

## 電磁學

### 材料的電特性(Electrical Properties of Matters)

- 導電性質
- 半導體
- 介電特性

#### 導電性質

由前面簡易的碰撞模型可知，材料的導電度和其帶電載體的密度、碰撞時間及質量有關。

$$S \equiv ne\mathbf{m} = \frac{ne^2t}{m} = \frac{1}{r}$$

一般我們可依材料的導電程度大約將材料分為絕緣體、半導體及導體。  
金屬導體中的載子遠較半導體及絕緣體多。

中興大學物理系 孫允武

材料的電特性-1

## 電磁學

RESISTIVITIES OF SOME MATERIALS AT ROOM TEMPERATURE (20° C)		
MATERIAL	RESISTIVITY, $\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	TEMPERATURE COEFFICIENT OF RESISTIVITY, $\alpha$ ( $K^{-1}$ )
<i>Typical Metals</i>		
Silver	$1.62 \times 10^{-8}$	$4.1 \times 10^{-3}$
Copper	$1.69 \times 10^{-8}$	$4.3 \times 10^{-3}$
Aluminum	$2.75 \times 10^{-8}$	$4.4 \times 10^{-3}$
Tungsten	$5.25 \times 10^{-8}$	$4.5 \times 10^{-3}$
Iron	$9.68 \times 10^{-8}$	$6.5 \times 10^{-3}$
Platinum	$10.6 \times 10^{-8}$	$3.9 \times 10^{-3}$
Manganin <sup>a</sup>	$48.2 \times 10^{-8}$	$0.002 \times 10^{-3}$
<i>Typical Semiconductors</i>		
Silicon, pure	$2.5 \times 10^3$	$-70 \times 10^{-3}$
Silicon, <i>n</i> -type <sup>b</sup>	$8.7 \times 10^{-4}$	
Silicon, <i>p</i> -type <sup>c</sup>	$2.8 \times 10^{-3}$	
<i>Typical Insulators</i>		
Glass	$10^{10}-10^{14}$	
Fused quartz	$\sim 10^{16}$	

中興大學物理系 孫允武

材料的電特性-2

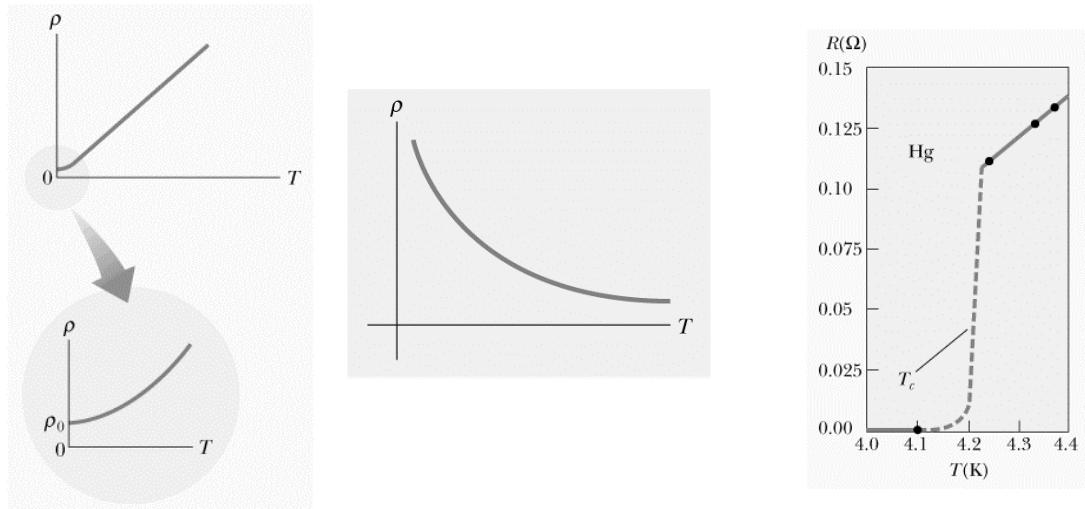
## 電磁學

電阻率的溫度係數(temperature coefficient of resistivity) $\alpha$  :

$$r - r_0 = r_0 \alpha (T - T_0)$$

$r_0$ 為在參考溫度 $T_0$ 之電阻率。一般金屬之溫度係數為正的( $n$ 固定, 溫度升高, 晶格散射增加), 而純半導體之溫度係數為負(溫度升高, 導電載子增多)。

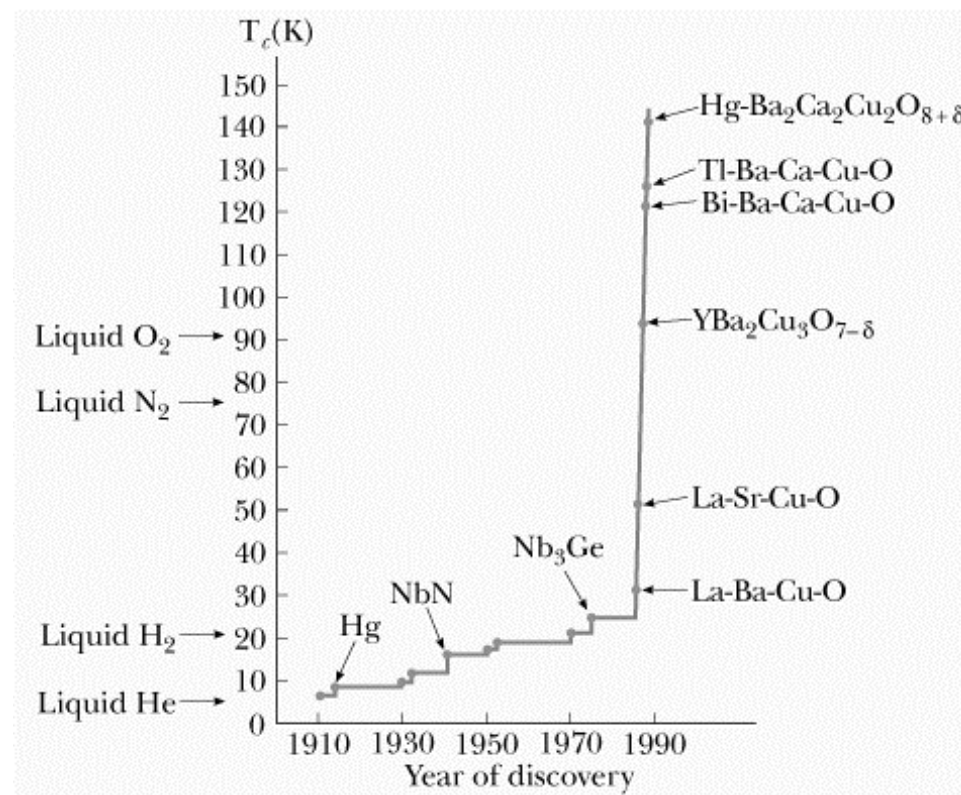
超導體在臨界溫度以上導電特性和金屬類似, 但在臨界溫度以下則電阻率降為0!



