

教案一、LED/RC/RL 電路設計與量測

一、目的

1. 以 ADALM2000 學習 LED/RC/RL 電路的設計與量測
2. 研究串聯 RC 電路的瞬態響應，並使用脈衝波了解時間常數的概念。
3. 研究串聯 RL 電路的瞬態響應，並使用脈衝波了解時間常數的概念。

二、原理

2.1 LED 電路設計

將 ADALM2000 的 V + 輸出設定為 5V，提供電源給一個額定電流為 20 毫安培的紅光 LED。為了安全起見，不以最大額定電流驅動 LED，以 18 毫安培驅動就好。

如果簡單地將 LED 直接連接到電池，歐姆定律： $I = \frac{V}{R}$ ，線路中沒有電阻所以

電流 $I = \frac{5}{0}$ ，此時分母為零，導致電流無窮大！但是實際上並非無限大，而是

ADALM2000 的 +5V 電源可以提供的電流。不希望有那麼多電流流過 LED，需要一個電阻器。電阻器的加入，滿足電壓為 5V 且電流小於 18 毫安培， $R =$

$$\frac{5}{0.018} = 277 \Omega。$$

因此需要挑一個電阻值『大於且接近』277 Ω ，將通過 LED 的電流保持在最大額定電流以下。

2.2 RC 電路設計

將 RC 電路輸入脈衝波，分析電路輸出的瞬態響應。RC 電路的时间常數 τ 與脈衝時間寬度 t_p ，決定了瞬態響應的結果。

時間常數 (τ)：用希臘字母 tau 表示，意思是 RC 電路中電壓發生變化所需的一個時間單位。當發生脈衝波高低電位切換後，經過時間超過五個時間常數 (5τ) 時，電壓已達到其最終值，稱為穩態響應。

RC 電路的时间常數是等效電容值與戴維寧電阻的乘積。

$$\tau = R \times C \quad (1)$$

脈衝是一種電壓或電流，它從一個電壓值變化到另一個電壓值，然後再週期性的反覆變化。如果波形的高電壓值維持平穩時間等於其低電壓值維持平穩時間，稱為方波。若脈衝的週期為 T，則理想方波的脈衝時間寬度 (t_p) 等於時間週期 T 的一半。

$$\text{脈衝時間寬度 } t_p \text{ 和頻率 } f \text{ 之間的關係，} f = \frac{1}{2t_p} \quad (2)$$

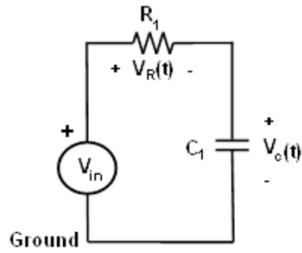


圖 1 串聯 RC 電路。

從克西荷夫定律可以看出，電容器兩端的充電電壓 $V_C(t)$ ：

$$V_C(t) = V \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \text{ for } t \geq 0 \quad (3)$$

其中， V 是在時間 $t = 0$ 時施加到電路的電壓源。 RC 是時間常數。響應曲線為指數函數遞增，如圖 2 所示。

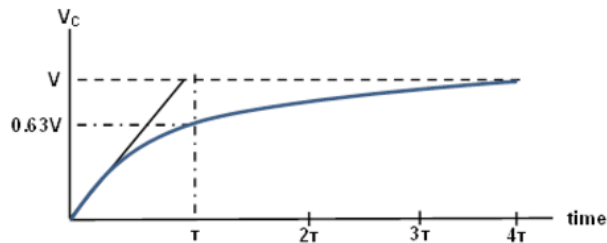


圖 2 電容器中的電壓充電，以指數函數遞增。橫軸為時間軸，由時間常數 τ 的整數倍顯示。縱軸是電容器兩端的電位差 V_C 。

電容器的放電電壓公式：

$$V_C(t) = V_0 e^{-\frac{t}{RC}} \text{ for } t \geq 0 \quad (4)$$

其中 V_0 是 $t = 0$ 時存儲在電容器中的初始電壓。 RC 為時間常數 τ 。響應曲線為指數函數衰減，如圖 3 所示。

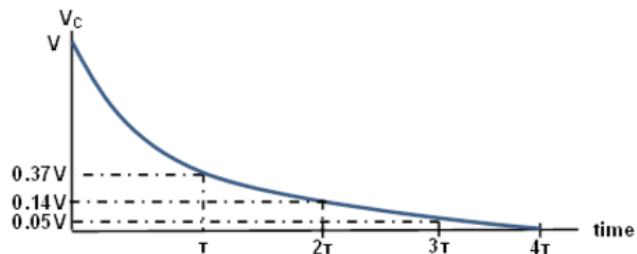


圖 3 電容器中的電壓放電，以指數函數遞減，橫軸為時間軸，由時間常數 τ 的整數倍顯示。縱軸是電容器兩端的電位差 V_C 。

2.3 RL 電路設計

將 RL 電路輸入脈衝波，分析電路輸出的瞬態響應。RL 電路與 RC 電路十分相似，不過 RL 電路時間常數是等效電感與戴維寧電阻的相除。

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (5)$$

同樣以脈衝方波作為輸入，脈衝的周期為 T，則理想方波的脈衝時間寬度 (t_p)

等於時間週期 T 的一半。脈衝時間寬度和頻率之間的關係， $f = \frac{1}{2t_p}$ (6)

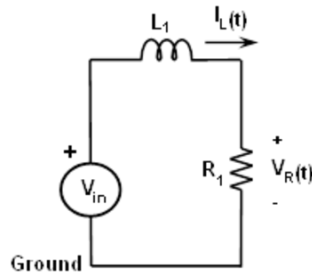


圖 4 串聯 RL 電路

在 RL 電路中，電感器的電流與 RC 電路中電容器的電壓具有相同的形式：

$$\text{電感器中電流的表達式為：} I_L = \frac{V}{R} \left(1 - e^{-\frac{tR}{L}} \right), t \geq 0 \quad (7)$$

