



Ch. 05 二極體特性 02



參考資料:

1. 電子學 I 陳清良 編著 龍騰文化

2. 基本電學 I 康嘉宗 李天良 李源永 陳昭博 編著 復文書局

3. 電子學 / 高立圖書出版

原著：Mitchel E. Schultz

審訂：沈志忠

編譯：余永平 郭有順 蔡忠良

4. <http://score.ptivs.ptc.edu.tw/chenjy/ELECT>

[RN/ELECTRON.HTM](http://score.ptivs.ptc.edu.tw/chenjy/ELECTRN/ELECTRON.HTM)



5-1 漏電流



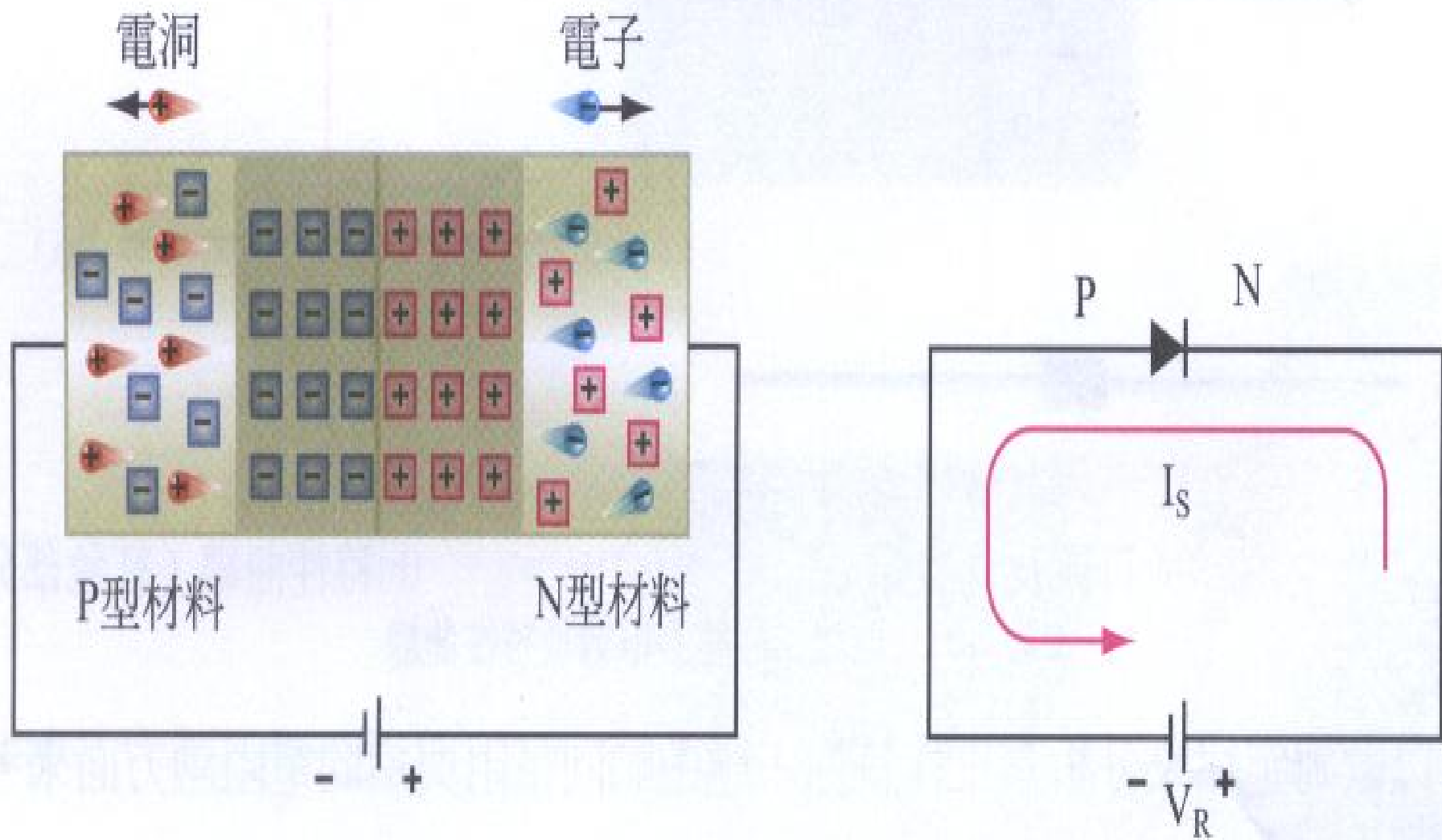
- 逆向偏壓的二極體還是會傳導少量的電流，稱為漏電流(Leakage Current)又稱逆向飽和電流 I_S 。
- 漏電流主要是由存在於二極體兩區(n區及p區)內之少數載子移動所引起。



5-1 漏電流



- 少數載子的存在是因為由熱能/Heat 所產生的電子—電洞對。
- 因為溫度決定了電子—電洞對的數量，故漏電流也受到溫度的影響。
- 少數載子的移動方向與由順向偏壓所提供電流方向相反。



