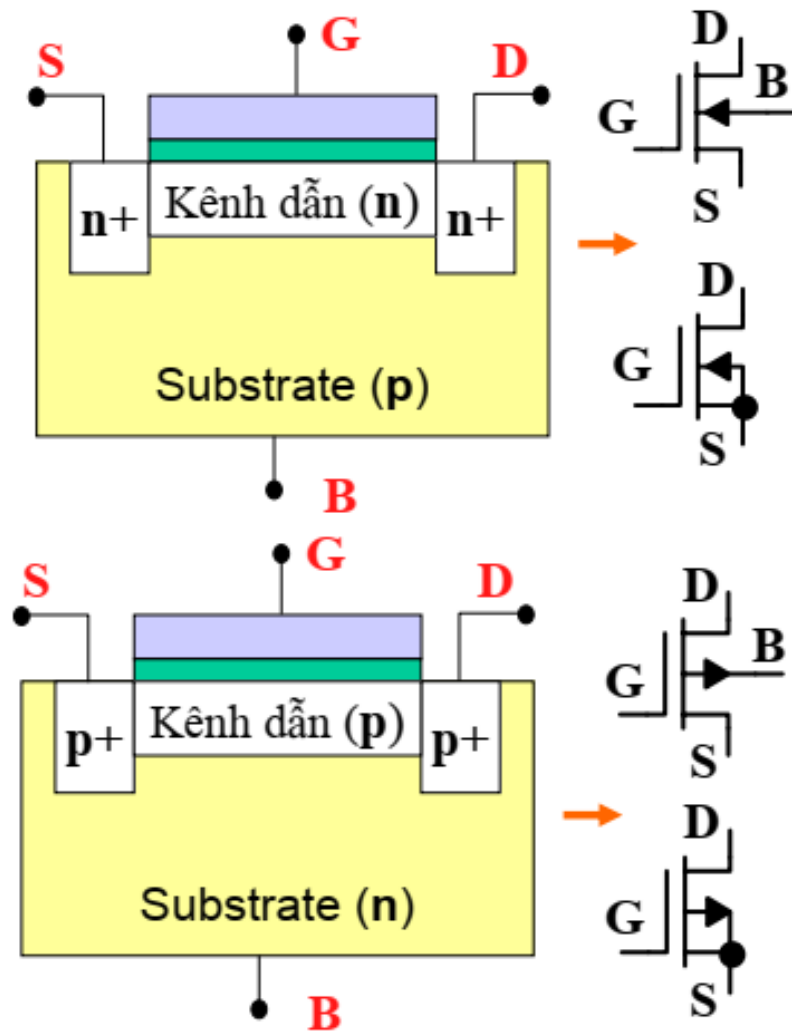


# MOSFET

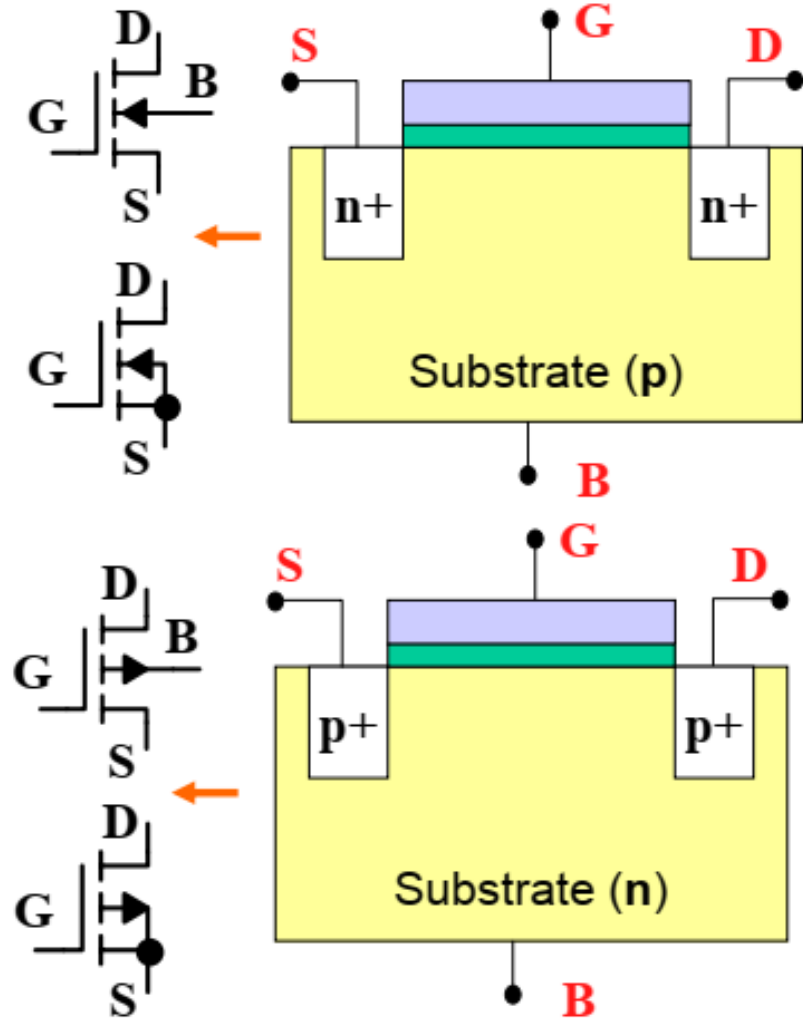
- ❖ **Cấu tạo**
- ❖ **Nguyên lý hoạt động**
- ❖ **Các cách mắc & họ đặc tuyến**
- ❖ **Phân cực cho JFET**
- ❖ **Các mô hình tương đương**
- ❖ **Một số ứng dụng của JFET**