其中，V 是 $t = 0$ 時施加到電路的源電壓。響應曲線為指數函數遞增，如圖 5 所示。

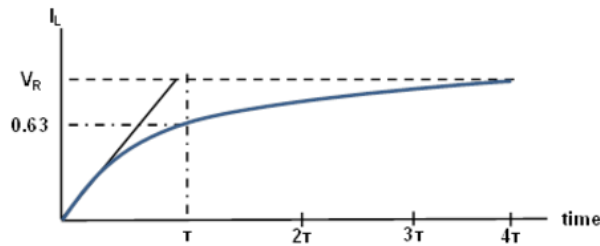


圖 5 電感器中的電流，以指數函數遞增，橫軸為時間軸，由時間常數 τ 的整數倍顯示。縱軸是與電感器的電流 I_L 。

$$\text{電感器電流衰減的表達式為：} I_L(t) = I_0 e^{-\frac{tR}{L}}, t \geq 0 \quad (8)$$

I_0 是在 $t = 0$ 時存儲在電感器中的初始電流， L/R 為時間常數 τ 。響應曲線為指數函數衰減，如圖 6 所示。

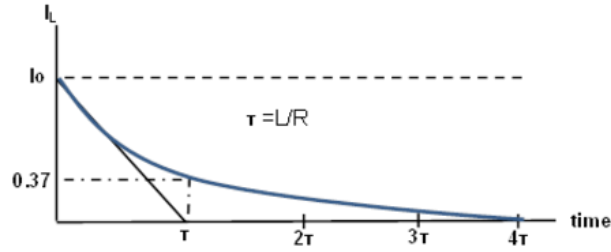


圖 6 電感器中的電流，以指數函數遞減，橫軸為時間軸，由時間常數 τ 的整數倍顯示。縱軸是電感器的電流 I_L 。

由於可以使用 ADALM2000 直接測量通過電感器的電流（驅動源提供的電流），可測量和比較電阻器兩端的電流和輸出電壓。電阻器兩端的電壓波形應類似於電感器的電流波形 $V_R = I \times R_L$ 。從示波器上的波形，能夠測量時間常數 τ ，它應該等於 $\tau = L / R_{total}$ ， R_{total} 是總電阻，通過 $R_{total} = R_{inductance} + R$ 計算得出。 $R_{inductance}$ 是電感器電阻的測量值，可以用三用電錶事先測量得知。

三、LED/RC/RL 設計電路圖

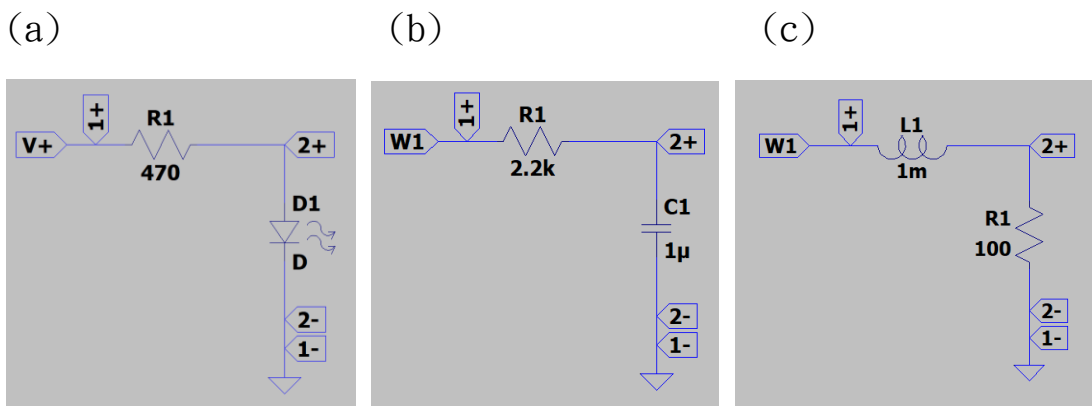


圖 7 (a) LED 電路圖，(b) 串聯 RC 電路圖，(c) 串聯 RL 電路圖

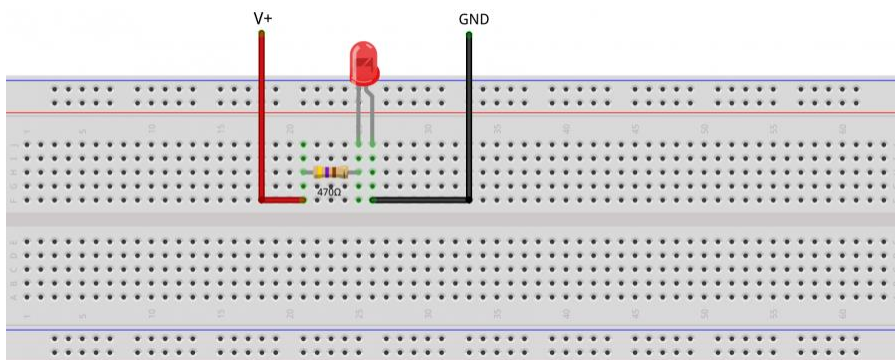


圖 8 LED 電路接線圖

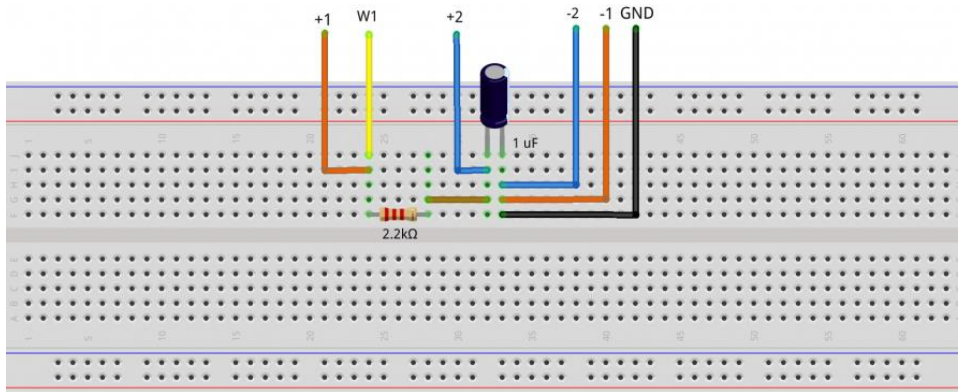


圖 9 RC 電路接線圖

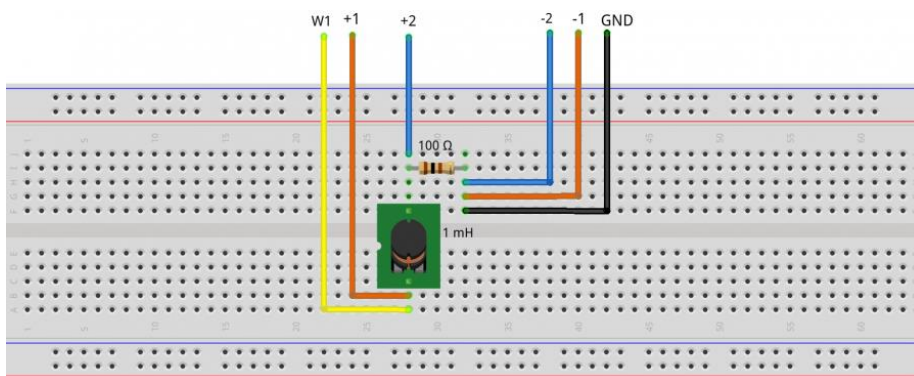


圖 10 RL 電路接線圖

四、材料

ADALM2000、麵包板、跳線、470Ω電阻 x1、LED 燈(紅、黃、綠三色選一)、2.2KΩ電阻 x1、1μF 電容 x1、10KΩ電阻 x1、0.01μF 電容 x1、100Ω電阻 x1 和 1mH 電感器 x1