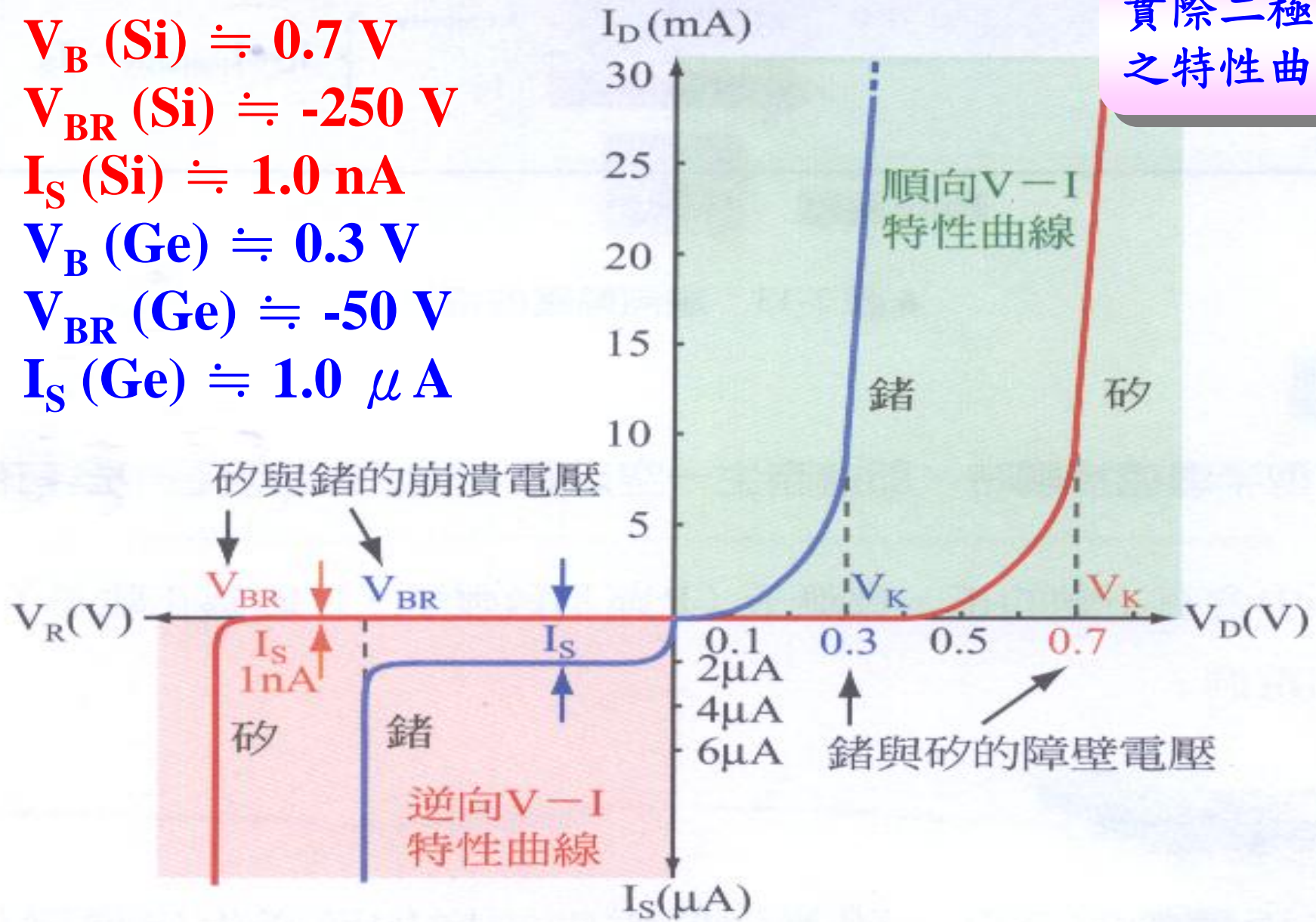
(a) 逆向偏壓

(b) 逆向飽和電流 I_s

▲圖 2-20 逆向偏壓的情形

實際二極體
之特性曲線

- $V_B(\text{Si}) \doteq 0.7 \text{ V}$
- $V_{BR}(\text{Si}) \doteq -250 \text{ V}$
- $I_S(\text{Si}) \doteq 1.0 \text{ nA}$
- $V_B(\text{Ge}) \doteq 0.3 \text{ V}$
- $V_{BR}(\text{Ge}) \doteq -50 \text{ V}$
- $I_S(\text{Ge}) \doteq 1.0 \mu\text{A}$



▲圖 2-14 矽製與鍺製二極體的順向與逆向特性曲線



實際二極體之V-I特性曲線



$$I = I_s \times [e^{V/(\eta V_T)} - 1]$$

I : 二極體的電流

I_s : 二極體逆向飽和電流(鍺=數 μA , 矽=數 nA)

e : 自然指數的底數($e \doteq 2.718\dots$)

V : 二極體兩端所加的電壓

η : 實驗常數(鍺質=1 , 矽質=2)

k : 波茲曼常數(Boltzman's constant)= 1.38×10^{-23} 焦耳/K

$$\begin{aligned} V_T &= k T / q = (1.38 \times 10^{-23}) T / 1.6 \times 10^{-19} \\ &= (T / 11,594) \text{ V} = (273 \text{ K} + 27 \text{ }^\circ\text{C}) / 11,594 \\ &\doteq 25.9 \text{ mV} \doteq 25 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_T &= (273 \text{ K} + 22 \text{ }^\circ\text{C}) / 11,594 \\ &\doteq 25.4 \text{ mV} \doteq 25 \text{ mV} \end{aligned}$$