中興大學物理系 孫允武

材料的電特性一-3

## 電磁學



中興大學物理系 孫允武

材料的電特性一-4

## 電磁學

### 例題

One end of an aluminum wire whose diameter is 2.5 mm is welded to one end of a copper wire whose diameter is 1.8 mm. The composite wire carries a steady current  $i$  of 17 mA.

(a) What is the current density in each wire?

(b) What is the drift speed of the conduction electrons in the copper wire? Assume that, on the average, each copper atom contributes one conduction electron.

$$(a) \quad A_{\text{Al}} = \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 = \frac{\pi}{4} (2.5 \times 10^{-3} \text{ m})^2 \\ = 4.91 \times 10^{-6} \text{ m}^2,$$

$$J_{\text{Al}} = \frac{i}{A_{\text{Al}}} = \frac{17 \times 10^{-3} \text{ A}}{4.91 \times 10^{-6} \text{ m}^2} \\ = 3.5 \times 10^3 \text{ A/m}^2.$$

$$J_{\text{Cu}} = \frac{i}{A_{\text{Cu}}} = \frac{17 \times 10^{-3} \text{ A}}{2.54 \times 10^{-6} \text{ m}^2} \\ = 6.7 \times 10^3 \text{ A/m}^2.$$

$$(b) \quad \frac{n}{N_{\text{A}}} = \frac{\rho}{M} \quad \text{or} \quad \frac{\text{atoms/m}^3}{\text{atoms/mol}} = \frac{\text{mass/m}^3}{\text{mass/mol}} \quad n = \frac{N_{\text{A}} \rho}{M} \\ = \frac{(6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1})(9.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)}{64 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}} \\ = 8.47 \times 10^{28} \text{ electrons/m}^3.$$

中興大學物理系 孫允武

材料的電特性—5

## 電磁學

$$v_d = \frac{6.7 \times 10^3 \text{ A/m}^2}{\left( 8.47 \times 10^{28} \frac{\text{electrons}}{\text{m}^3} \right) \left( 1.6 \times 10^{-19} \frac{\text{C}}{\text{electron}} \right)} \\ = 4.9 \times 10^{-7} \text{ m/s} = 1.8 \text{ mm/h.}$$

這麼慢!!!

### 例題

Consider a strip of silicon that has a rectangular cross section with width  $w = 3.2 \text{ mm}$  and height  $h = 250 \mu\text{m}$ , and through which there is a uniform current  $i$  of 5.2 mA. The silicon is an *n-type semiconductor*, having been "doped" with a controlled phosphorus impurity. As we shall discuss in Section 27-8, the doping has the effect of greatly increasing  $n$ , the number of charge carriers per unit volume, as compared with the value for pure silicon. In this case,  $n = 1.5 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ .

(a) What is the current density in the strip?

(b) What is the drift speed?

中興大學物理系 孫允武

材料的電特性—6

## 電磁學

$$(a) J = \frac{i}{wh} = \frac{5.2 \times 10^{-3} \text{ A}}{(3.2 \times 10^{-3} \text{ m})(250 \times 10^{-6} \text{ m})} = 6500 \text{ A/m}^2.$$

$$(b) v_d = \frac{J}{ne} = \frac{6500 \text{ A/m}^2}{(1.5 \times 10^{23} \text{ m}^{-3})(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})} = 0.27 \text{ m/s} = 27 \text{ cm/s}.$$

半導體中載子的漂移速度遠較金屬中大!!!

### 例題

- (a) What is the mean free time  $\tau$  between collisions for the conduction electrons in copper?  
 (b) What is the mean free path  $\lambda$  for these collisions? Assume an effective speed  $v_{\text{eff}}$  of  $1.6 \times 10^6 \text{ m/s}$ .

中興大學物理系 孫允武

材料的電特性-7

## 電磁學

$$(a) \tau = \frac{m}{ne^2\rho}$$

分母為

$$(8.47 \times 10^{28} \text{ m}^{-3})(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})^2(1.69 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m})$$

$$= 3.66 \times 10^{-17} \text{ C}^2 \cdot \Omega / \text{m}^2 = 3.66 \times 10^{-17} \text{ kg/s},$$

$$\frac{\text{C}^2 \cdot \Omega}{\text{m}^2} = \frac{\text{C}^2 \cdot \text{V}}{\text{m}^2 \cdot \text{A}} = \frac{\text{C}^2 \cdot \text{J/C}}{\text{m}^2 \cdot \text{C/s}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2}{\text{m}^2 / \text{s}} = \frac{\text{kg}}{\text{s}}.$$

$$(b) \lambda = \tau v_{\text{eff}} = (2.5 \times 10^{-14} \text{ s})(1.6 \times 10^6 \text{ m/s}) = 4.0 \times 10^{-8} \text{ m} = 40 \text{ nm}.$$

This is about 150 times the distance between nearest-neighbor atoms in a copper lattice.

### 例題

A Platinum Resistance Thermometer

A resistance thermometer, which measures temperature by measuring the change in resistance of a conductor, is made from platinum and has a resistance of  $50.0 \Omega$  at  $20.0^\circ \text{C}$ . When immersed in a vessel containing melting indium, its resistance increases to  $76.8 \Omega$ . Calculate the melting point of the indium.  $\alpha = 3.92 \times 10^{-3} (\text{ }^\circ \text{C})^{-1}$ .