五、步驟

5.1 LED 設計電路量測

啟動 Scopy 電壓表工具 voltmeter，界面如下。(M2K 使用手冊 voltmeter)

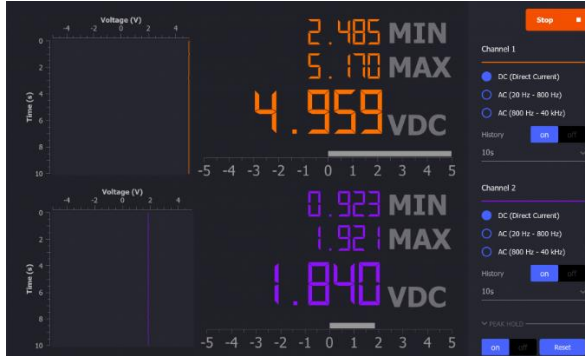


圖 11 電壓表供電操作與測量結果

1. 單擊綠色運行按鈕，將顯示電壓。通道 1 電壓應顯示 +5 V 電源的實際值。通道 2 電壓應顯示 LED 二極體兩端的實際電壓。將此時的 LED 測量電壓值記錄下來。比較紅光 LED 和綠光 LED 的測量電壓值差異。
2. 使用歐姆定律來計算電阻中的電流： $I = \frac{V}{R}$

5.2 RC 設計電路量測

(M2K 使用手冊 spectrum 與 signal generator)

在示波器 spectrum 的通道 1 上，可以看到輸入電壓，在通道 2 上可以看到電容器上的電壓。在信號產生器 signal generator (W1) 生成一個方波，振幅峰值為 4V。對於以下三種情況，觀察輸入與輸出波形：

- a. 脈衝寬度 $\gg 5\tau$ ：設置 W1 輸出的頻率，使電容器在方波的每個週期內有足夠的時間完全充電和放電。令脈衝寬度為 15τ 並根據等式 (2) 設置頻率。找到的值應該約為 15 Hz。根據屏幕上獲得的波形，找出時間常數 (提示：找出對應於 $0.63V_R$ 值的時間)。



圖 12 脈衝寬度 t_p 等於 15τ 的波形

- b. 脈衝寬度 $t_p = 5\tau$ ：設置頻率，使脈衝寬度 = 5τ (這應該約為 45 Hz)。由於脈衝寬度 t_p 為 5τ ，電容器應該能夠在每個脈衝週期內完全充電和放電。從圖中確定 τ (參見圖 13)

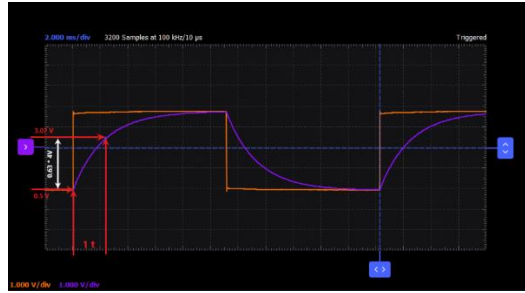


圖 13 脈衝寬度 t_p 等於 5τ 的波形

c. 脈衝寬度 $t_p \ll 5\tau$ ：在這種情況下，電容器在切換到放電之前沒有時間進行大量充電，反之亦然。在這種情況下，讓脈衝寬度 t_p 僅為 1τ ，並相應地設置頻率。觀察輸入與輸出的波形，跟 a 與 b 不同之處。

5.3 RL 設計電路量測

1. 在示波器 spectrum 的通道 1 上，可以看到輸入電壓，在通道 2 上可以看到電阻上的電壓（它與通過電感器的電流具有相同的形狀）。在在信號產生器 signal generator (W1) 生成一個方波，振幅峰值為 4V。頻率將根據 τ 設置。使用等式 (6) 計算 $t_p = 5\tau$ 的應用頻率。

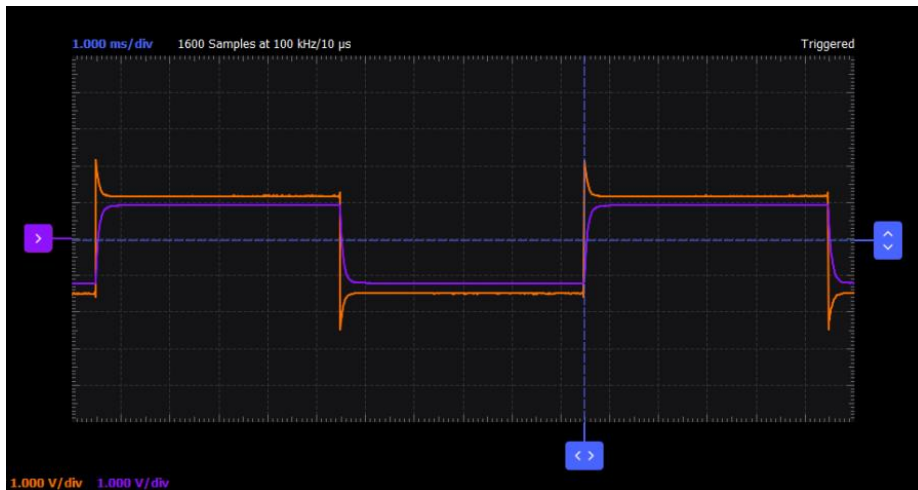


圖 14 脈衝寬度 t_p 等於 5τ 的波形

2. 在示波器 spectrum 的通道 2 上的波形（電阻器上的電壓）與 $I_L(t)$ 波形具有相同的形狀。從測量時間常數 τ 並與從 L/R_{total} 計算的時間常數進行比較。觀察電路的響應並再次記錄 $t_p = 25\tau$ 和 $t_p = 0.5\tau$ 的結果。

六、問題

1. LED 電路導通實驗中，加入電阻的優點與缺點，請指出至少兩點。
2. 電容器與電感器在充放電實驗中，相同與相異之處，請指出至少兩點。

教案二、RLC 諧振電路

一、目的

研究 RLC 電路中的諧振現象。使用對正弦源的振幅響應來確定諧振頻率和帶寬。

二、原理

諧振電路，也稱為調諧電路，由電感器和電容器以及電壓或電流源組成。它是電子產品中使用最重要的電路之一。例如，採用多種形式的諧振電路使我們能夠隨時從周圍的大量信號中調諧到所需的廣播或電視台。

