

# CHƯƠNG 6. TIẾP XÚC KIM LOẠI-BÁN DẪN

## Metal-Semiconductor contact

Giảng viên: Nguyễn Đức Cường

Trường Đại học Công nghệ - ĐHQGHN

*Email: cuongnd@vnu.edu.vn*

Ngày 11 tháng 10 năm 2021

## 1 CHƯƠNG 6. TIẾP XÚC KIM LOẠI-BÁN DẪN

# CHƯƠNG 6. TIẾP XÚC KIM LOẠI-BÁN DẪN (Metal-Semiconductor contact)

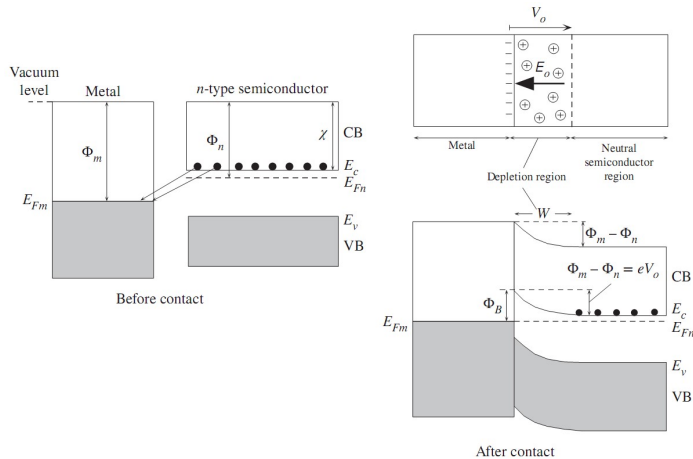
# Phân loại tiếp xúc kim loại-bán dẫn

- Điều gì sẽ xảy ra khi một kim loại và một bán dẫn tiếp xúc với nhau? Trong thực tế, điều này thường được thực hiện bằng phương pháp **lắng đọng pha hơi vật lý (physical vapor deposition, PVD)** (tức làm ngưng tụ từ pha hơi thành pha rắn) kim loại lên bề mặt của một tinh thể bán dẫn trong chân không. Các phương pháp PVD bao gồm bốc bay nhiệt, bốc bay chùm tia điện tử, phún xạ, lắng đọng bằng laser xung, v.v. Tùy thuộc vào độ chênh lệch công thoát giữa kim loại và bán dẫn, chúng ta sẽ có 2 loại tiếp xúc: **Schottky** và **Ohmic**.

**Bảng:** Bản chất điện của các tiếp xúc kim loại-bán dẫn lý tưởng

| So sánh công thoát | Bán dẫn loại $n$        | Bán dẫn loại $p$        |
|--------------------|-------------------------|-------------------------|
| $\Phi_m > \Phi_s$  | Schottky (chỉnh lưu)    | Ohmic (không chỉnh lưu) |
| $\Phi_m < \Phi_s$  | Ohmic (không chỉnh lưu) | Schottky (chỉnh lưu)    |

# Sự hình thành của tiếp xúc Schottky



Sự hình thành của tiếp xúc Schottky giữa kim loại và một bán dẫn loại  $n$  khi  $\Phi_m > \Phi_n$ .

# Sự hình thành của tiếp xúc Schottky

- **Mức chân không (vacuum level)** xác định năng lượng khi điện tử tự do thoát khỏi chất rắn và có động năng bằng không.
- Trong chất bán dẫn, **độ âm điện (electron affinity)**  $\chi$  là năng lượng cần cung cấp cho một điện tử tại đáy của vùng dẫn, tức tại mức  $E_C$ , để nó thoát ra ngoài chân không, tức ngay bên ngoài bán dẫn.
- **Công thoát (work function)**  $\Phi$  là sự khác biệt về năng lượng giữa mức chân không và mức Fermi. Công thoát là năng lượng cực tiểu để đưa điện tử ra khỏi liên kết trong chất rắn và trở thành điện tử tự do.
- Giả sử  $\Phi_m > \Phi_n$ , với  $\Phi_m$  là công thoát của kim loại và  $\Phi_n$  là công thoát của bán dẫn loại  $n$ . Khi 2 chất rắn tiếp xúc với nhau, điện tử có năng lượng cao trong bán dẫn loại  $n$  có xu hướng nhảy sang mức năng lượng thấp hơn (nằm ngay trên  $E_{Fm}$  thông qua cơ chế xuyên hầm. Các điện tử này tập trung ở mặt tiếp xúc giữa 2 chất rắn và để lại một vùng nghèo điện tử (**lớp điện tích không gian, space charge layer**) có độ rộng  $W$  (mang tổng điện tích dương) ở khu vực gần mặt tiếp xúc và nằm hoàn toàn bên trong chất bán dẫn.
- Điện thế tiếp xúc được gọi là **điện thế trong (built-in potential)**  $V_0$ , tương ứng với **điện trường trong (built-in electric field)**  $\vec{E}_0$  hướng từ phía điện tích dương sang điện tích âm.