中興大學物理系 孫允武

材料的電特性-8

## 電磁學

$$\Delta T = \frac{R - R_0}{\alpha R_0} = \frac{76.8\Omega - 50.0\Omega}{[3.92 \times 10^{-3} (\text{°C})^{-1}] (50.0\Omega)} = 137\text{°C}$$

$$T = \Delta T + T_0 = 157\text{°C}$$

中興大學物理系 孫允武

材料的電特性一-9

## 電磁學

### 半導體(Semiconductor)

元素半導體 (element semiconductors)

矽(silicon, Si)、鍺(germanium, Ge)

化合物半導體(compound semiconductors)

四四族:碳化矽SiC、矽鍺合金等

三五族:砷化鎵GaAs、氮化鎵GaN、磷化鎵GaP、  
砷化銻InAs等二元化合物, 及砷化鋁鎵AlGaAs、  
磷化銻鎵GaInP、氮化銻鎵GaInN、磷砷化銻鎵  
InGaAsP等三元或四元化合物

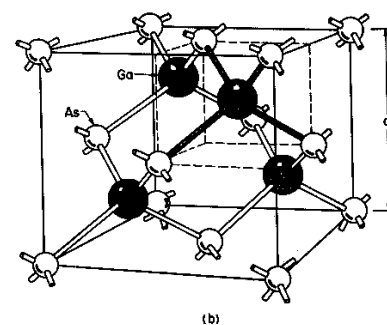
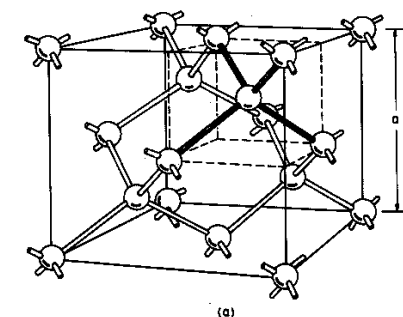
二六族:硫化鎘CdS、碲化鎘CdTe、硫化鋅ZnS等

常見的半導體晶格結構:

鑽石結構(diamond structure)與閃鋅結構(Zincblende)

Si, Ge

GaAs, ZnS



Si:  $a=0.543\text{nm}$

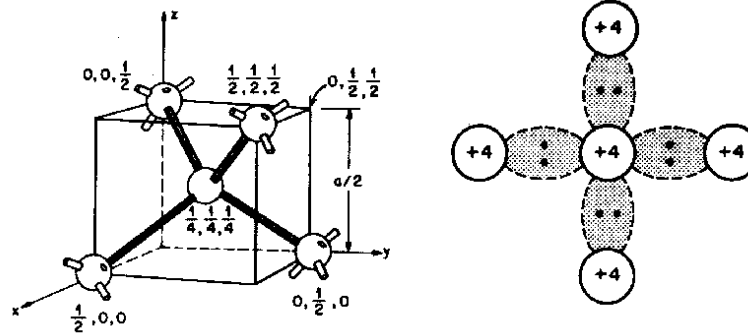
中興大學物理系 孫允武

材料的電特性一-10

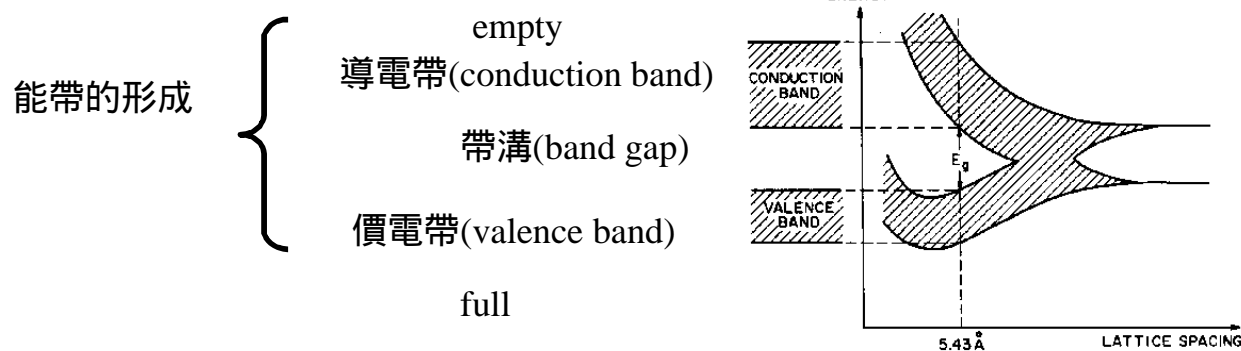
## 電磁學

原子鍵結： $sp^3$

共價鍵(covalence bond)



半導體中電子能階結構



中興大學物理系 孫允武

材料的電特性-11

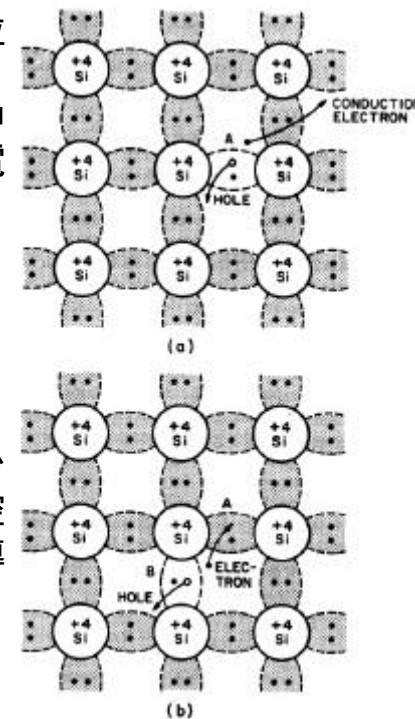
## 電磁學

電子與電洞

少數共價鍵中的電子如吸收了足夠的能量跳出他的鍵結位置，進入共價鍵間的空間，而大部分的鍵結還是完整的，只要電子不回到空出的鍵結位置，他可以在晶格的空間中游動，因此可以導電。這可以移動的電子我們稱為導電電子(conduction electron)。(a)表示在A位置的電子吸收足夠的能量，跳出共價鍵的位置，形成導電電子。

(a)中我們同時可以看到，電子跳出後在A還留下了一個空位，其他共價鍵的電子，有可能去填充此空位，例如

(b)中之B位置的電子去填了A之空位，造成空位的位置由A移到B。在沒有空位時，由於原子核的電荷和電子的電荷完全抵銷，故不帶電，成電中性；而在空位附近由於少了個電子，等效上是帶了一個基本單位的正電。因此，空位的移動，我們可以看成是一個正電荷的移動，也可以導電。這個能夠導電的空位稱為電洞(hole)，我們把他當成一個帶有單位正電荷的粒子。導電電子與電洞均可導電，都稱為載體(carriers)。