# CẤU TẠO

## D-MOSFET



## E-MOSFET

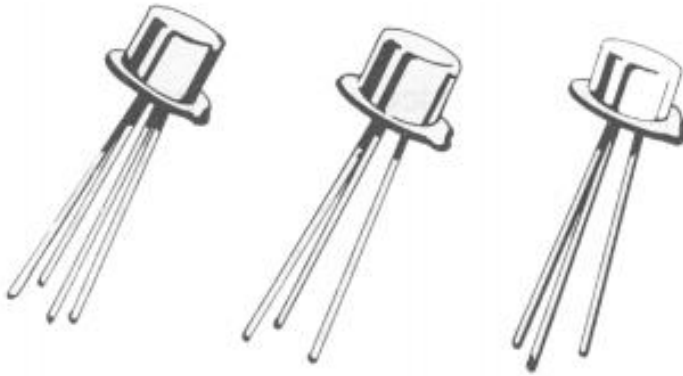


# ỨNG DỤNG

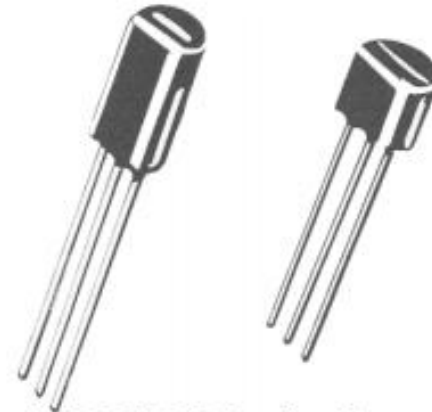
Cấu trúc MOS đã và đang là công nghệ chủ đạo tạo ra cuộc cách mạng về lĩnh vực điện tử. Ứng dụng của cấu trúc MOS:

- ❖ Dùng trong nhiều vi mạch tương tự và số: MOSFET là phần tử cơ bản trong họ vi mạch CMOS
- ❖ Dùng nhiều trong các vi mạch nhớ: DRAM, EPROM...
- ❖ Dùng có các thiết bị ảnh như camera CCD (Charge-Couple Device)
- ❖ Dùng trong các loại màn hình chỉ thị như LCD, ...

# HÌNH ẢNH CỦA MOSFET

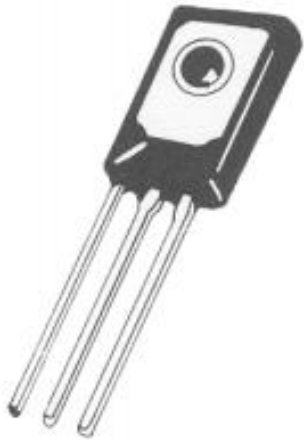


MOSFET vỏ kim loại

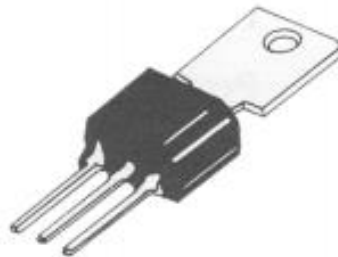


MOSFET vỏ nhựa

## MOSFET công suất cao



MOSFET vỏ nhựa tổng hợp với đầu  
nhiệt kim loại



MOSFET vỏ hoàn toàn bằng kim  
loại

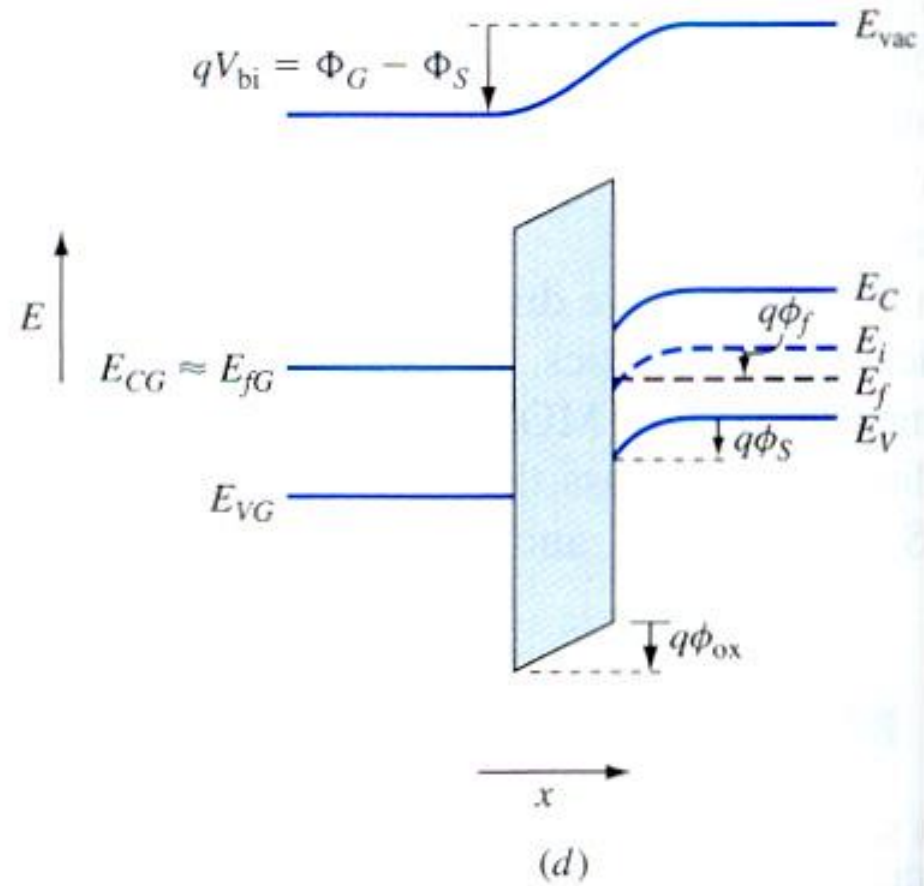
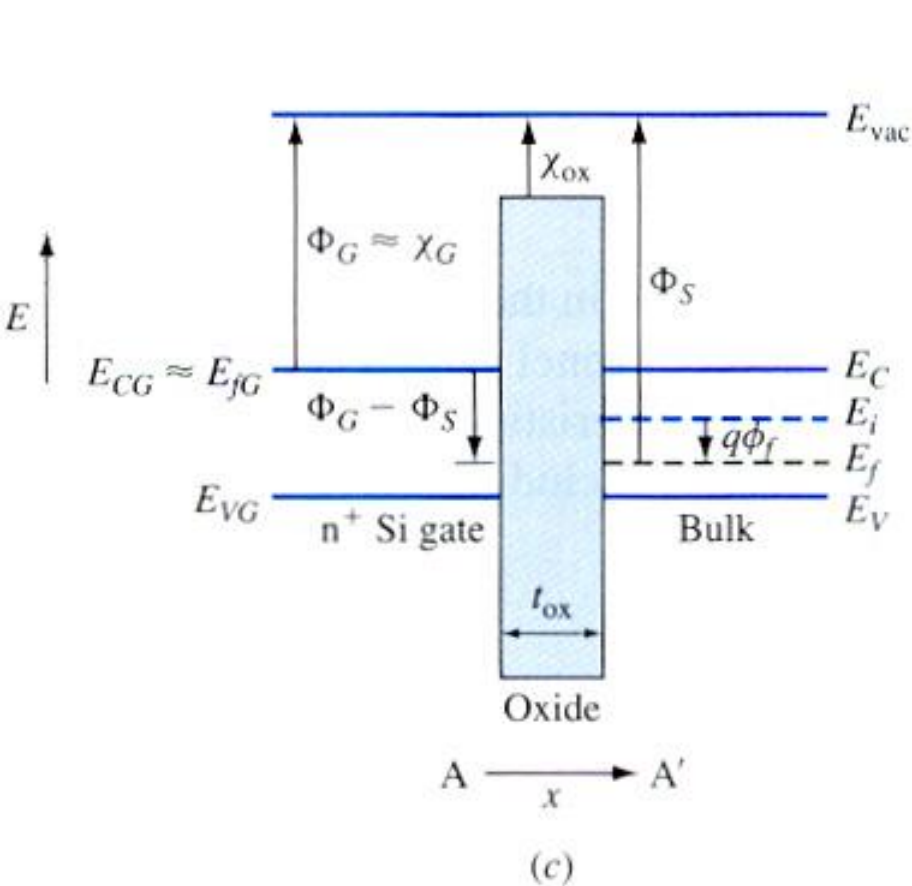
# NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG

- ❖ Nguyên lý hoạt động của MOSFET loại N và loại P giống nhau. Chúng chỉ khác nhau về chiều của nguồn điện cung cấp là ngược dấu nhau.
- ❖ MOSFET được phân cực sao giữa vùng BULK và kênh tạo ra vùng chuyển tiếp nghèo bao quanh kênh dẫn, và dòng các hạt dẫn đa số đi vào kênh từ cực S và ra khỏi kênh từ cực D tạo ra dòng  $I_D$ .
- ❖ Nguyên lý hoạt động cơ bản của MOSFET là cực cổng G kết hợp với lớp điện môi nằm dưới nó và kênh dẫn bán dẫn nằm dưới lớp điện môi chính là cấu trúc tụ điện MOS. Điện áp điều khiển tác dụng lên cực G sẽ tạo ra một điện trường làm biến thiên nồng độ hạt tải tự do trong kênh dẫn, hoặc thiết diện của kênh dẫn, độ dẫn của kênh sẽ thay đổi. Dòng điện  $I_D$  phụ thuộc vào điện áp  $V_{GS}$  và  $V_{DS}$ . Đặc tuyến quan trọng của MOSFET cũng là đặc tuyến ra và đặc tuyến truyền đạt tương tự như JFET.
- ❖ Đặc tính của MOSFET về cơ bản tương tự đặc tính của JFET nhưng có nhiều điểm ưu việt hơn.