計算題 4

$$V_F < V_B$$



假設外加順向電壓 V_F 為 $0.3V$ ，
則 $V_F < V_B (= 0.7 V / Si)$ 。

$$\begin{aligned} I &= I_S \times [e^{V/(\eta V_T)} - 1] \\ &= I_S \times [e^{0.3V/(2 \times 25 \text{ mV})} - 1] \\ &= 1 \text{ nA} \times (e^6 - 1) \end{aligned}$$

$$\doteq 1 \times 10^{-9} \times (403 - 1)$$

$$\doteq 4.0 \times 10^{-7} \doteq 0.4 \mu A$$

即還無法產生有使用價值的電流。



計算題 5

$$V_F \geq V_B$$



假設外加順向電壓 V_F 提高到 **0.8V**，
則 $V_F \geq V_B (= 0.7 \text{ V/Si})$ 。

$$\begin{aligned} I &= I_s \times [e^{V/(\eta V_T)} - 1] \\ &= I_s \times [e^{0.8\text{V}/(2 \times 25 \text{ mV})} - 1] \\ &= 1 \text{ nA} \times (e^{16} - 1) \end{aligned}$$

$$\doteq 1 \times 10^{-9} \times (8.886 \times 10^6 - 1)$$

$$\doteq 8.886 \times 10^{-3} \doteq 8.886 \text{ mA}$$

即P型與N形已重疊，空乏區消失，如同短路/導通，開始產生有使用價值的電流了。

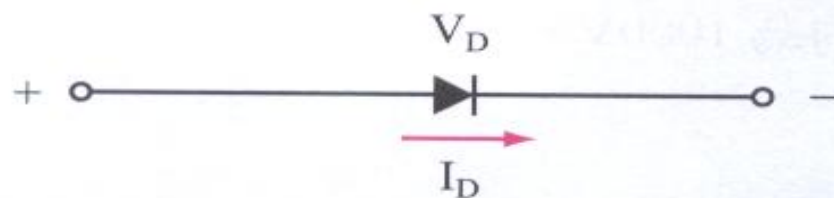


5-2 理想的二極體

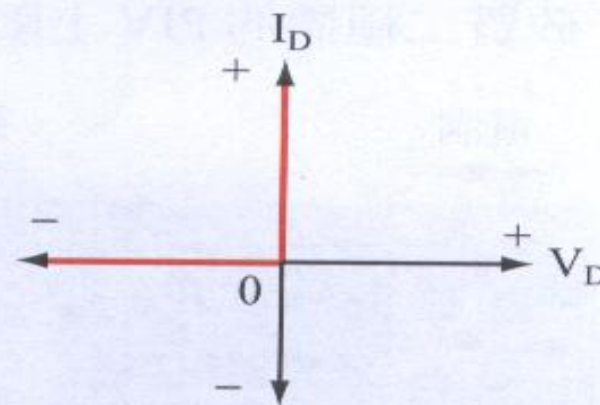


理想的二極體是一種二端裝置
(Two-terminal Device)如下圖所示：

理想的二極體有單向導電的特性，如同交通號誌的單行道，只允許單方向導電。



(a)符號及實體圖



(b)特性曲線（紅色部分）

▲圖 2-21 理想二極體的符號及特性曲線



順向電阻 (Forward Resistance)



當一理想二極體兩端接上順向偏壓(V_F)時
(+/A接p ; -/K接n)，將產生一順向電流
(I_F)，

由歐姆定律得知：

$$R_F = V_F / I_F = 0 \Omega$$

說明一理想二極體在順向傳導區內是個短路
(導通/閉路/通路/Close)，即 $I_F \neq 0$ 。



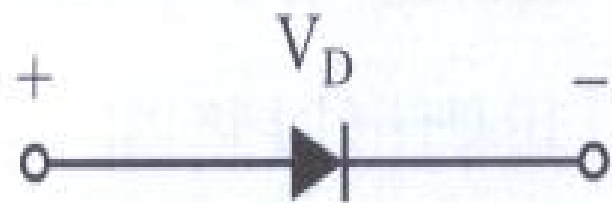
逆向電阻 (Reverse Resistance)



當一理想二極體兩端接上逆向偏壓(V_R)時
(+/A接n；-/K接p)，其逆向電流(I_R)為零，
由歐姆定律得知：

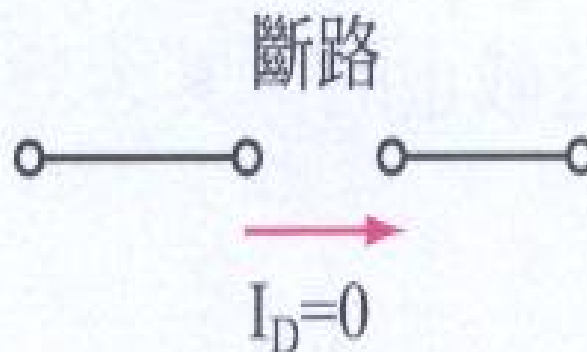
$$R_R = V_R / I_R \doteq \infty \Omega$$