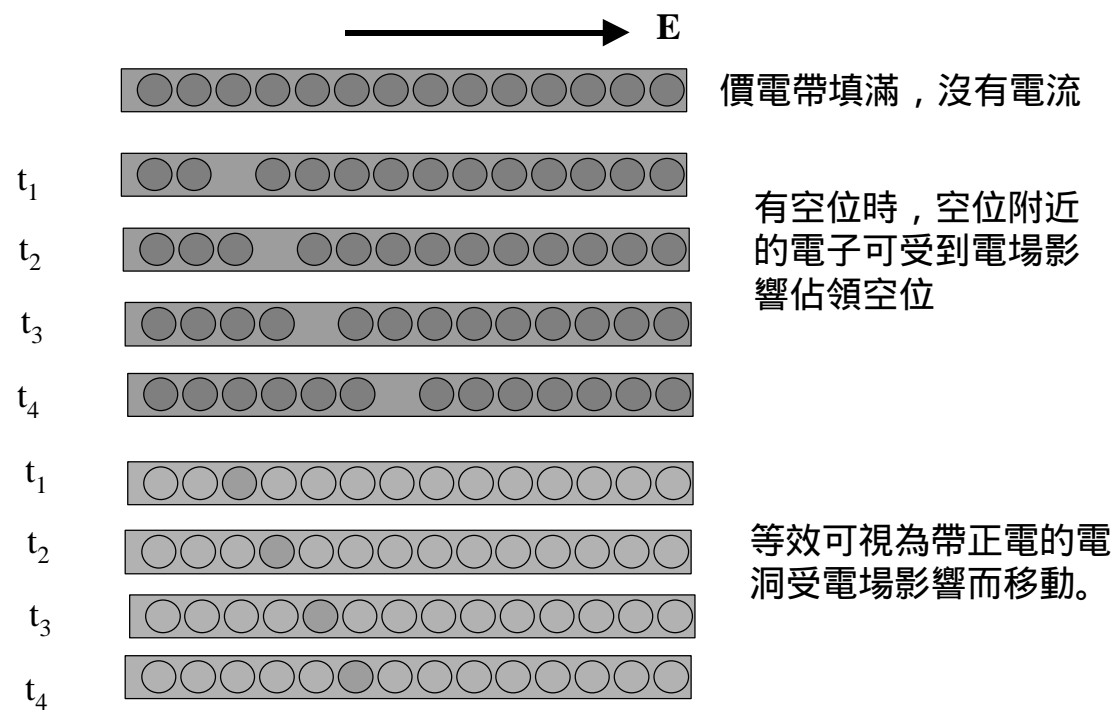


中興大學物理系 孫允武

材料的電特性-12

## 電磁學

### 電洞受電場的影響



中興大學物理系 孫允武

材料的電特性一-13

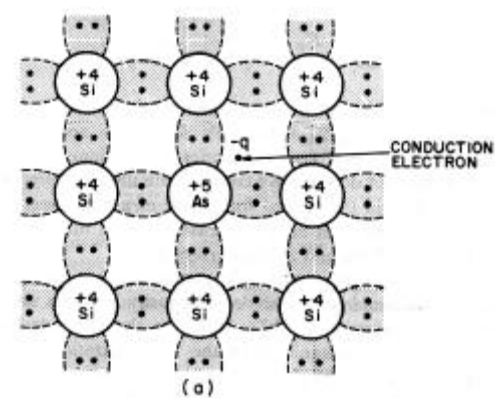
## 電磁學

### 摻雜(doping)

#### n型半導體(n-type semiconductor)

部分（約1ppm）Si以五價元素代替  
施子(donor):能夠提供導電電子的雜質

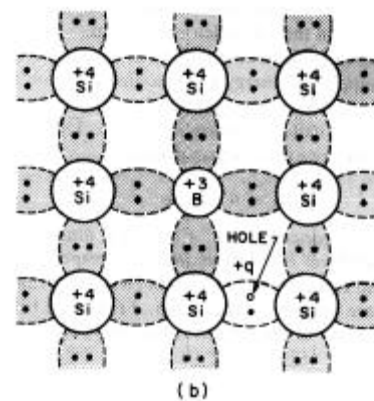
導電電子稱為多數載體(majority carrier)，  
而電洞則稱為少數載體(minority carrier)



#### p型半導體(p-type semiconductor)

部分Si以三價元素代替  
受子(acceptor):能夠提供電洞的雜質

電洞稱為多數載體(majority carrier)，而導  
電電子則稱為少數載體(minority carrier)

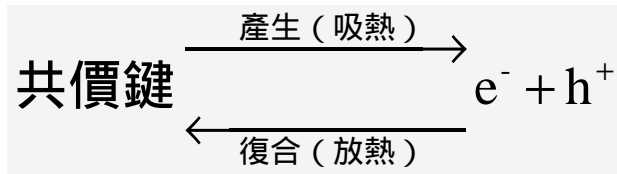


中興大學物理系 孫允武

材料的電特性一-14

## 電磁學

產生與復合 (Generation and Recombination)



在共價鍵中的電子必須吸收足夠的能量才能跳出形成電子與電洞，而所需之最小能量稱做帶溝(band gap)  $E_g$ ，而這個過程叫做產生(Generation)。

所吸收的能量可以是晶格的振動能量（熱能），光子的能量（輻射），或高速粒子的能量。

當能量不足時，共價鍵的電子並不吸收。

帶溝的大小，一般以電子伏特(eV)為單位，和共價鍵的強度有關，共價鍵強度愈強，帶溝愈大，鍵愈弱則帶溝愈小。

當導電電子在晶格中碰到了電洞，他們有機會結合形成填滿的共價鍵，並放出和帶溝差不多的能量，放出能量的形式一般可以是熱能（晶格的振盪）或光子。這個過程我們稱為復合(Recombination)。

中興大學物理系 孫允武

材料的電特性一-15

## 電磁學

群體作用定律(mass-action law)