當輸入端的電壓和電流同相並且輸入阻抗為純電阻時，處於諧振狀態。

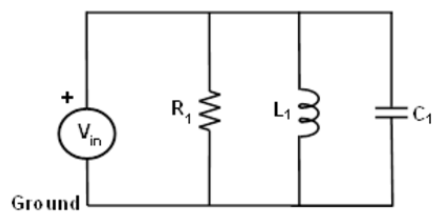


圖 1 並聯 RLC 電路

考慮圖 1 的並聯 RLC 電路。該電路提供的穩態導納為： $Y = \frac{1}{R} + j(\omega C - \frac{1}{\omega L})$

當輸入端的電壓和電流同相時，就會發生諧振。這對應於純實導納，因此必要

條件由下式給出： $\omega C - \frac{1}{\omega L} = 0$

諧振條件可以通過調整 L、C 或 ω 來實現。保持 L 和 C 不變，諧振頻率 ω 由下式給出：

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ rad/s (1)}$$

$$\text{或者 } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ Hz (2)}$$

頻率響應：它是諧振電路輸出電壓幅值隨頻率變化的曲線圖。響應當然從零開始，在自然諧振頻率附近達到最大值，然後隨著 ω 變為無窮大再次下降到零。頻率響應如圖 2 所示。

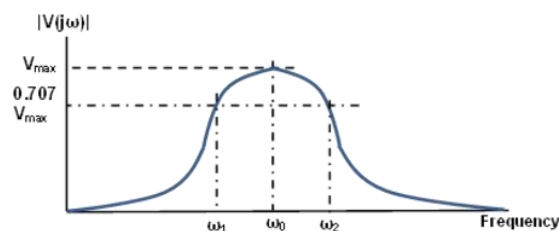


圖 2 並聯 RLC 電路的頻率響應

還指示了兩個附加頻率 ω_1 和 ω_2 ，它們被稱為半功率頻率。這些頻率位於曲線上電壓響應為 $1/\sqrt{2}$ 或最大值的 0.707 倍的那些點。它們用於測量響應曲線的帶寬。這稱為諧振電路的半功率帶寬，定義為： $B = \omega_2 - \omega_1$ (3)

三、材料

ADALM2000 主動學習模塊、麵包板和跳線、 100Ω 電阻器 x1、 $1k\Omega$ 電阻器 x1、 $1\mu\text{F}$ 電容器 x1、 20mH 電感器 x1 (2 個 10mH 電感器串聯)

四、電路圖

在無焊麵包板上設置圖 4 所示的電路。

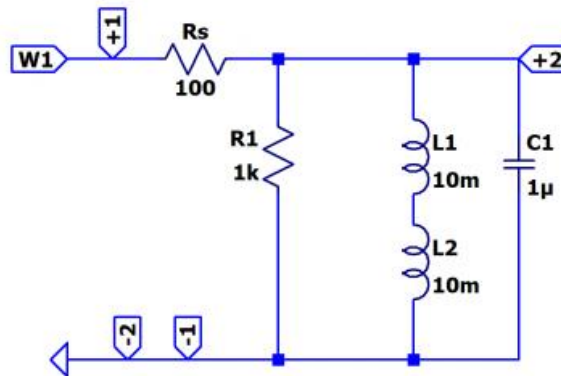


圖 3 並聯諧振電路

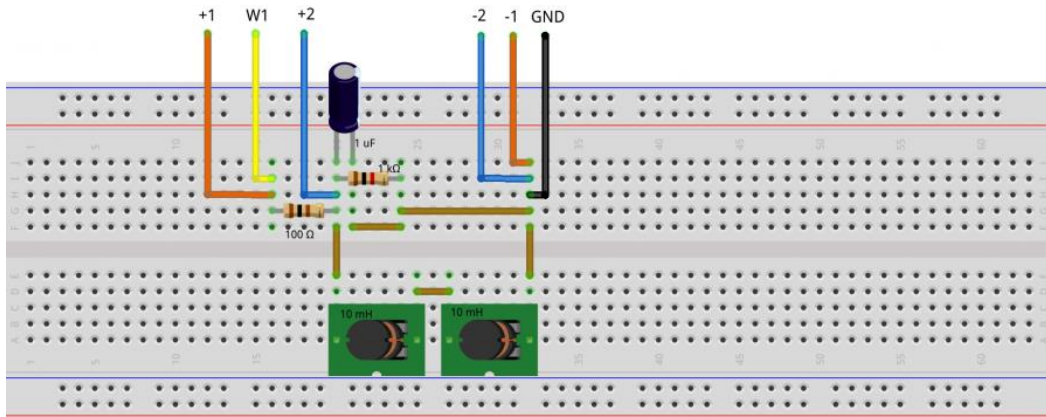


圖 4 並聯 RLC 電路接線圖

五、程序

(M2K 使用手冊 network)

5.1 使用網絡分析器工具，您可以繪製諧振電路的頻率響應。首先使用等式 (1) 計算共振頻率。據此設置對數掃描參數。在這種情況下，共振頻率為 1.1kHz，因此掃描可以從 100Hz 開始到 10kHz。將最小相位設置為 -90° ，將最大相位設置為 90° 。幅度軸可設置為 -15 dB 至 0 dB 。圖 5 顯示了通過運行網絡分析儀獲得的 RLC 電路的傳遞函數。

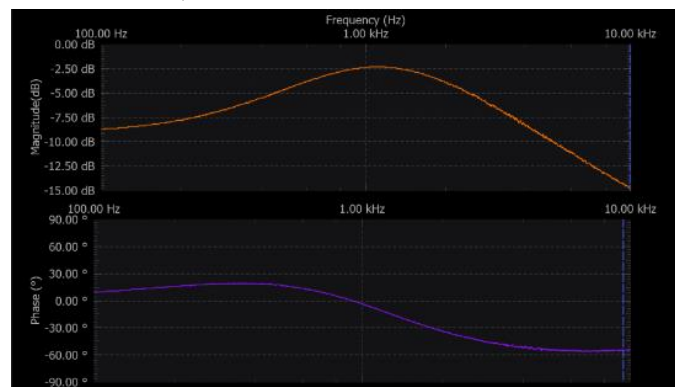


圖 5 並聯 RLC 電路的頻率響應

5.2 可以使用信號發生器和示波器工具分析時域中的電路響應。在信號發生器通道 1 上，選擇 2 伏振幅峰值的正弦波。將頻率設置為等於共振頻率。在示波器通道 1 上，您將在通道 2 上看到輸入信號和輸出信號。在圖 6 中觀察輸出信號如何與輸入信號幾乎同相。