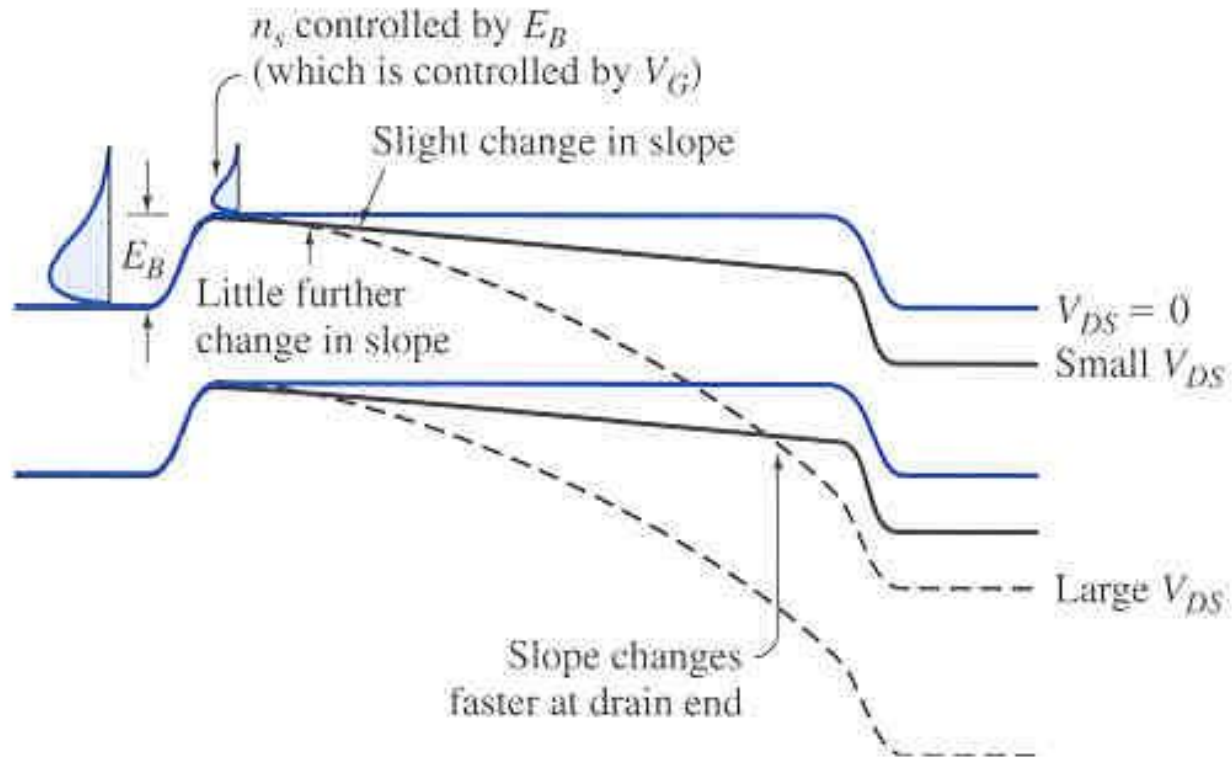
# DẢI NĂNG LƯỢNG

FLAT BAND

Trạng thái cân bằng nhiệt



# Giải đồ năng lượng của vùng tuyến tính & vùng bão hòa





# Công thức MOSFET

- *Vùng ngưng dẫn:*  $V_{GS} < V_T$   
 $I_D = I_S = 0$
- *Vùng tuyến tính:*  $V_{GS} > V_T$  and  $V_{DS} < V_{GS} - V_T$   
 $I_D = k_n'(W/L)[(V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{1}{2}V_{DS}^2]$
- *Vùng bão hòa:*  $V_{GS} > V_T$  and  $V_{DS} > V_{GS} - V_T$   
 $I_D = \frac{1}{2}k_n'(W/L)(V_{GS} - V_T)^2$

Trong đó  $k_n' = (\text{electron mobility}) \times (\text{gate capacitance})$

$$= \mu_n(\epsilon_{ox}/t_{ox}) \quad \dots \text{electron velocity} = \mu_n E$$

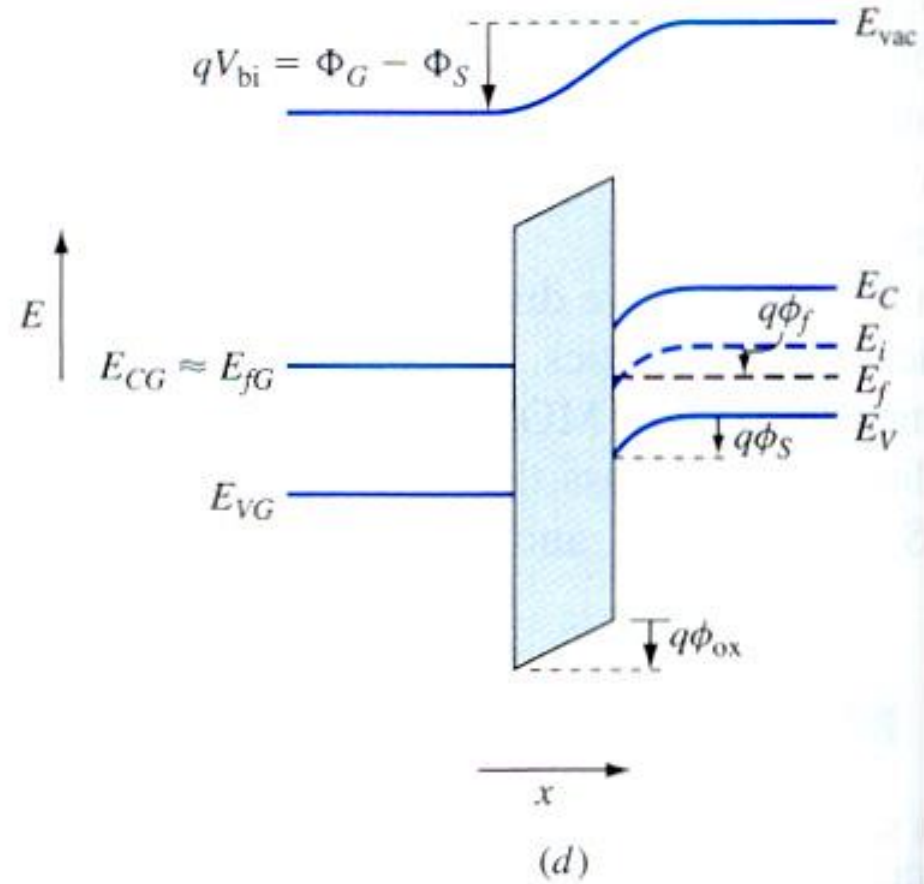
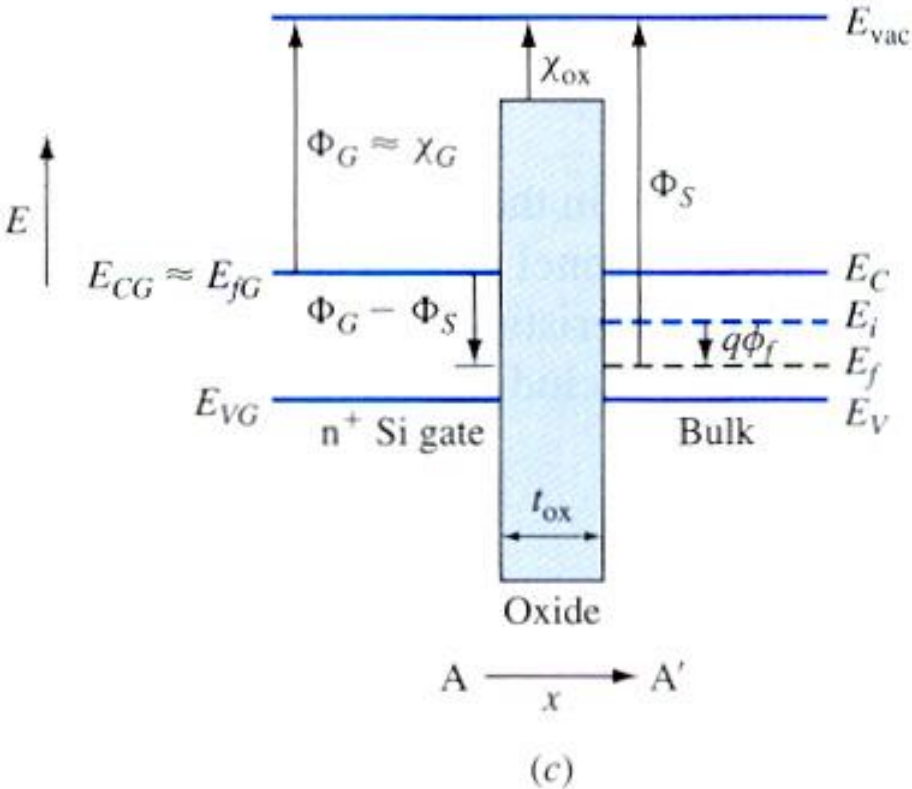
Và  $V_T$  phụ thuộc vào nồng độ pha tạp và vật liệu sử dụng để chế tạo cực G