# Sự hình thành của tiếp xúc Schottky

- Mức Fermi phải đồng nhất trong toàn bộ hệ kim loại-bán dẫn:  $E_{Fm} = E_{Fn}$ .
- Hàng rào thế năng đối với điện tử khi di chuyển từ kim loại ngược lại bán dẫn được gọi là **độ cao hàng rào Schottky (Schottky barrier height)**.

$$\Phi_B = \Phi_m - \chi = eV_0 + (E_C - E_{Fn}), \text{ như vậy } \Phi_B > eV_0$$

- Ở trạng thái hở mạch (Open Circuit), hệ ở trạng thái cân bằng động và không có dòng điện thực tế chạy qua tiếp xúc kim loại-bán dẫn:  $J_{OC} = J_2 - J_1 = 0$ , với  $J_1$  và  $J_2$  tương ứng là mật độ dòng điện do điện tử được sinh ra vì nhiệt di chuyển từ kim loại sang vùng dẫn của bán dẫn và ngược lại.

$$J_1 = C_1 \exp\left(-\frac{\Phi_B}{k_B T}\right)$$

$$J_2 = C_2 \exp\left(-\frac{eV_0}{k_B T}\right)$$

# Hàng rào thế Schottky của kim loại trên Si

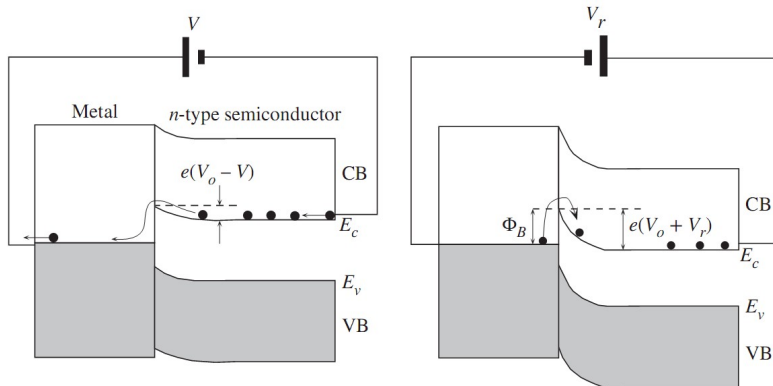
Bảng: Hàng rào thế Schottky của các kim loại trên Si

| Kim loại         | Mg  | Ti   | Cr   | Ni   | W    | Mo   | Pd   | Au  | Pt  |
|------------------|-----|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| $\Phi_{Bn}$ (eV) | 0.4 | 0.5  | 0.61 | 0.61 | 0.67 | 0.68 | 0.77 | 0.8 | 0.9 |
| $\Phi_{Bp}$ (eV) |     | 0.61 | 0.5  | 0.51 |      | 0.42 |      | 0.3 |     |
| $\Phi_m$ (eV)    | 3.7 | 4.3  | 4.5  | 4.7  | 4.6  | 4.6  | 5.1  | 5.1 | 5.7 |

$\Phi_{Bn}$  có xu hướng tăng theo công thoát của kim loại.