說明一理想二極體在逆向傳導區內是個斷路
(不導通/開路/Open/Cut-off)。



$$\mathbf{R_F = V_F / I_F = 0 \ \Omega}$$

(a) 導通時



$$\mathbf{R_R = V_R / I_R \doteq \infty \ \Omega}$$

(b) 不導通時

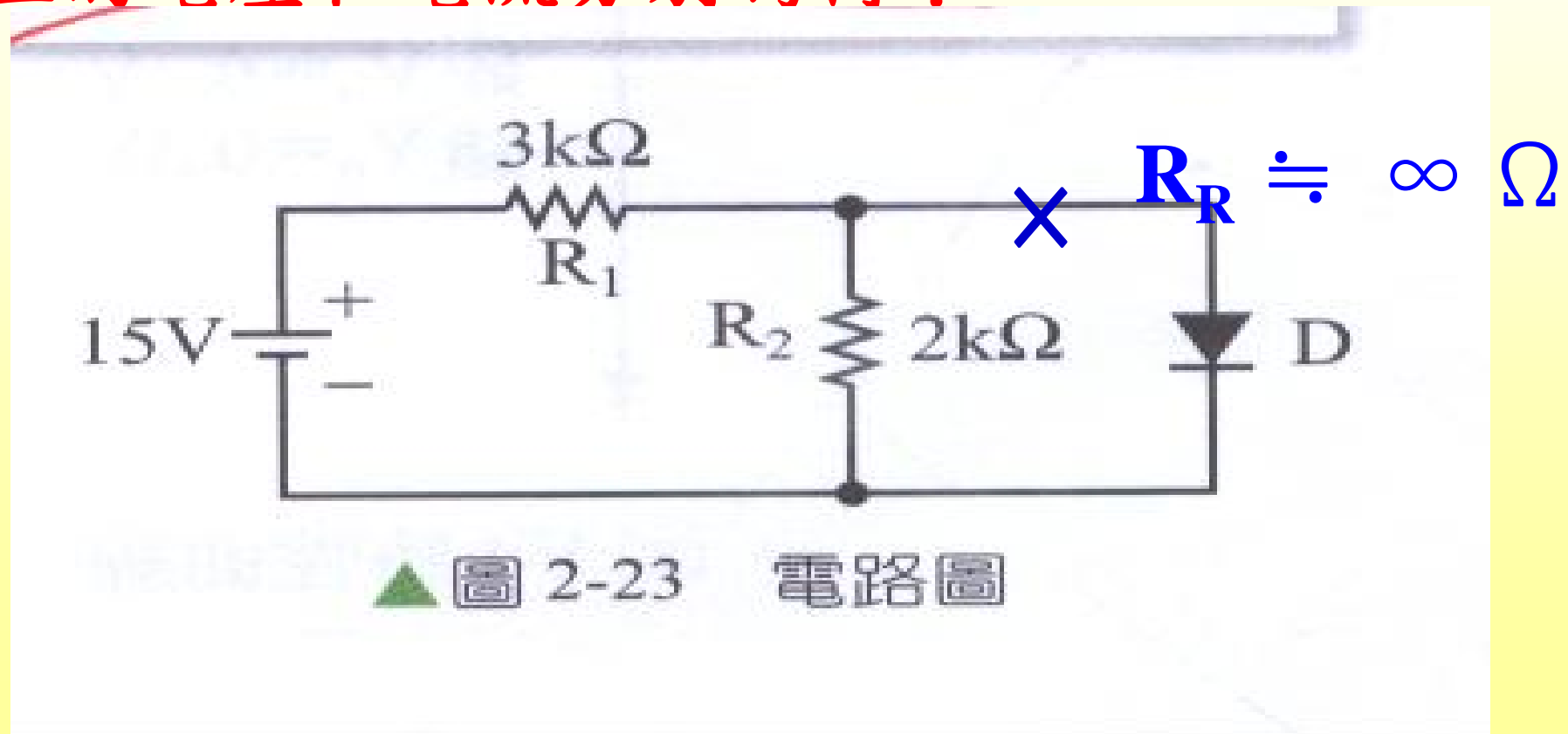
▲ 圖 2-22 理想二極體的電流模式



計算題 6



圖2-23中，若將二極體D反接，則在電阻 R_2 上的電壓和電流分別為何？





A: 計算題 6



二極體因逆向而截流，形同不導通/開路
/Open/Cut-off的電路；即串聯電路：

因電流均相同，故電路個別的電壓降和個別的電阻成正比。

$$\therefore V_1 : V_2 = R_1 : R_2 \text{ and } I_T = I_1 = I_2$$

$$\begin{aligned} \therefore V_2 &= V_T * (R_2 / R_T) \\ &= 15 \text{ V} * (2\text{k}\Omega / 2\text{k}\Omega + 3\text{k}\Omega) = 6 \text{ V} \circ \end{aligned}$$