當產生與復合達成平衡時，對於同一種半導體，固定溫度時導電電子濃度與電洞的濃度的乘積維持一定值。即

$$np = \text{常數} = n_i p_i$$

或

$$np = n_i^2(T)$$

$n_i$ 是沒有摻雜的半導體中之導電電子濃度，和半導體種類及溫度有關。

這個定律和酸鹼溶液中在改變酸鹼值過程中氫離子與氫氧根離子的濃度乘積為一定值的原理類似。

半導體種類	固有電子濃度 $n_i$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	帶溝 $E_g$ (eV)
鍺(Ge)	$2.4 \times 10^{13}$	0.67
矽(Si)	$1.45 \times 10^{10}$	1.12
砷化鎵(GaAs)	$1.79 \times 10^6$	1.42

中興大學物理系 孫允武

材料的電特性一-16



## 電磁學

**例題** 一半導體矽晶圓，其中均勻摻雜砷，濃度為 $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ，試計算出：

- 摻雜原子和矽原子的比例，
- 在室溫時導電電子與電洞的濃度，
- 導電載體濃度和沒有摻雜矽的載體濃度的比例。

(a) 矽原子的濃度為 $5 \times 10^{22} \text{ 原子/cm}^3$ ，摻雜原子和矽原子的比例為

$$\frac{10^{16} \text{ (原子/cm}^3\text{)}}{5.0 \times 10^{22} \text{ (原子/cm}^3\text{)}} = 2 \times 10^{-7} = 0.2 \text{ ppm}$$

(b) 砷是五價元素，屬於施子類的摻雜，可以提供導電電子。假設在室溫完全游離，導電電子濃度等於摻雜濃度，即 $n = N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。在室溫時矽的固有電子濃度 $n_i = 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ，

$$p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{(1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3})^2}{10^{16} \text{ cm}^{-3}} = 2.1 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

(c) 導電載體包括導電電子與電洞。在本例半導體中， $n \gg p$ ，故載體總數

$$n + p \approx n = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

固有半導體的載體總數為  $n_i + p_i = 2n_i = 2 \times 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} = 2.9 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

載體總數比例為  $\frac{10^{16} \text{ cm}^{-3}}{2.9 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}} = 3.4 \times 10^5$

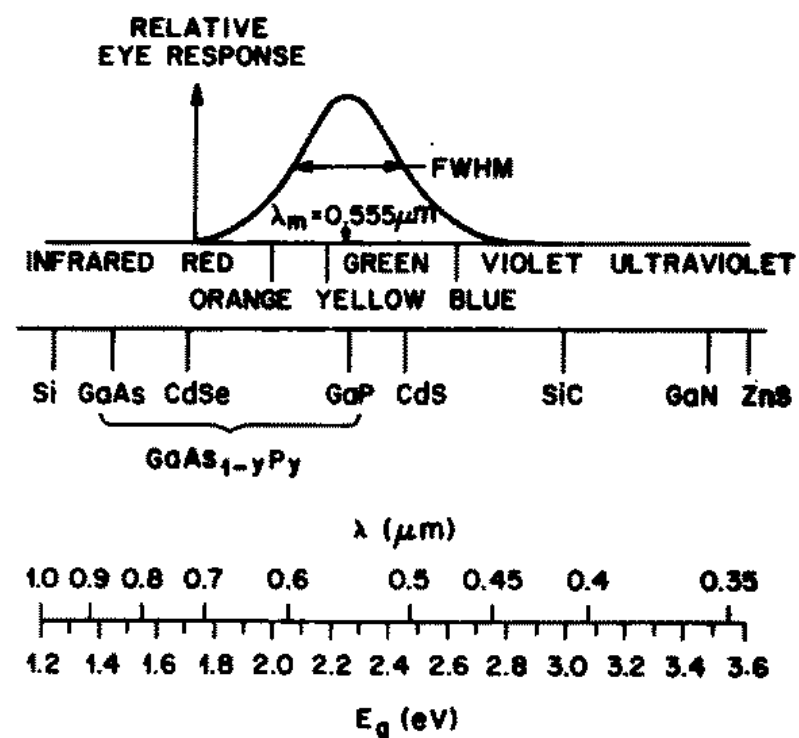
中興大學物理系 孫允武

材料的電特性一-17

## 電磁學

帶溝與半導體的光電特性

$$\begin{aligned} hn &= (4.136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}) \left( \frac{3 \times 10^{14}}{l} \text{ Hz} \right) \\ &= \frac{1.24}{l [\text{mm}]} \text{ eV} \end{aligned}$$



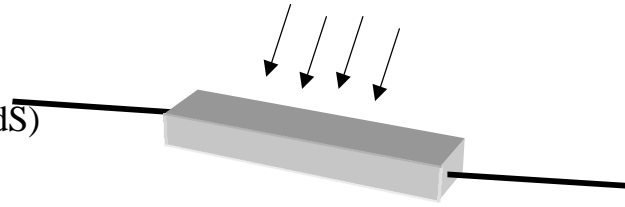
中興大學物理系 孫允武

材料的電特性一-18

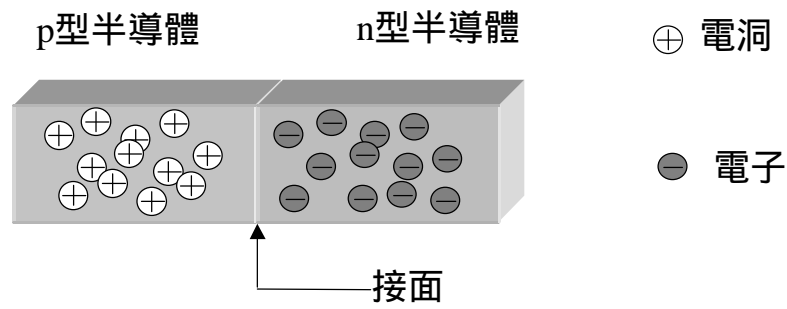
## 電磁學

常見的半導體元件

光電阻光檢測器 (CdS)