# Đặc trưng dòng-thể ( $I$ - $V$ ) của tiếp xúc Schottky

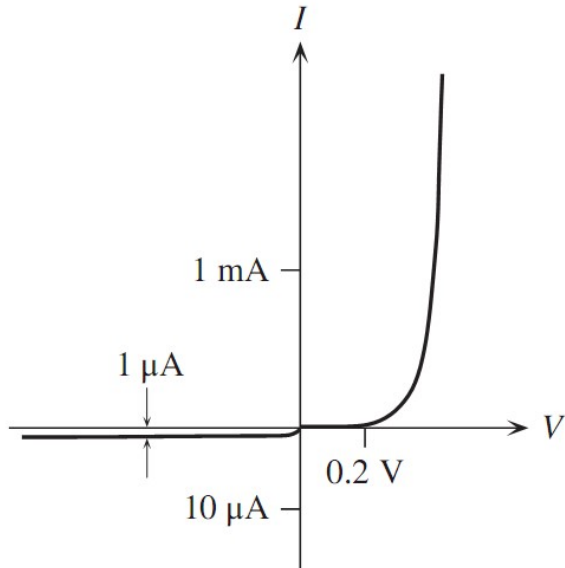


(a) Tiếp xúc Schottky được áp thế thuận. Các điện tử trên vùng dẫn của bán dẫn có thể dễ dàng vượt qua hàng rào thế thấp để đi vào kim loại.

(b) Tiếp xúc Schottky được áp thế ngược. Các điện tử phía kim loại không thể dễ dàng vượt qua hàng rào thế  $\Phi_B$  để đi vào bán dẫn.

# Đặc trưng dòng-thế ( $I$ - $V$ ) của tiếp xúc Schottky

Đặc trưng dòng-thế ( $I$ - $V$ ) thể hiện các đặc tính chỉnh lưu (rectify) của chuyển tiếp Schottky. Độ lớn dòng tại thế ngược là  $\mu\text{A}$ , là khoảng giá trị đặc trưng của một đi-ốt Schottky sử dụng Si với diện tích mặt cắt ngang  $1\text{ mm}^2$ .



# Đặc trưng dòng-thế ( $I$ - $V$ ) của tiếp xúc Schottky

- Khi tiếp xúc Schottky được áp thế thuận (cực dương vào kim loại, cực âm vào bán dẫn loại  $n$ ):

$$J_2^{\text{thuận}} = C_2 \exp\left[-\frac{e(V_0 - V)}{k_B T}\right], \text{ còn } J_1 \text{ không đổi}$$

- Mật độ dòng điện tổng hợp là:

$$J = J_2^{\text{thuận}} - J_1 = C_2 \exp\left[-\frac{e(V_0 - V)}{k_B T}\right] - C_2 \exp\left(-\frac{eV_0}{k_B T}\right)$$

$$\text{hay } J = C_2 \exp\left(-\frac{eV_0}{k_B T}\right) \left[ \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right]$$

$$\text{hay } J = J_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right]$$

với  $J_0$  được gọi là **mật độ dòng ngược bão hòa (reverse saturation current)**.

# Đặc trưng dòng-thế ( $I$ - $V$ ) của tiếp xúc Schottky

- Khi tiếp xúc Schottky được áp thế ngược  $V_r$  (cực dương vào bán dẫn loại  $n$ , cực âm vào kim loại), điện thế trong tăng từ  $V_0$  lên  $V_0 + V_r$ , và  $\Phi_B$  tăng. Dòng điện chủ yếu là do điện tử được sinh ra vì nhiệt di chuyển vượt qua hàng rào thế  $\Phi_B$  từ kim loại vào vùng dẫn của bán dẫn:

$$J_2^{\text{ngược}} = C_2 \exp\left[-\frac{e(V_0 + V_r)}{k_B T}\right] \ll J_1$$

- Khi áp thế thuận đủ lớn ( $V_f > k_B T/e \approx 25 \text{ mV}$ ):

$$J = J_0 \exp\left(\frac{eV_f}{k_B T}\right), \text{ với } J_0 = B_e T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_B}{k_B T}\right)$$

$B_e$ : hằng số phát xạ nhiệt điện tử hiệu dụng từ kim loại vào bán dẫn.

- Tiếp xúc Schottky cũng có thể được tạo thành giữa kim loại và bán dẫn loại  $p$  với công thoát  $\Phi_p$  khi  $\Phi_m < \Phi_p$ .
- Đi-ốt Schottky là linh kiện **'hạt tải đa số' (majority carrier)** do dòng điện phụ thuộc vào sự khuếch tán của hạt tải đa số (điện tử với bán dẫn loại  $n$  và lỗ trống với bán dẫn loại  $p$ ).