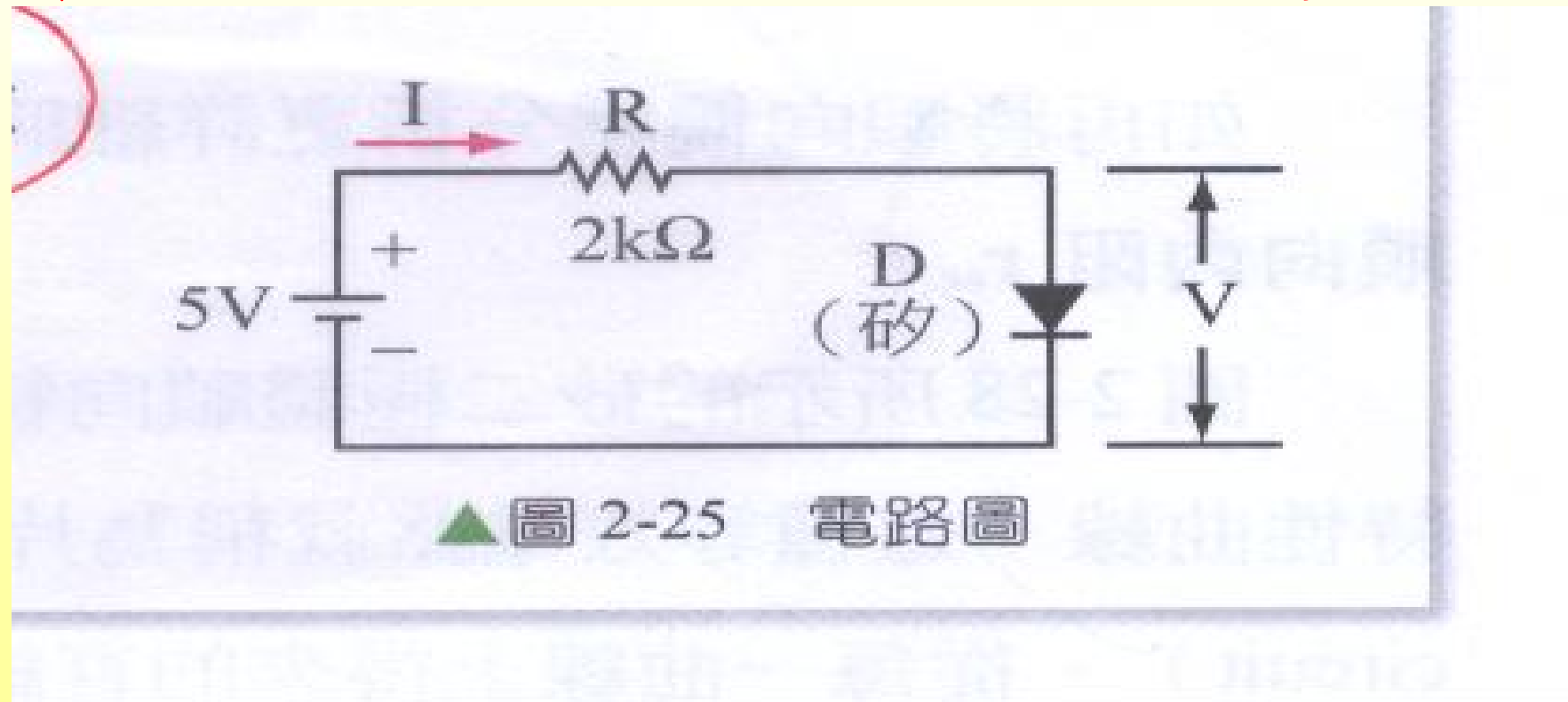
$$\begin{aligned} \therefore I_2 = I_T &= V_T / R_T = 15 \text{ V} / (2\text{k}\Omega + 3\text{k}\Omega) \\ &= 3 \text{ mA} \circ \end{aligned}$$



計算題 7



若如圖2-25所示，試用定值電壓模型來分析，求二極體兩端之 V 及 I 值分別為多少？

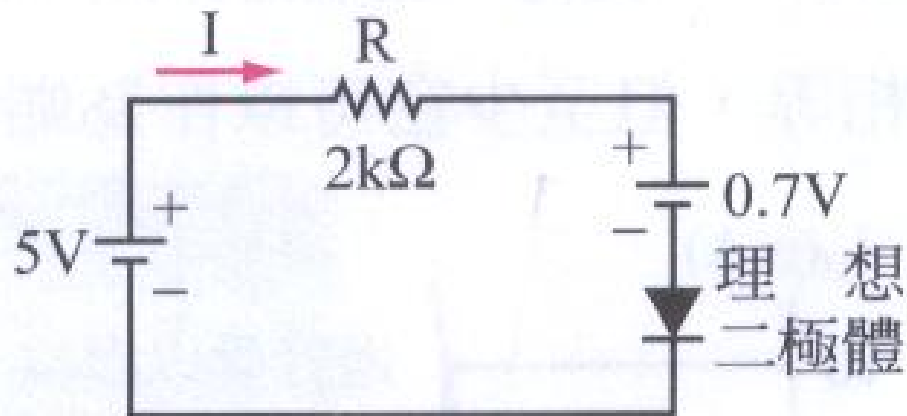




A: 計算題 7



解：將圖2-25中的二極體，以等效電路模型取代，可得圖2-26之電路。



▲ 圖 2-26 等效電路

$$V = V_B (\text{Si}) = 0.7 \text{ V}$$

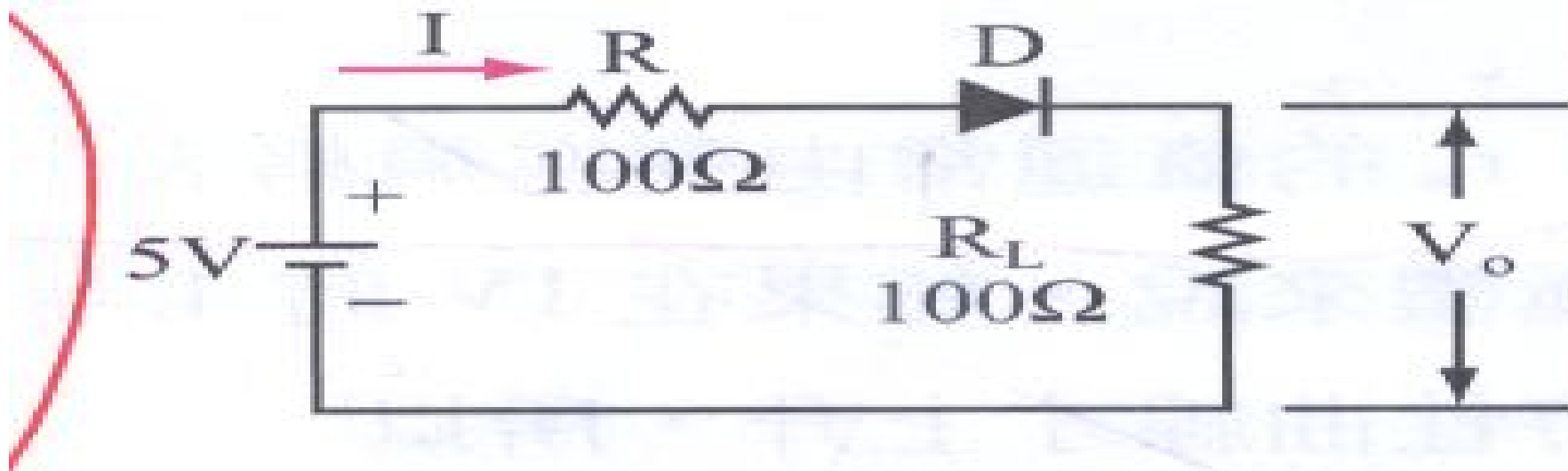
$$\begin{aligned} I &= V / R \\ &= (5 - 0.7) / 2\text{k} \\ &= 2.15 \text{ mA} \end{aligned}$$