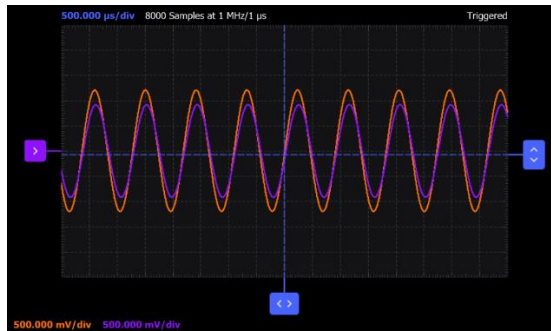


圖 6 頻率等於 1.1 kHz 時 RLC 電路的輸入和輸出信號

5.3 選擇另外兩個頻率值，例如掃描間隔結束時的值，並查看這些電路如何響應。

教案三、PN 二極體與整流器

一、目的

1. 研究 PN 二極體的電流與電壓特性。
2. 研究二極體作為半波整流器。
3. 研究使用兩個二極體作為全波整流器。
4. 研究使用四個二極體作為橋式整流器。

二、材料

ADALM2000 主動學習模組、麵包板、跳線數條、 $1\text{ K}\Omega$ 電阻器(R_1)x1、 $4.7\text{ K}\Omega$ 電阻器(R_L)x1、小信號二極體 (1N914 或類似的) x4

三、程序

(M2K 使用手冊 spectrum、signal generator)

3.1 PN 二極體

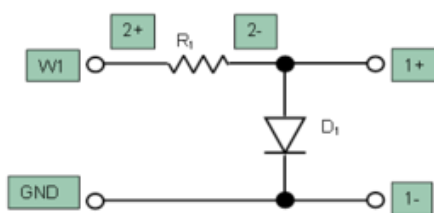


圖 1 二極體 I/V 曲線的電路圖($R_1 = 1\text{ K}\Omega$)

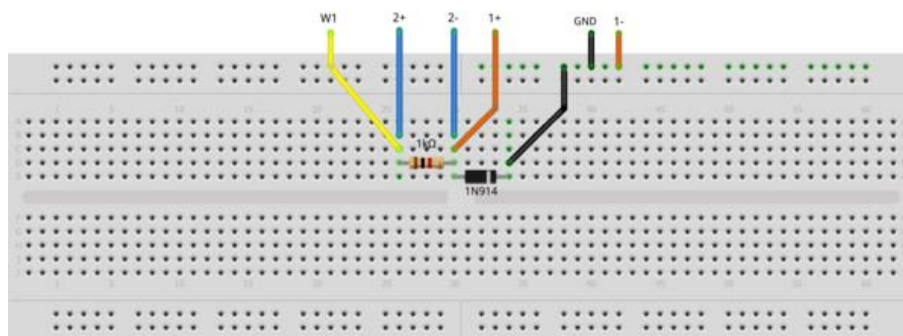


圖 2 測量二極體 I/V 曲線的電路接線圖

1. 以電腦上 Scopy 軟體介面，設定波形產生器產生振幅 6 V 和偏移 0 V 的 100 Hz 三角波，透過 W1 送出訊號，電路圖與電路接線圖如圖 1 與圖 2。
2. 以 M2K 的示波器 channel 2 (2+, 2-)接腳，連結與測量電阻器的電流。以 M2K 的示波器 channel 1 (1+, 1-)接腳，連結與測量二極體兩端的電壓。電路圖與電路接線圖如圖 1 與圖 2。(提示：電阻器與二極體串聯，電流相同。)

3. 以電腦上 Scopy 軟體介面中，設置示波器 channel 1 的『Volts/Div』為 500 mV，channel 2 的『Volts/Div』也是 500 mV。
4. 以電腦上 Scopy 軟體介面，使用 XY 顯示模式繪圖，其中 X 軸是示波器 channel 1 測量到的二極體兩端電壓，而 Y 軸是示波器 channel 2 測量到二極體的電流，如圖 3。注意：二極體的電流 I_D 為示波器 channel 2 測得的電壓除以電阻值。將電壓與電流的數據匯出至 excel 做圖，如圖 4。



圖 3 以 Scopy 作圖，得出電流與電壓的特性曲線圖

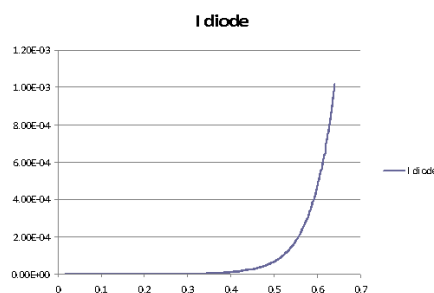


圖 4 以匯出資料用 Excel 做圖，得出電流與電壓的特性曲線圖

5. 將圖 4 二極體的電流與電壓關係改成對數關係。當以對數 \ln 繪製時，對數電流與電壓的關係應為直線，如圖 5 所示。(提示： $I_D = I_S e^{V_D/V_T}$ ，取對數後， $\ln I_D = \ln I_S + \frac{V_D}{V_T}$)