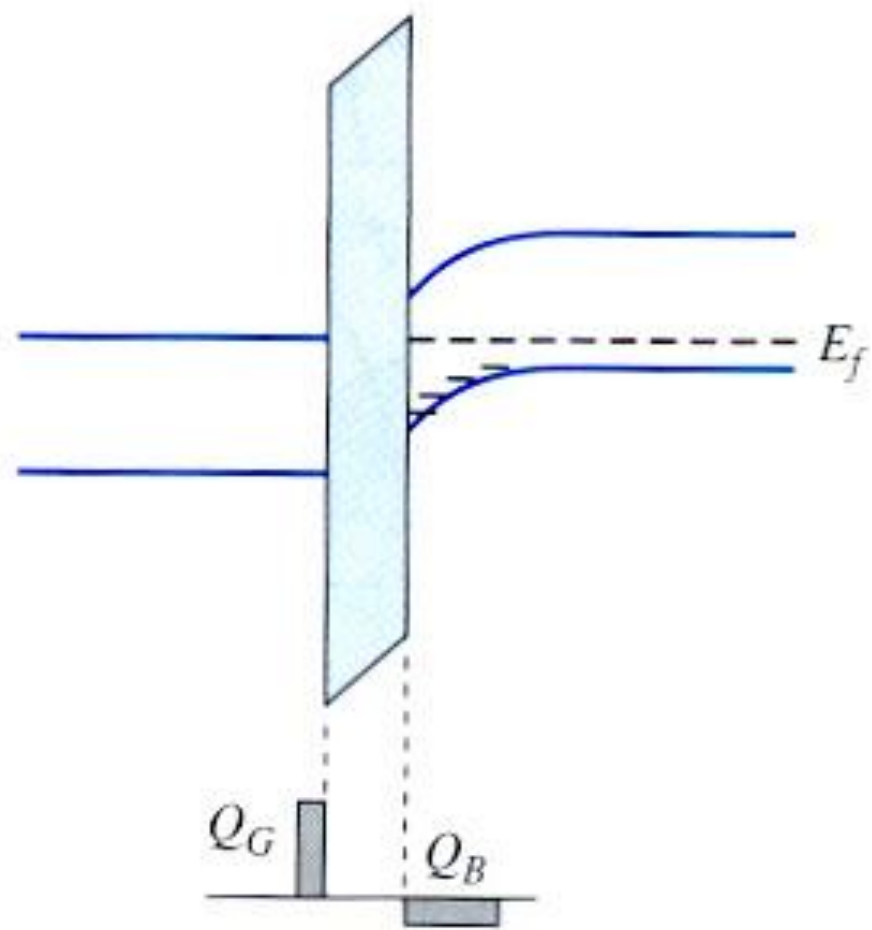


# DẢI NĂNG LƯỢNG

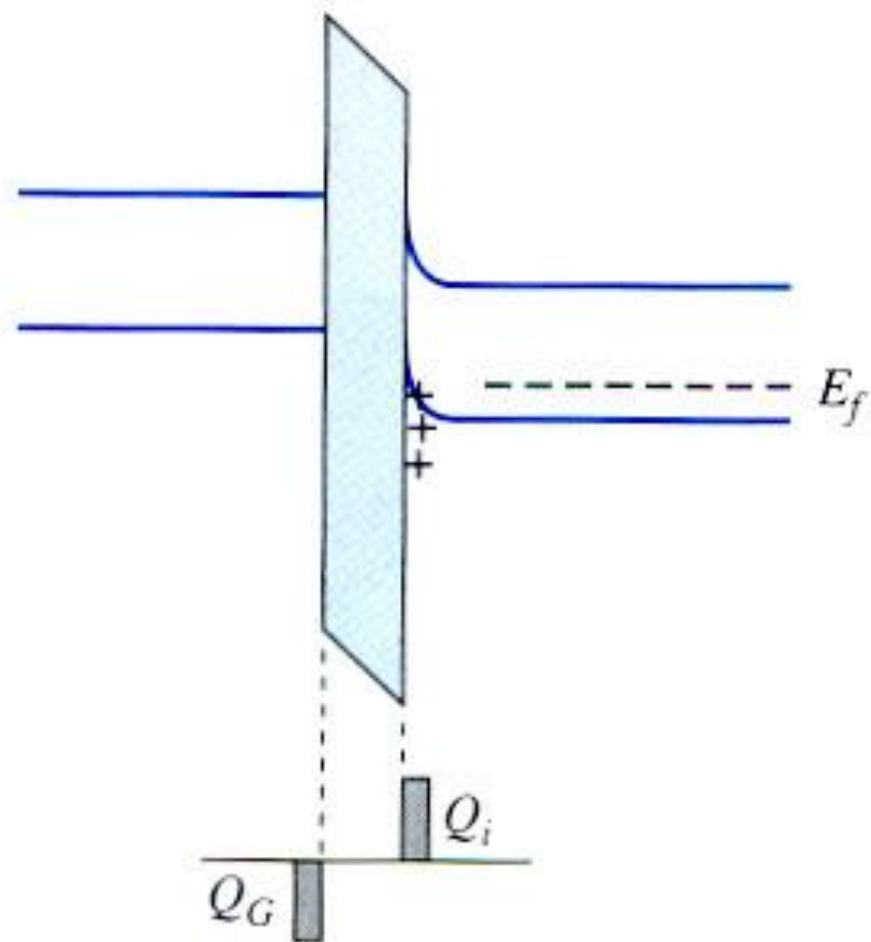
(“flat band” condition; *not* equilibrium)