計算題 8



如圖2-27所示之矽二極體之電路，應用定值電壓模型來分析，試求負載電阻 R_L 兩端之輸出電壓 V_0 為多少V？



▲ 圖 2-27 電路圖

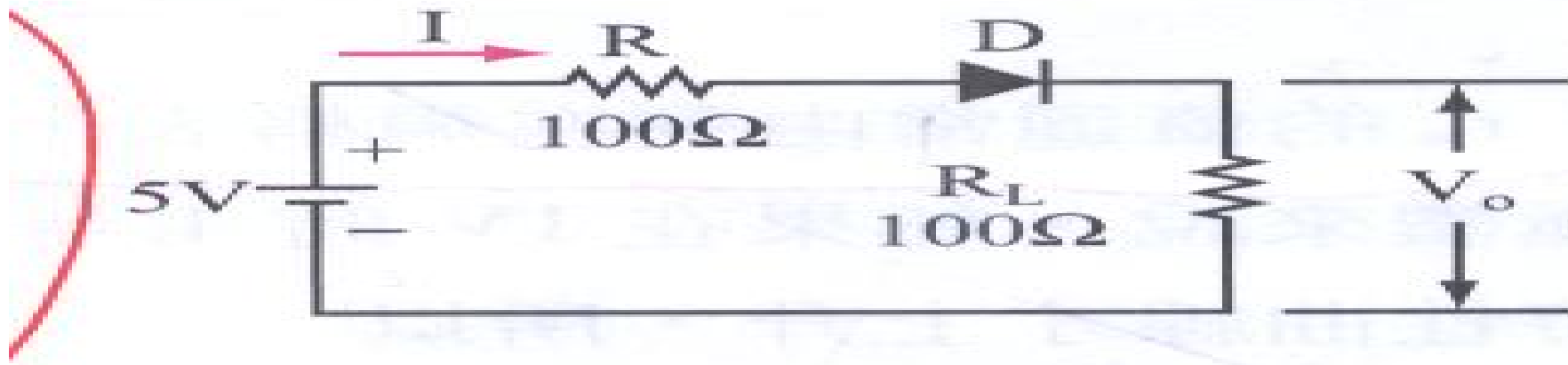


A: 計算題 8



∴ 串聯電路中各元件的電壓降和電阻值成比例關係，即 $V_L : V_T = R_L : R_T$

$$\begin{aligned} \text{ie. } V_0 &= V_T \times (R_L / R_T) \\ &= (5 - 0.7) \times (100 / 100 + 100) \\ &= 4.3 \times (100 / 200) = 2.15 \text{ V} \end{aligned}$$