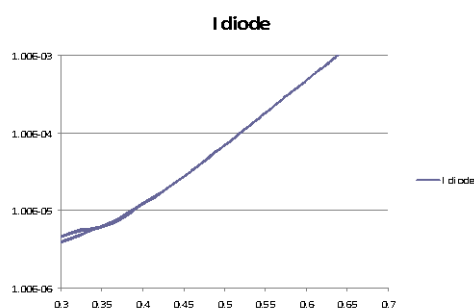


圖 5 將圖 4 改以對數繪製時，對數電流與電壓的關係應為直線

3.2 半波整流器

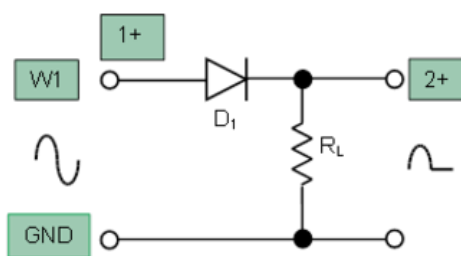


圖 6 半波二極體整流器的電路圖

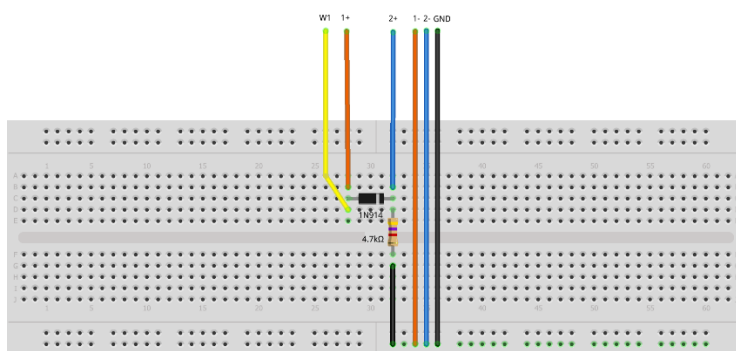


圖 7 半波二極體整流器的電路接線圖

1. 以電腦上 Scopy 軟體介面，設定波形產生器產生振幅 6 V 和偏移 0 V 的 100 Hz 正弦波，透過 W1 送出訊號，電路圖與電路接線圖如圖 6 與圖 7。
2. 以 M2K 的示波器 channel 2 (2+, 2-) 接腳，連結與測量負載電阻 R_L 兩端的電壓。以 M2K 的示波器 channel 1 (1+, 1-) 接腳，連結與測量訊號產生器 W1 送出的電壓。電路圖與電路接線圖如圖 6 與圖 7。
3. 以電腦上 Scopy 軟體介面中，設置示波器 channel 1 的『Volts/Div』為 500 mV，channel 2 的『Volts/Div』也是 500 mV。
4. 以電腦上 Scopy 軟體介面的示波器功能，同時顯示 channel 1 與 channel 2 的波形，如圖 8。

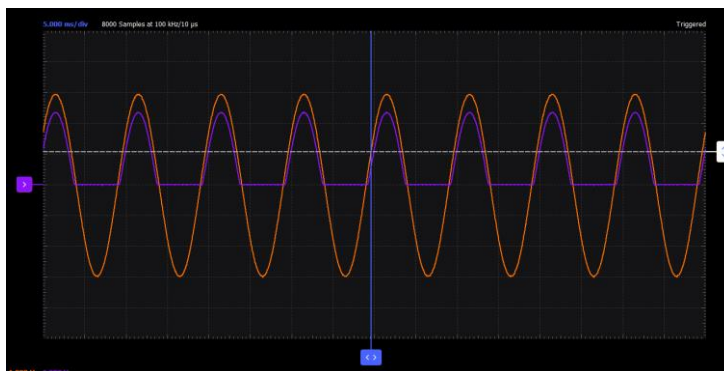


圖 8 半波二極體整流器的輸入與輸出信號波形

問題 1: 為什麼整流輸出的峰值小於交流輸入的峰值，小了多少？

問題 2: 如果二極體的方向相反，整流輸出會發生什麼？

3.3 全波整流器

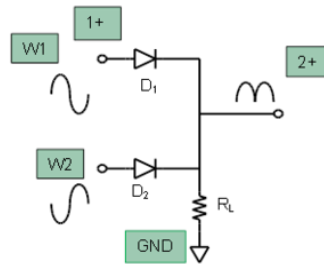


圖 9 全波二極體整流器的電路圖

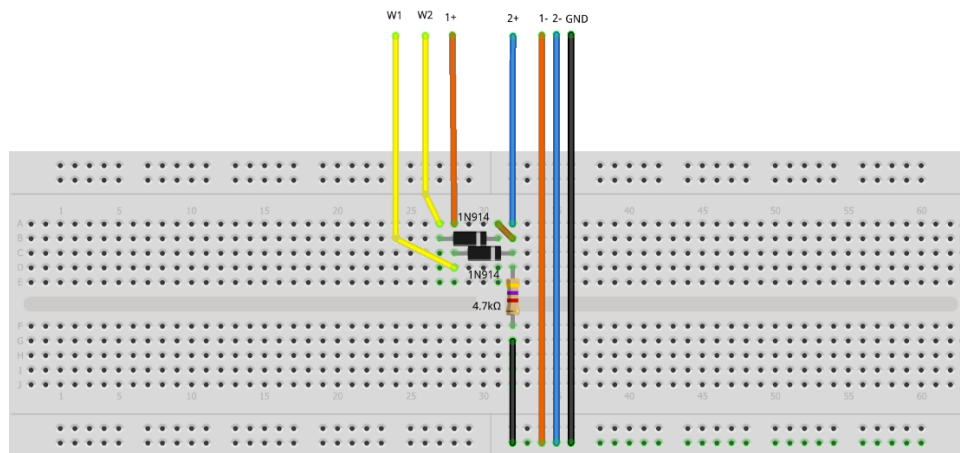


圖 10 全波二極體整流器的電路接線圖

1. 以電腦上 Scopy 軟體介面，設定波形產生器產生振幅 6 V 和偏移 0 V 的 100 Hz 正弦波，透過 W1 送出訊號。再設定一個與 W1 相位差 180 度的正弦波，透過 W2 送出訊號。電路圖與電路接線圖如圖 9 與圖 10。
2. 以 M2K 的示波器 channel 2 (2+, 2-)接腳，連結與測量負載電阻 R_L 兩端的電壓。以 M2K 的示波器 channel 1 (1+, 1-)接腳，連結與測量訊號產生器 W1 送出的電壓。電路圖與電路接線圖如圖 9 與圖 10。
3. 以電腦上 Scopy 軟體介面的示波器功能，同時顯示 channel 1 與 channel 2 的波形。如果 W1 和 W2 同時輸入，則 D2 二極體輸出的半波可以填充 D1 二極體輸出缺失的半波，並產生圖 11 所示的全波整流信號。