# Đặc trưng điện dung-thế ( $C$ - $V$ ) của tiếp xúc Schottky

- Vùng nghèo nằm hoàn toàn trong bán dẫn.
- Điện dung của vùng nghèo (tương tự tụ điện phẳng với khoảng cách giữa hai bản tụ là  $W$ , diện tích các bản tụ là  $A$ ):

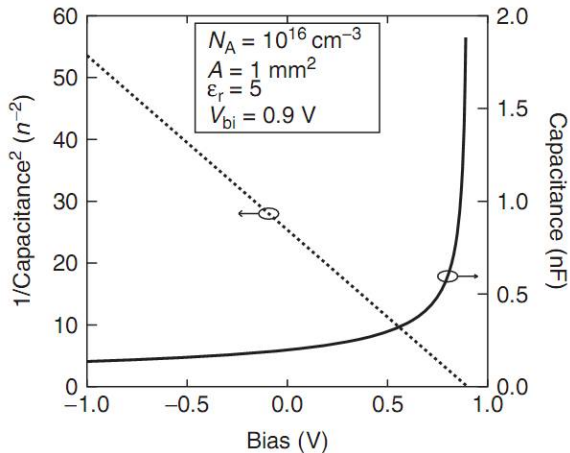
$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{W} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{\left[ \frac{2\epsilon_0 \epsilon_r (V_0 - V)}{e N_d} \right]^{1/2}} \text{ với } V \text{ là điện thế mạch ngoài}$$

- Đối với bán dẫn được pha tạp đều:

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_0 - V)}{e N_d \epsilon_0 \epsilon_r A^2}$$

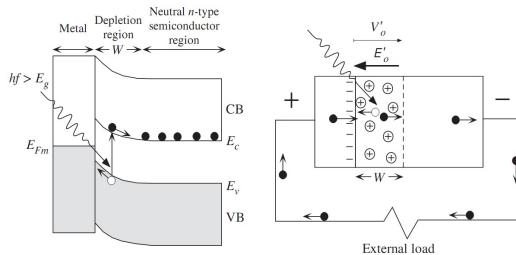
- Phân tích đồ thị Mott-Schottky ( $1/C^2$  vs.  $V$ ) cho biết mức độ pha tạp  $N_d$  (từ độ dốc của đồ thị) và điện thế trong  $V_0$  (từ giao cắt với trục  $x$ ).
- Kết hợp với mức năng lượng Fermi đã tính toán được, có thể thu được độ cao hàng rào thế  $\Phi_B$ .

# Đặc trưng điện dung-thế (C-V) của tiếp xúc Schottky



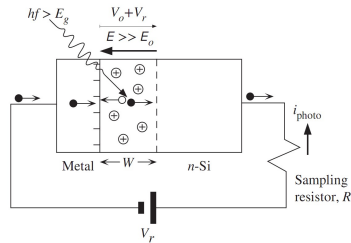
Đồ thị điện dung-thế (C-V) và Mott-Schottky ( $1/C^2$  vs.  $V$ ) của chuyển tiếp Schottky với  $V_{bi} = V_0$  là điện thế trong và  $N_A$  là nồng độ acceptor.

# Pin mặt trời và đi-ốt quang dựa trên tiếp xúc Schottky



- Vùng nghèo trong đi-ốt Schottky cho phép linh kiện này hoạt động như pin mặt trời hoặc đi-ốt quang.
- Khi hấp thụ photon có năng lượng lớn hơn  $E_g$  của bán dẫn, các cặp điện tử-lỗ trống được sinh ra tại vùng nghèo của bán dẫn. Điện trường trong vùng này kéo điện tử về phía bán dẫn và lỗ trống về phía kim loại và tạo nên **dòng quang điện (photocurrent)** ở mạch ngoài.
- Điện trường trong và điện thế trong giảm khi linh kiện được chiếu sáng. Vùng trung hòa của bán dẫn sẽ trở thành cực âm do dư điện tử, còn kim loại thành cực dương do dư lỗ trống.

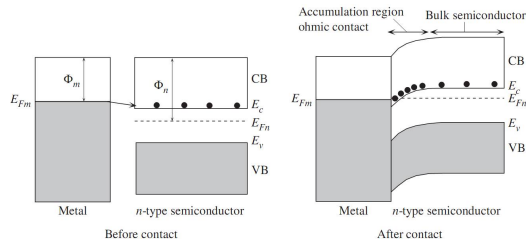
# Pin mặt trời và đi-ốt quang dựa trên tiếp xúc Schottky



- Với photon có năng lượng nhỏ hơn  $E_g$ , linh kiện vẫn có thể hoạt động, miễn là  $hf$  có thể kích thích một điện tử từ  $E_{Fm}$ , vượt qua được hàng rào thế  $\Phi_B$  và đi vào vùng dẫn của bán dẫn.
- Khi được áp thế ngược  $V_r \gg V_0$ , điện thế trong trở thành  $V_0 + V_r$  và làm giảm thời gian di chuyển của hạt tải qua vùng nghèo, đi-ốt quang Schottky hoạt động như một thiết bị cảm biến quang có độ nhạy cao.
- Phản hồi của thiết bị được đo thông qua dòng quang điện  $i_{photo}$  tạo nên do sự trôi của các hạt tải quang sinh qua vùng nghèo.