(equilibrium)





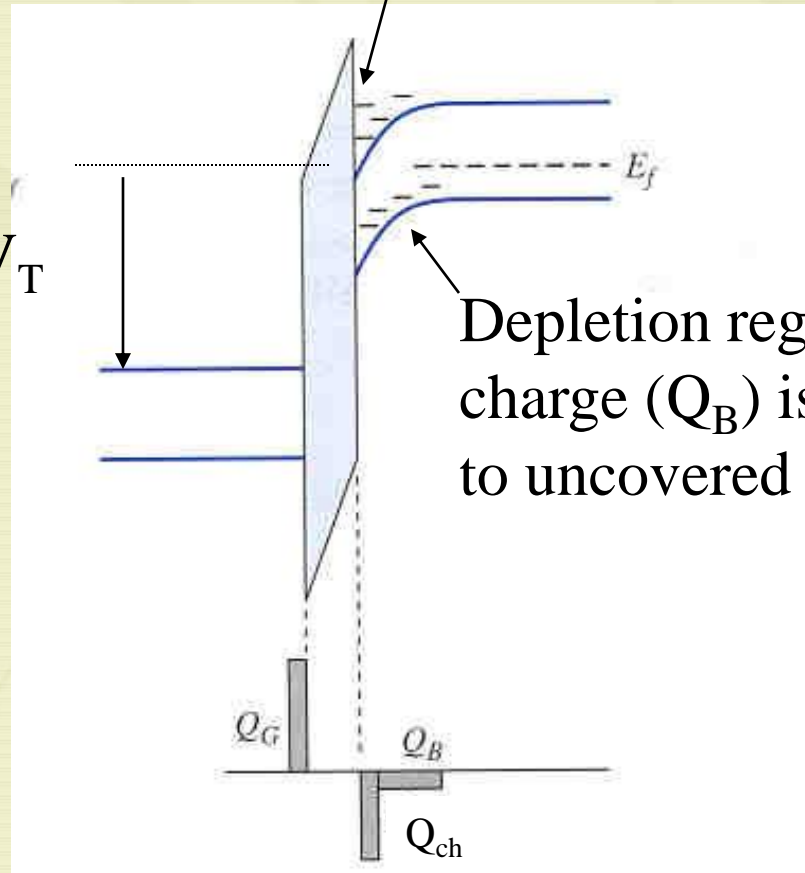
(a) Equilibrium



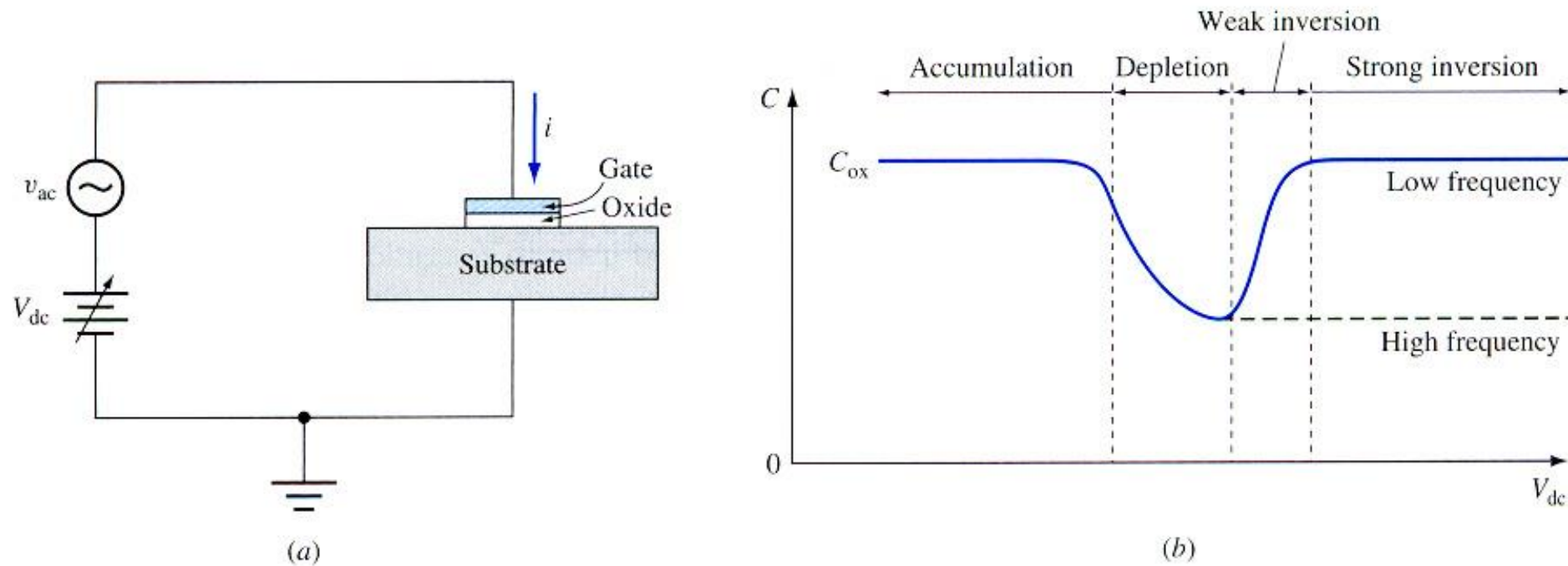
(b) Accumulation

Channel Charge ( $Q_{ch}$ )