▲ 圖 2-27 電路圖



A: 計算題 9

$$V_R = -1 \text{ V}$$



假設外加逆向電壓 V_R 提高到 -1 V ,

$$\text{則 } I = I_s \times [e^{V/(\eta V_T)} - 1]$$

$$= I_s \times [e^{-1\text{V}/(2 \times 25 \text{ mV})} - 1]$$

$$= I_s \times (e^{-20} - 1)$$

$$\doteq I_s \times (2.06 \times 10^{-9} - 1)$$

$$\doteq -I_s$$



A: 計算題 10

$$V_R = -10 \text{ V}$$



假設外加逆向電壓 V_R 提高到 -10 V ，

$$\text{則 } I = I_S \times [e^{V/(\eta V_T)} - 1]$$

$$= I_S \times [e^{-10\text{V}/(2 \times 25 \text{ mV})} - 1]$$

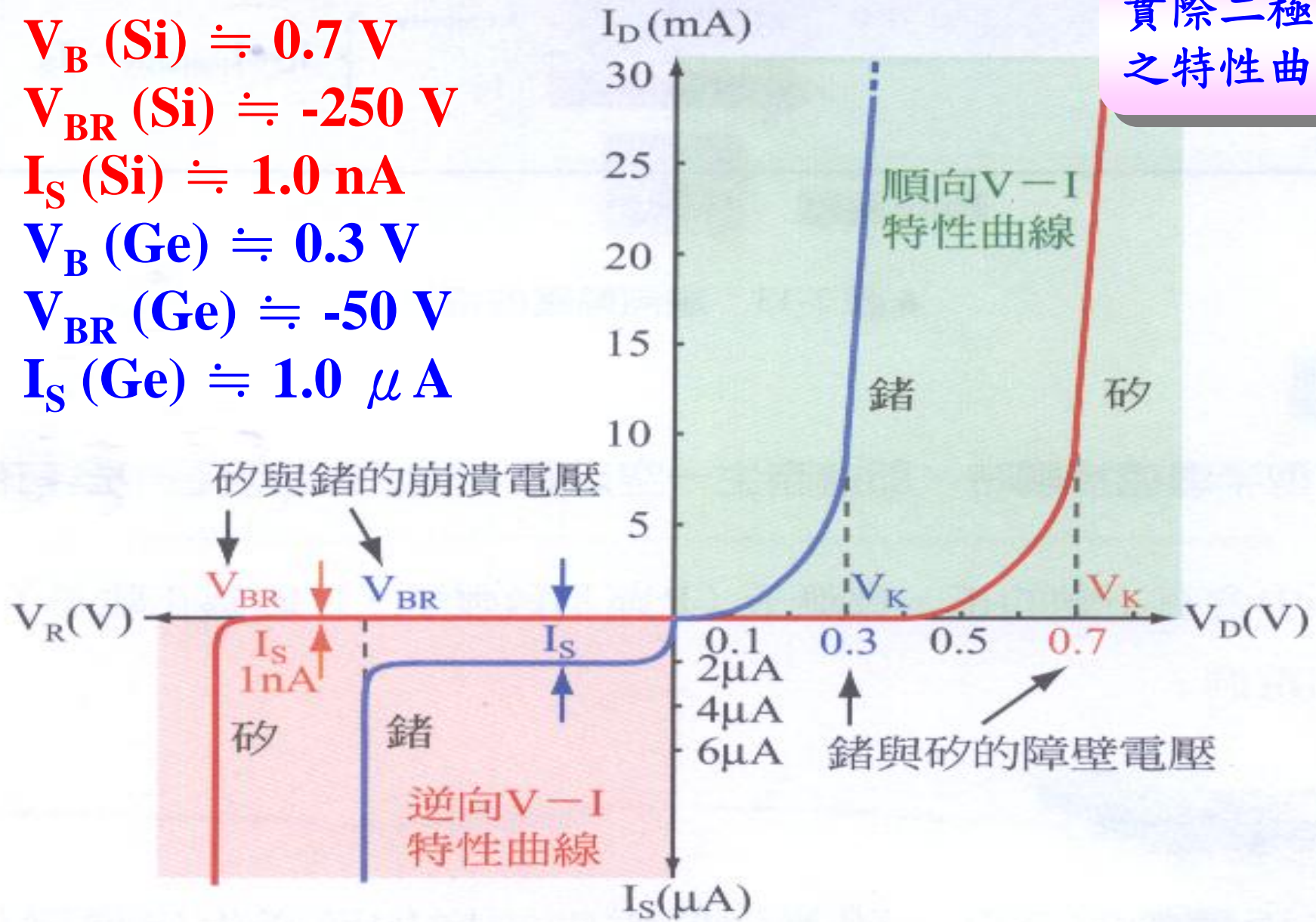
$$= I_S \times (e^{-200} - 1)$$

$$\doteq I_S \times (1.38 \times 10^{-87} - 1) \doteq -I_S$$

如果再將逆向偏壓提高到 -20V 、 -30V時，只要在沒有超出逆向峰值電壓(Peak Inverse Voltage，簡記PIV)造成崩潰毀壞之前，其 I_S 均保持不變，亦即 I_S 與逆向偏壓大小幾乎無關，這就是「飽和」之由來。

實際二極體
之特性曲線

- $V_B (\text{Si}) \doteq 0.7 \text{ V}$
- $V_{BR} (\text{Si}) \doteq -250 \text{ V}$
- $I_S (\text{Si}) \doteq 1.0 \text{ nA}$
- $V_B (\text{Ge}) \doteq 0.3 \text{ V}$
- $V_{BR} (\text{Ge}) \doteq -50 \text{ V}$
- $I_S (\text{Ge}) \doteq 1.0 \mu\text{A}$