pn接面二極體

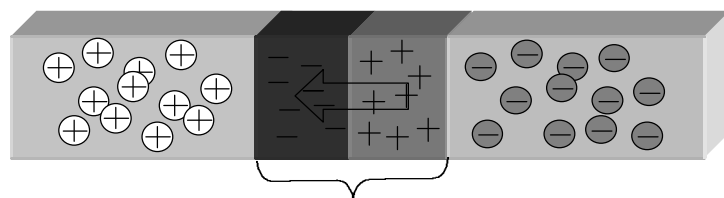


中興大學物理系 孫允武

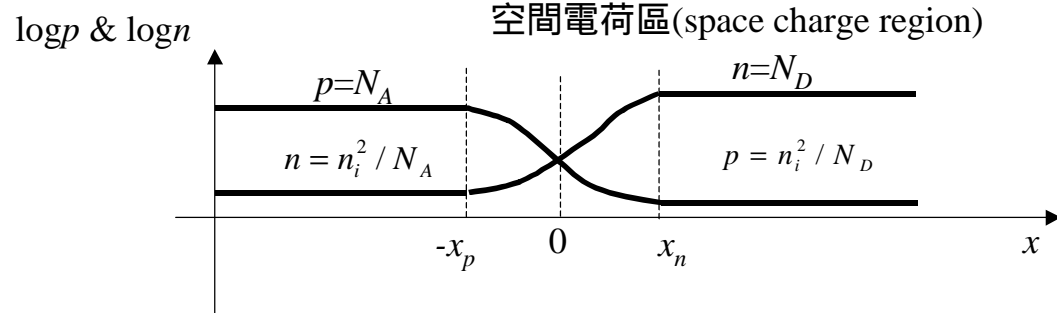
材料的電特性一-19

## 電磁學

p型半導體 n型半導體



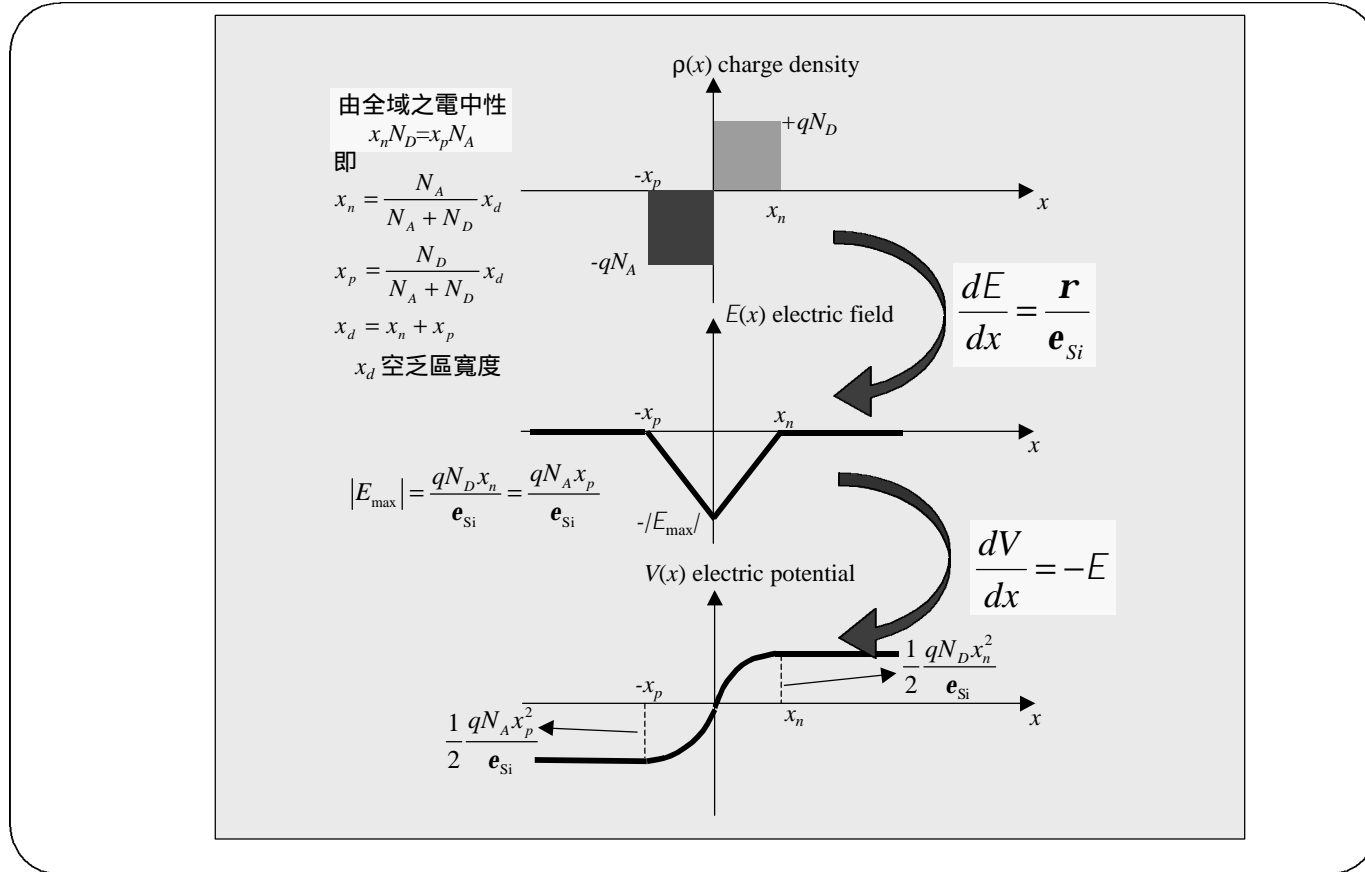
空乏區(depletion region)  
空間電荷區(space charge region)