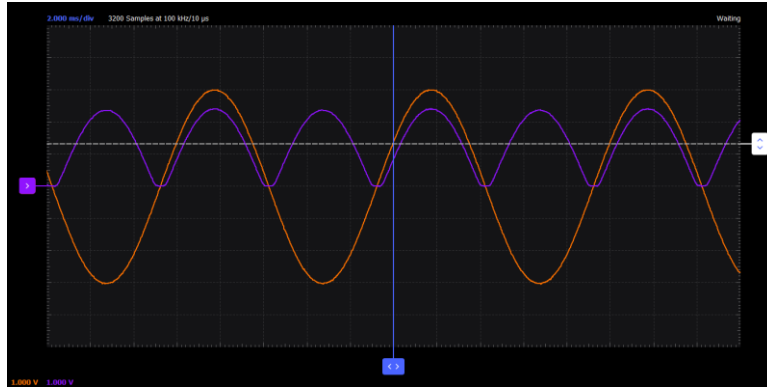


圖 11 全波二極體整流器的輸入與輸出信號波形

- 問題 1: 如果兩個二極體的方向同時相反，整流輸出會發生什麼？
 問題 2: 如果 D2 二極體的方向相反，整流輸出會發生什麼？

3.4 整流橋

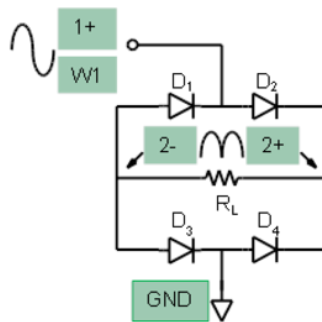


圖 12 二極體橋式整流器的電路圖

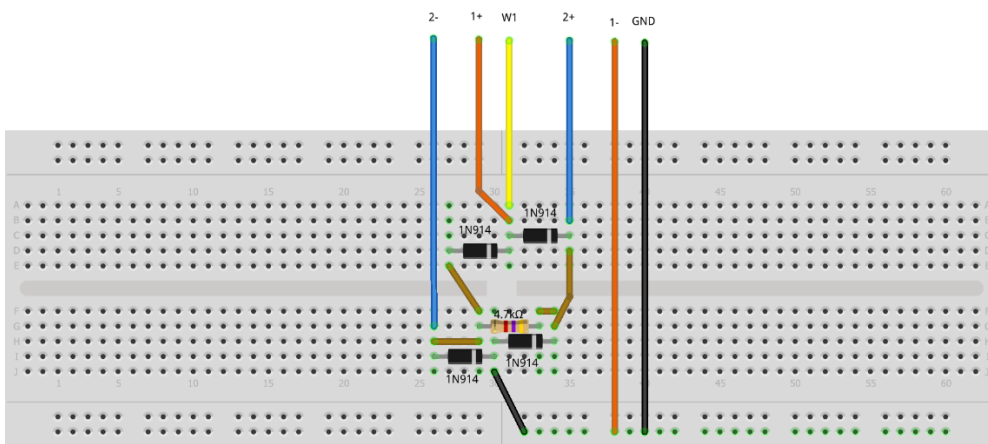


圖 13 二極體橋式整流器的電路連接圖

1. 以電腦上 Scopy 軟體介面，設定波形產生器產生振幅 6 V 和偏移 0 V 的

- 100 Hz 正弦波，透過 W1 送出訊號。電路圖與電路接線圖如圖 12 與圖 13。
2. 以 M2K 的示波器 channel 2 (2+, 2-) 接腳，連結與測量負載電阻 R_L 兩端的電壓。以 M2K 的示波器 channel 1 (1+, 1-) 接腳，連結與測量訊號產生器 W1 送出的電壓。電路圖與電路接線圖如圖 12 與圖 13。
 3. 以電腦上 Scopy 軟體介面的示波器功能，同時顯示 channel 1 與 channel 2 的波形。此電路的缺點是輸入訊號經過兩個二極體產生電壓降再與負載串聯，讓整流输出的峰值比交流輸入低 1.4 伏特，而不是像之前 3.3 全波電路中的 0.7 伏特。

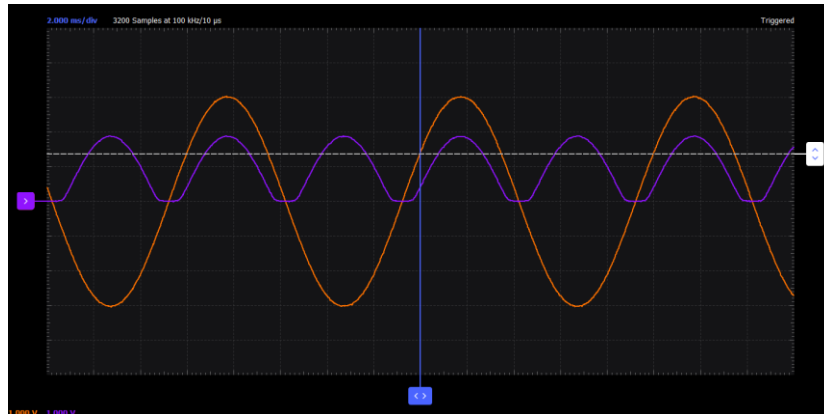


圖 14 全波橋式整流器的輸入與輸出信號波形

教案四、讓 BJT 電晶體做成二極體

一、目的

1. 讓 BJT 電晶體做成二極體，量測此時的電流與電壓特性。
2. 讓 BJT 電晶體做成二極體，量測此時的射極基極(EB)反向擊穿電壓特性。
3. 讓 BJT 電晶體做成二極體，找出更小的正向偏壓電路配置。

二、材料

ADALM2000 主動學習模組、麵包板、跳線數條、1 K Ω 電阻器 x1、150 K Ω 電阻 (或 100 K Ω 與 47 K Ω 串聯) x1、小信號 NPN-BJT 電晶體 (2N3904) x1、100 Ω 電阻 x1、小信號 PNP-BJT 電晶體(2N3906) x1、100 Ω 電阻 x1、ZVN2110A N-MOS 電晶體 x1、ZVP2110A P-MOS 電晶體 x1

三、程序

(M2K 使用手冊 spectrum、signal generator、power supply)