▲圖 2-14 矽製與鍺製二極體的順向與逆向特性曲線



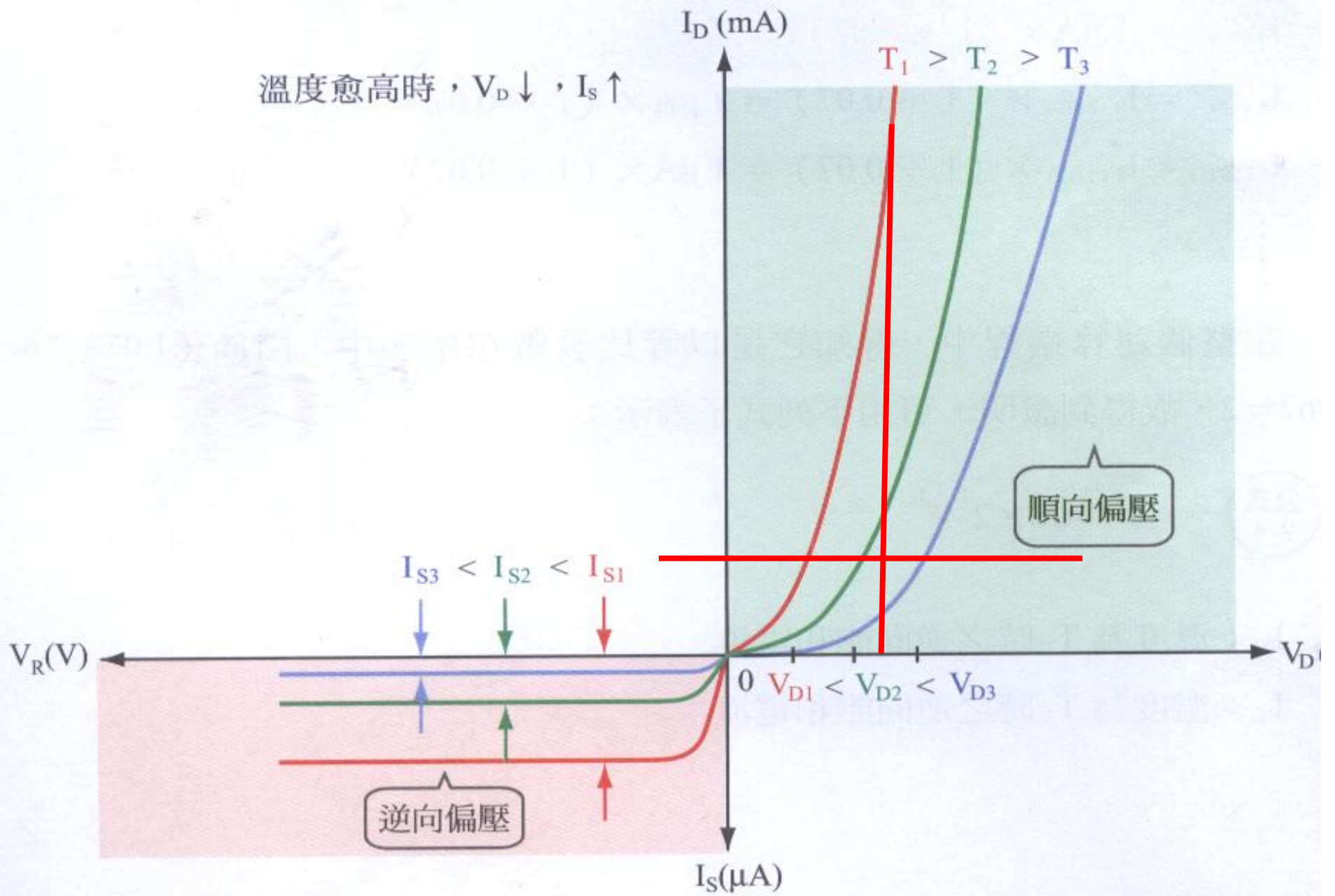
5-3 溫度效應



當溫度愈高時，二極體的順向電壓降(即障壁電壓)愈低。

在常溫 25°C 時，鍺二極體之順向電壓降約 0.3V ，而矽二極體的順向電壓降約為 0.7V 。

當溫度每上升 1°C 時，鍺二極體之順向電壓降低率約為 $\Delta V / \Delta T = -1\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ ；矽二極體之順向電壓降低率則約為 $-2.5\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ 。由此可知，順向電壓之溫度變化，矽較鍺嚴重。



▲圖 2-15 二極體特性曲線隨著溫度的改變而發生的變化



5-4 逆向飽和電流之溫度效應



溫度升高時，半導體之共價鍵斷裂愈多(吸收熱能增加)，致使少數載子增加，二極體之逆向飽和電流 I_S 亦隨之增加；一般而言，溫度每升高 1°C 時， I_S 會增加約7%。

鍺或矽二極體中，溫度每升高 10°C 時，其逆向飽和電流約將增加為原來的2倍????



假設在室溫 25°C 時， $I_S = 1\mu\text{A}$ ，則：

$$I_{S(25^{\circ}\text{C})} = 1\mu\text{A}$$

$$I_{S(26^{\circ}\text{C})} = 1\mu\text{A} \times (1+0.07)^1$$

$$I_{S(27^{\circ}\text{C})} = I_{S(26^{\circ}\text{C})} \times (1+0.07)^1 = 1\mu\text{A} \times (1+0.07)^2$$

$$I_{S(28^{\circ}\text{C})} = I_{S(27^{\circ}\text{C})} \times (1+0.07)^1 = 1\mu\text{A} \times (1+0.07)^3$$

在整個運算過程中，得知它是以等比級數在增加中，由於 $(1.07)^{10} = 1.967 \doteq 2$ ，故得到證明。

$$I_{s2} = I_{s1} \times 2^{(T2 - T1) / 10}$$

I_{S1} ：溫度為 T_1 時之逆向飽和電流

I_{S2} ：溫度為 T_2 時之逆向飽和電流



A: 計算題 11



假設有一矽二極體，在常溫 25°C 時的順向電壓為 0.7V ，試計算溫度升高至 55°C 時之順向電壓值？

$$\begin{aligned} \text{A : } V_{D(55^{\circ}\text{C})} &= V_{D(25^{\circ}\text{C})} + (-2.5 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}) \times (T_2 - T_1) \\ &= V_{D(25^{\circ}\text{C})} + (-2.5 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}) \times (55^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}) \\ &= 0.7 \text{ V} - 0.075 \text{ V} = 0.625 \text{ V} \end{aligned}$$



A: 計算題 12



設有一矽二極體，在溫度 25°C 時的逆向飽和電流為 3nA ，試求溫度升高至 65°C 時，逆向飽和電流為多少？

$$\text{A: } I_{s2} = I_{s1} \times 2^{(T2 - T1) / 10}$$

I_{s1} : 溫度為 T_1 時之逆向飽和電流

I_{s2} : 溫度為 T_2 時之逆向飽和電流

$$= 3 \text{ nA} \times 2^{(65 - 25) / 10}$$

$$= 3 \text{ nA} \times 2^4$$

$$= 48 \text{ nA}$$