中興大學物理系 孫允武

材料的電特性一-20

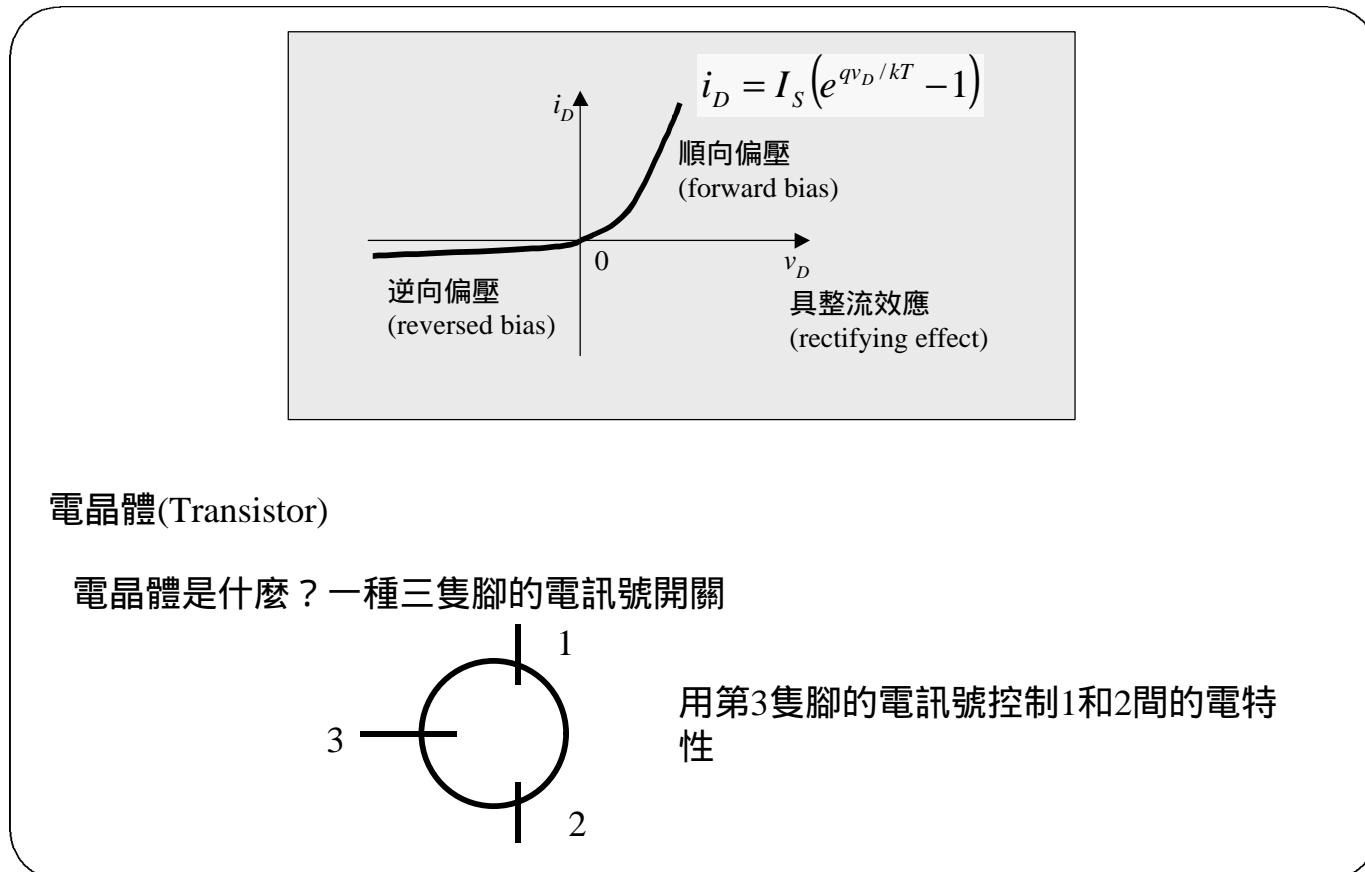
# 電磁學



中興大學物理系 孫允武

材料的電特性一-21

# 電磁學

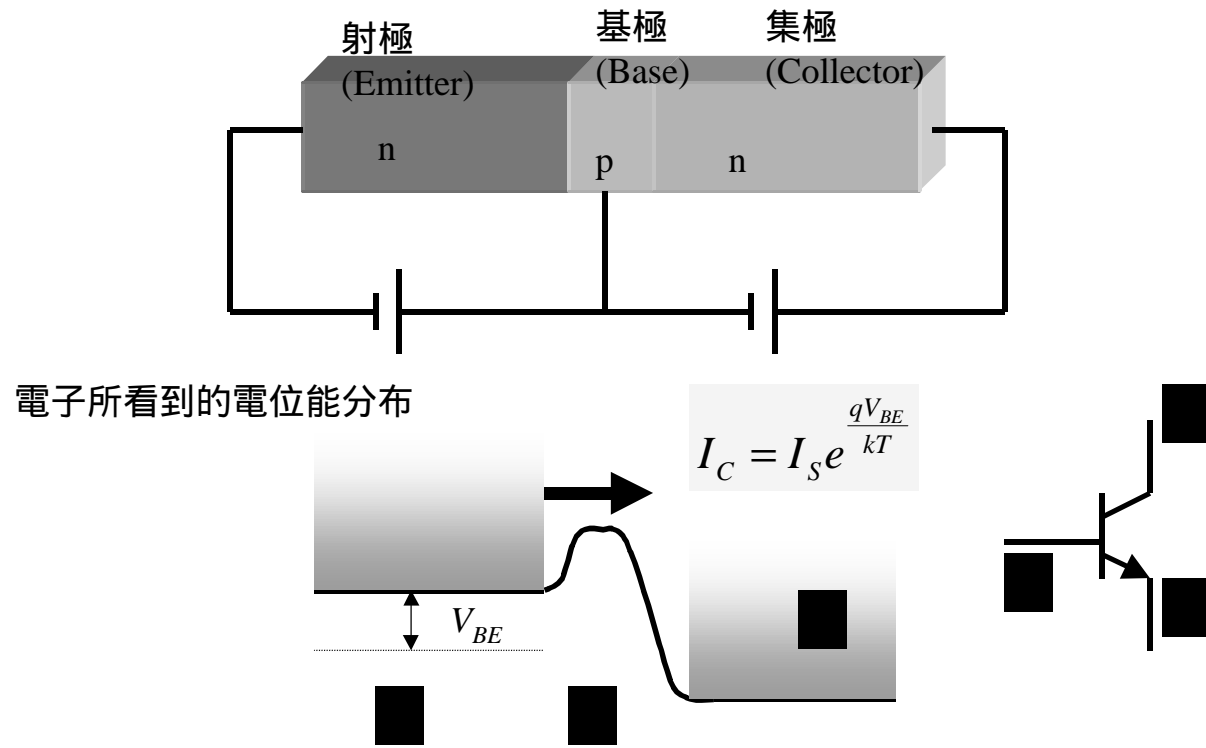


中興大學物理系 孫允武

材料的電特性一-22

## 電磁學

BJT (Bipolar Junction Transistor) 雙極接面電晶體

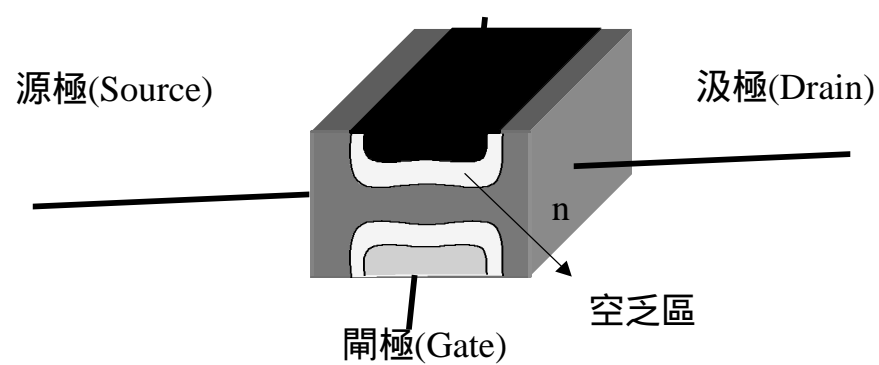


中興大學物理系 孫允武

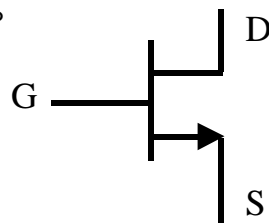
材料的電特性一-23

## 電磁學

JFET (Junction Field Effect Transistor) 接面場效電晶體



利用閘極與源極間的偏壓改變空乏區的寬度，因而改變通道的大小，源汲極間的導電特性因此改變。