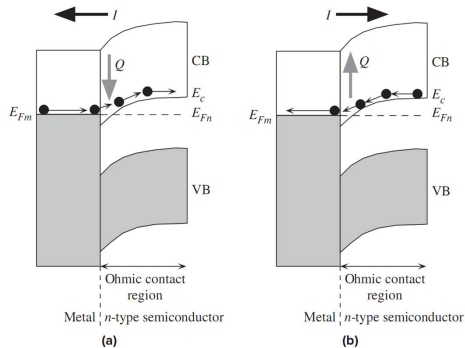


# Tiếp xúc Ohmic



- **Tiếp xúc Ohmic (Ohmic contact)** là tiếp xúc giữa kim loại và bán dẫn mà không làm cản trở dòng điện. Tiếp xúc Ohmic được hình thành khi  $\Phi_m < \Phi_n$  (kim loại tiếp xúc với bán dẫn loại  $n$ ) và  $\Phi_m > \Phi_p$  (kim loại tiếp xúc với bán dẫn loại  $p$ ).
- Vùng nằm trong bán dẫn và gần mặt tiếp xúc thì thừa điện tử và được gọi là **vùng tích lũy (accumulation region)**. Trong tiếp xúc Ohmic, điện tử dẫn ở hai phía của tiếp xúc thì có cùng năng lượng, vì vậy không có hàng rào thế ngăn cản chúng đi qua tiếp xúc theo cả hai hướng dưới tác dụng của điện trường ngoài. Dòng điện được xác định bởi điện trở của **vùng bán dẫn khối (bulk region)**,  $J = \sigma E$ .

# Hiệu ứng điện nhiệt (Peltier)

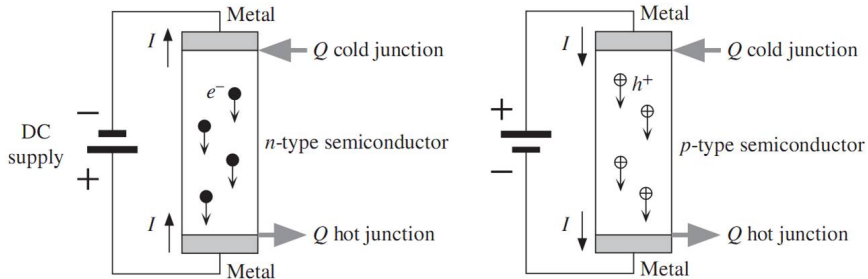


(a) Dòng điện chạy từ bán dẫn loại  $n$  sang kim loại dẫn đến sự hấp thụ nhiệt tại tiếp xúc do một điện tử cần phải thu năng lượng từ môi trường (tức dao động của mạng tinh thể) để tăng năng lượng của nó từ mức  $E_{Fm}$  lên mức  $E_C$  khi được kéo từ kim loại sang bán dẫn.

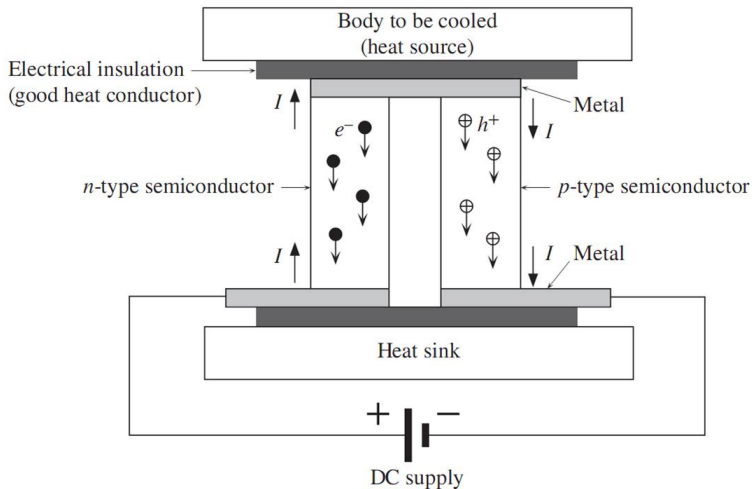
(b) Dòng điện chạy từ kim loại sang bán dẫn loại  $n$  dẫn đến sự tỏa nhiệt tại tiếp xúc do một điện tử cần phải cho đi năng lượng ra môi trường (tức dao động của mạng tinh thể) để giảm năng lượng của nó từ mức  $E_C$  xuống mức  $E_{Fm}$  khi được kéo từ bán dẫn sang kim loại.