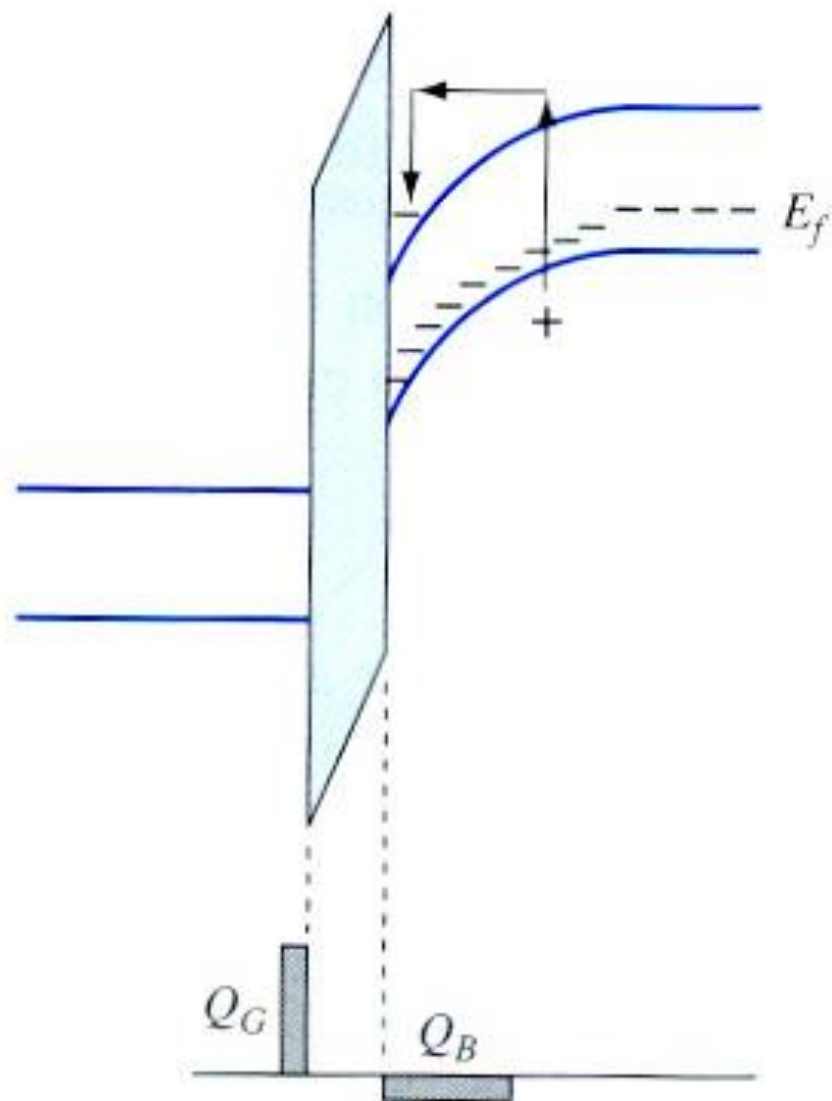
$$V_{GS} > V_T$$



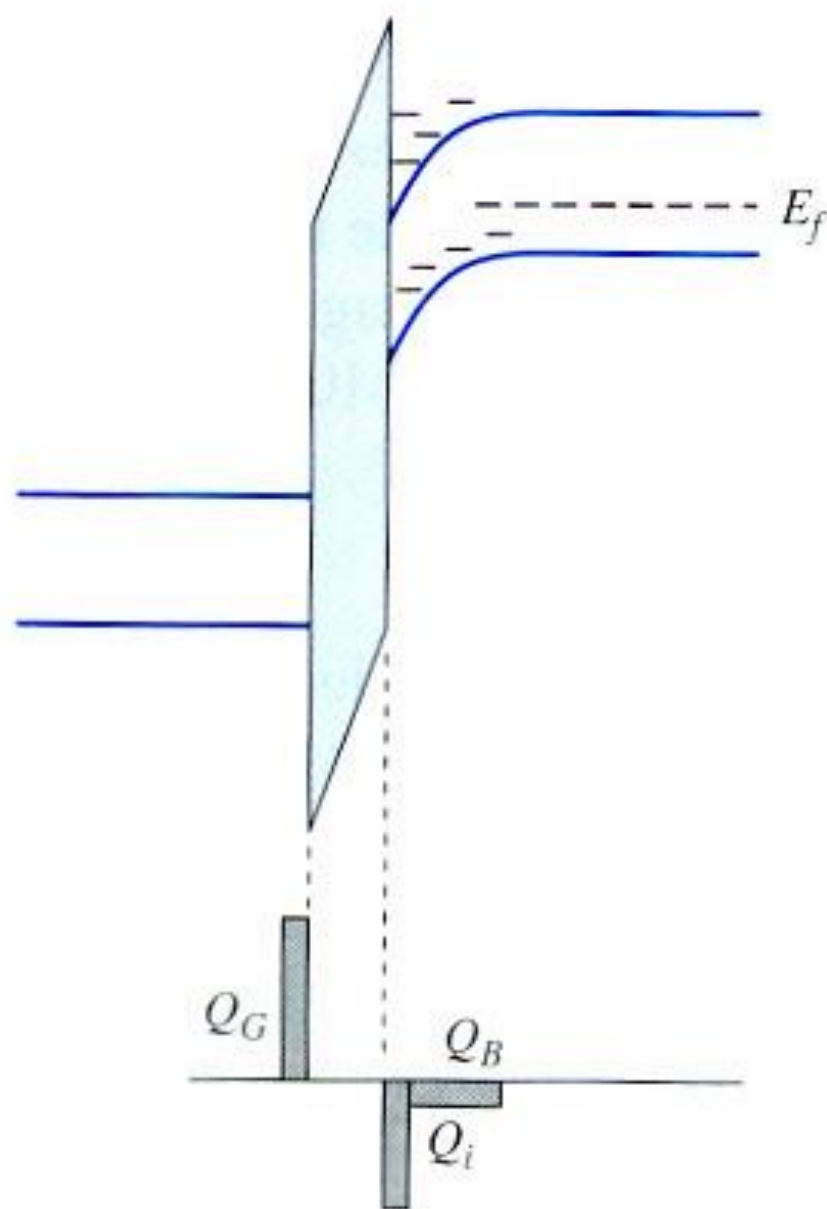
Depletion region charge ( $Q_B$ ) is due to uncovered acceptor ions



**Figure 7.3** (a) Circuit for measuring the capacitance of a MOS capacitor. (b) Capacitance-voltage characteristic for a MOS capacitor at low and high frequencies.