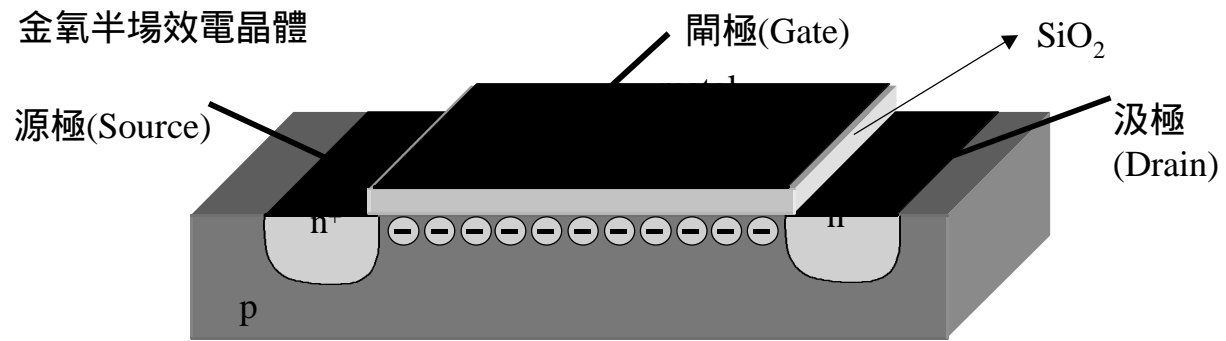
中興大學物理系 孫允武

材料的電特性一-24

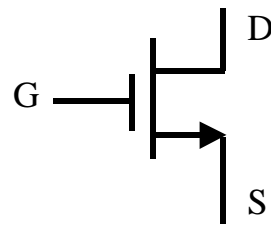
## 電磁學

MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor)

金氧半場效電晶體



閘極加上足夠大的正電壓，先將電洞趕走，再吸引電子至Si/SiO<sub>2</sub>界面，形成電子通道(n-channel)。

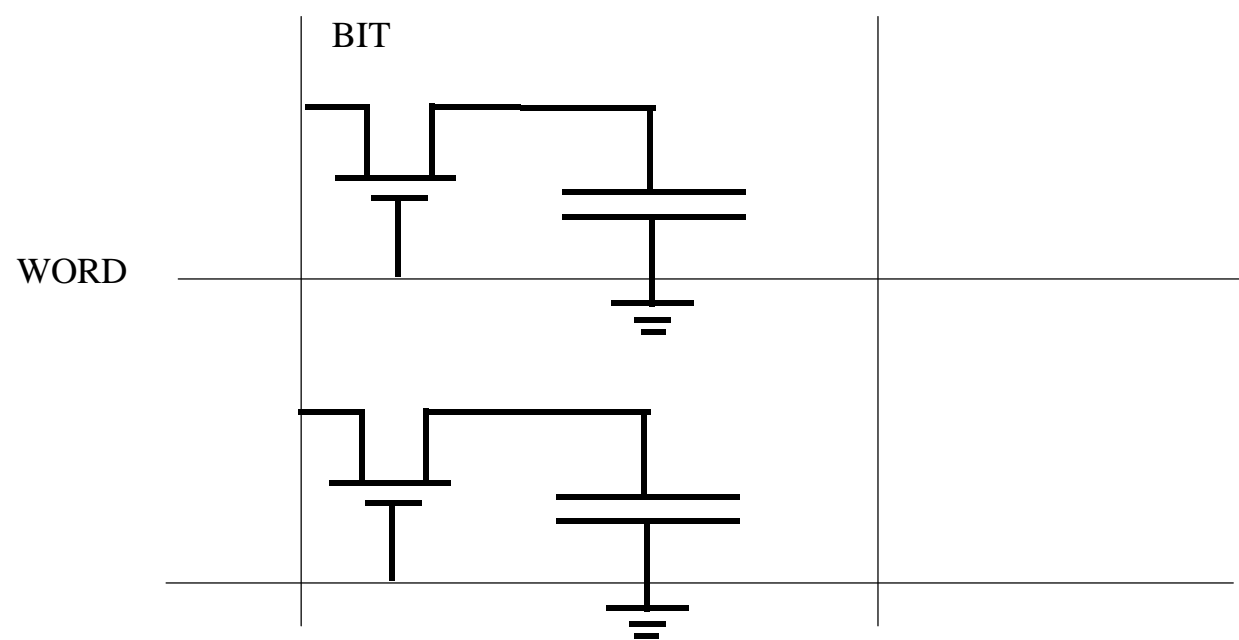


中興大學物理系 孫允武

材料的電特性一-25

## 電磁學

DRAM (Dynamic Random Access Memory)動態隨機存取記憶體



中興大學物理系 孫允武

材料的電特性一-26