# Hiệu ứng điện nhiệt (Peltier)

- Cần phân biệt rõ hiệu ứng điện nhiệt với hiệu ứng Joule, vốn luôn xảy ra bên trong kim loại và bán dẫn. Sự tỏa nhiệt do hiệu ứng Joule ( $P = I^2 R$ ) là do điện trở khác 0 của vật liệu, khiến cho điện tử chuyển một phần động năng nó thu được từ điện trường thành dao động nhiệt của tinh thể khi nó va chạm với các nguyên tử trong mạng tinh thể.
- Khi dòng điện chạy qua hai tiếp xúc kim loại-bán dẫn, một tiếp xúc hấp thụ nhiệt từ môi trường và lạnh đi (mặt lạnh), còn tiếp xúc còn lại tỏa nhiệt ra môi trường và nóng lên (mặt nóng). Điều này xảy ra trên tiếp xúc giữa cả 2 loại bán dẫn loại  $n$  hay  $p$  với kim loại.

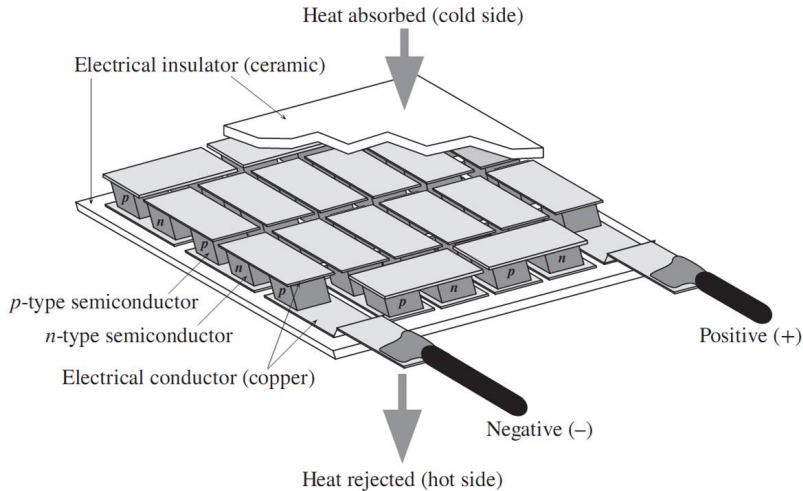


# Hiệu ứng điện nhiệt (Peltier)



Mặt cắt ngang của một thiết bị làm mát sử dụng hiệu ứng điện nhiệt.

# Hiệu ứng điện nhiệt (Peltier)



Cấu trúc thương mại hóa của thiết bị làm mát sử dụng hiệu ứng điện nhiệt.

## Bài 1

Xem xét chuyển tiếp kim loại-bán dẫn theo mô hình lý thuyết Schottky đơn giản.

- a) Vẽ giản đồ năng lượng lý thuyết đối với Cu (công thoát là 4.5 eV) trong tiếp xúc với Si có công thoát là 4.25 eV.
- b) Vẽ giản đồ năng lượng lý thuyết đối với Cu trong tiếp xúc với Si có công thoát là 4.9 eV.
- c) So sánh đặc trưng điện của các hệ tiếp xúc kim loại-bán dẫn như ở trên.

## Bài 2

Hãy tính điện dung tín hiệu nhỏ ở thể hiệu dịch DC (tức điện thế của nguồn 1 chiều bên ngoài)  $V = 0$  và ở 300 K đối với hàng rào Schottky lý tưởng giữa Pt (công thoát là 5.3 eV) và Si được pha tạp  $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Diện tích của đi-ốt Schottky là  $10^{-5} \text{ cm}^2$ . Tính thể hiệu dịch ngược  $V_r$  mà tại đó giá trị của điện dung giảm đi 25% so với tại thể hiệu dịch bằng 0.

# The End