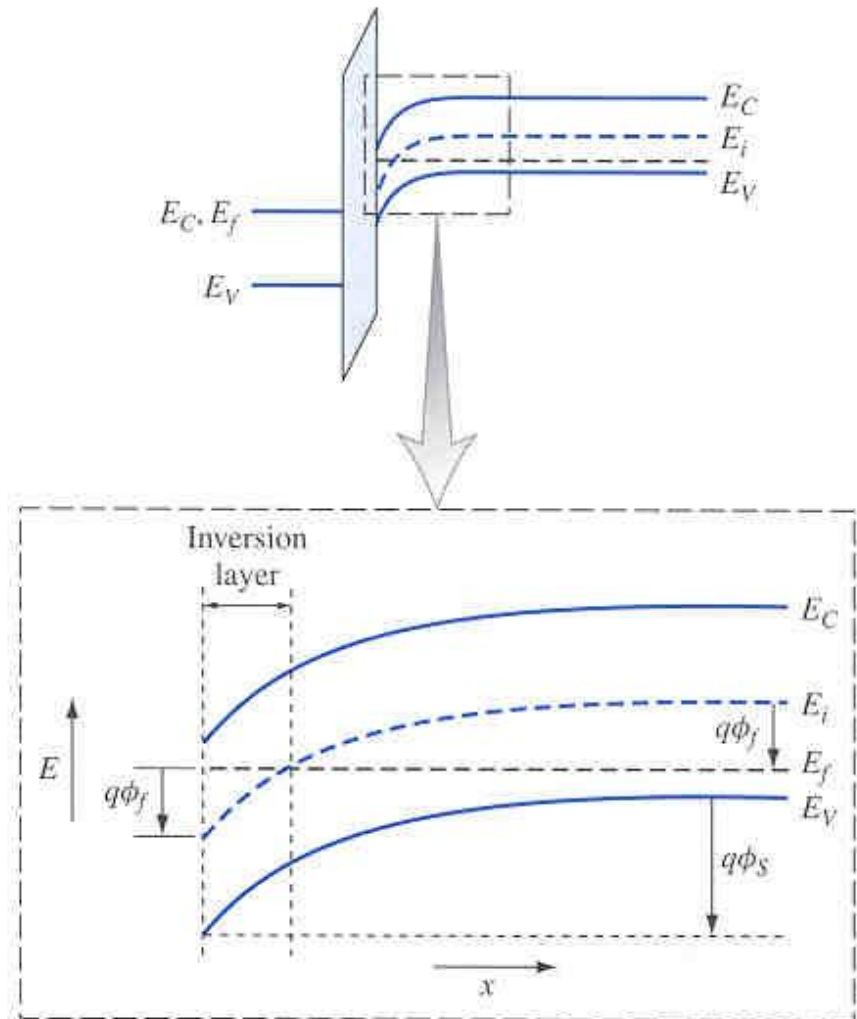


(c) Immediately after positive voltage applied on gate



(d) Steady state with positive voltage applied to gate

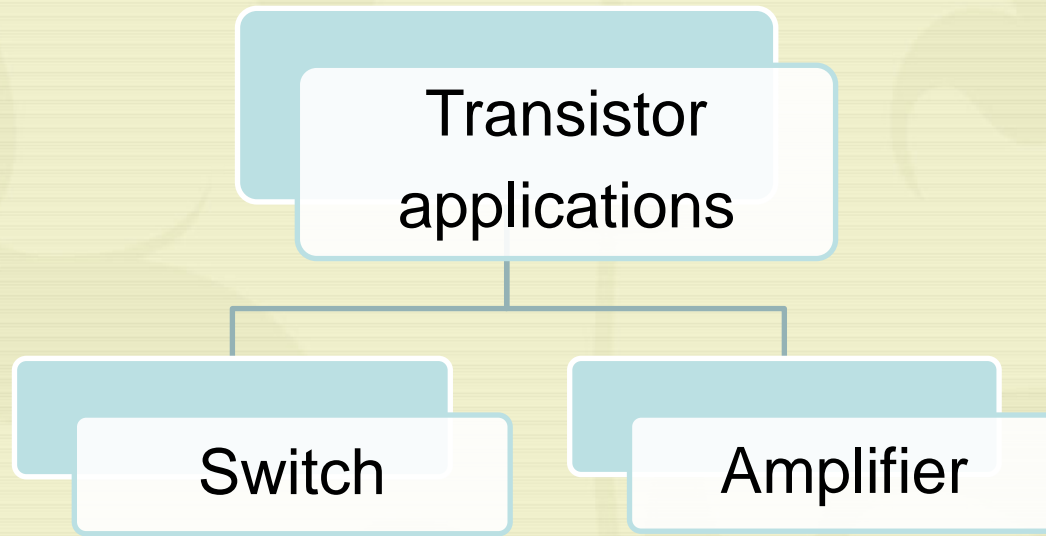
# ĐIỆN THỂ NGUỒN



$V_{GS} = V_T$  when the carrier concentration in the channel is equal to the carrier concentration in the bulk silicon.

Mathematically, this occurs when  $\phi_s = 2\phi_f$ ,  
where  $\phi_s$  is called the *surface potential*

# Applications(cont.)



- – Switch for a digital signal: BJT or MOSFET
- – Switch for a analog signal: JFET
- – Switch for a power signal: Power MOSFET or BJT
- – Current controlled-current amplifier: BJT
- – Voltage controlled-current amplifier: JFET or MOSFET