3.1 讓 BJT 電晶體做成二極體

1. 如圖 1 電路圖與圖 2 電路接線圖所示，完成接線。

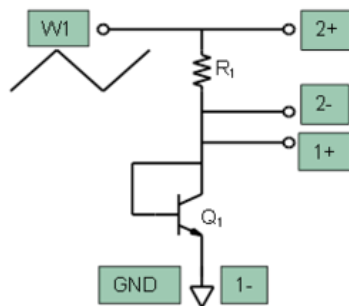


圖 1 NPN 二極體電路圖

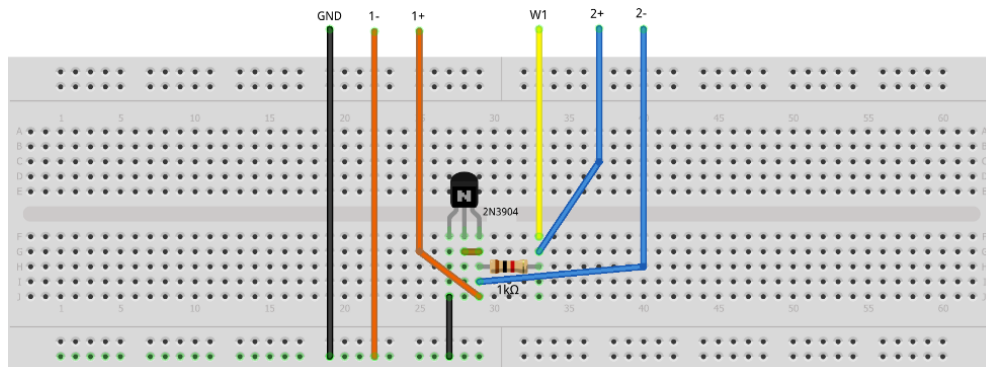


圖 2 NPN 二極體電路接線圖

2. 以電腦上 Scopy 軟體介面，設定波形產生器產生振幅 6 V 和偏移 0 V 的 100 Hz 三角波，透過 W1 送出訊號。
3. 以 M2K 的示波器 channel 2 (2+, 2-) 接腳，連結與測量電阻器的電壓。M2K 的示波器 channel 1 (1+, 1-) 接腳，連結與測量電晶體兩端的電壓。示波器顯示如圖 3。注意，流經電晶體的電流等於 channel 2 電壓除以電阻值 (1 K Ω)。
4. 以電腦上 Scopy 軟體介面，使用 XY 顯示模式繪圖，其中 X 軸是示波器 channel 1 測量到的電晶體兩端電壓，而 Y 軸是示波器 channel 2 測量到電晶體的電流，如圖 4。
5. 將電壓與電流的數據匯出至 excel 繪製電流 (I_D) 與電晶體兩端電壓 (V_{BE}) 的關係圖和對數電流與電壓的關係圖。是否與實驗六的二極體電流與電壓關係對數圖相同？

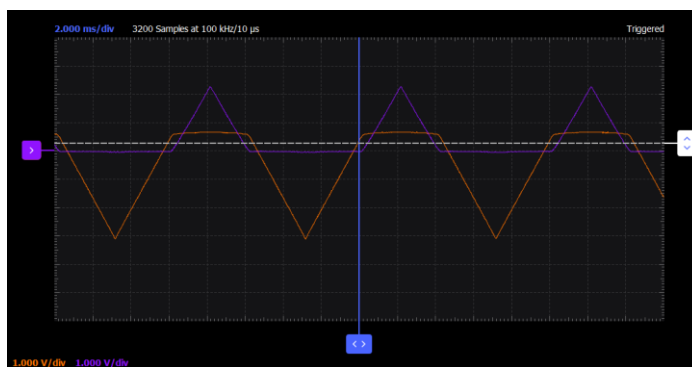


圖 3 NPN-BJT 作為二極體時，channel1 與 channel2 的輸出信號波形

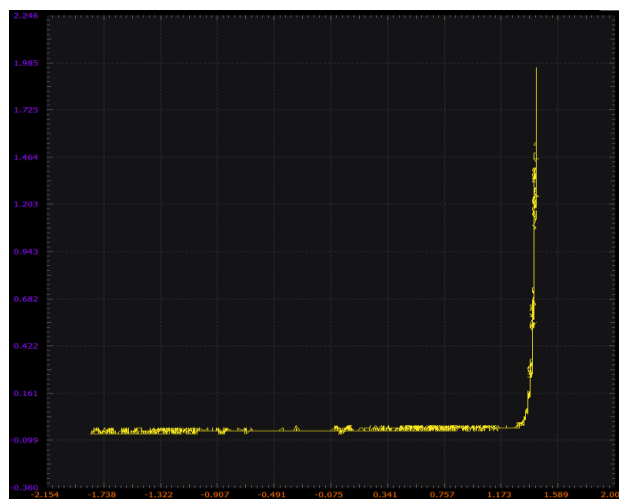


圖 4 NPN-BJT 作為二極體時，電流與電壓的特性曲線圖

3.2 反向擊穿特性(Reverse Breakdown Characteristics)

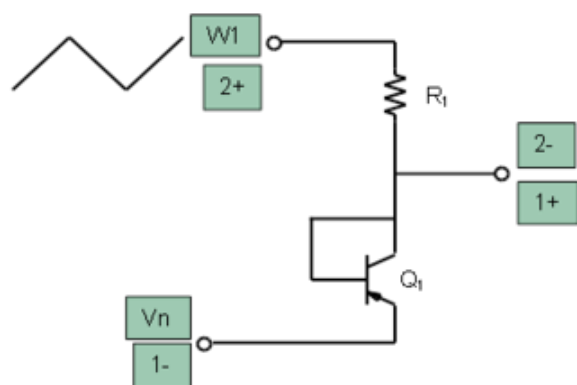


圖 5 PNP-BJT 射極基極反向擊穿電路圖

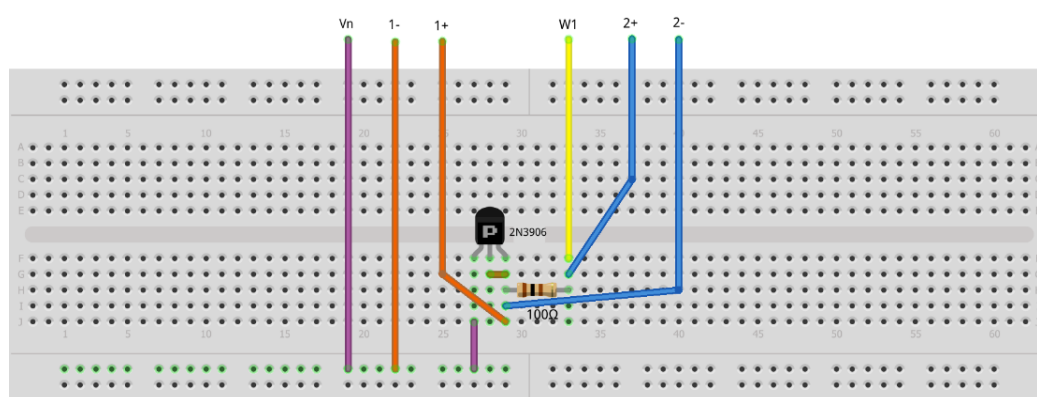


圖 6 PNP-BJT 射極基極反向擊穿電路接線圖

1. 如圖 5 電路圖與圖 6 電路接線圖所示，完成接線。
2. 以電腦上 Scopy 軟體介面，設定波形產生器產生振幅 10 V 和偏移 0 V 的 100 Hz 三角波，透過 W1 送出訊號。設定電源供應器為 -5 V，透過 Vn 送出訊號。
3. 示波器 channel 1 用於測量電晶體兩端的電壓。而 channel 2 測量 R_1 兩端的電壓差，除以電阻值 (100Ω) 從而測量流過 Q_1 的電流。設置示波器 channel 1 和 channel 2 的『Volts/Div』為 1 V。如圖 7。
4. 找出射極基極的擊穿電壓值。(每個電晶體略有不同)

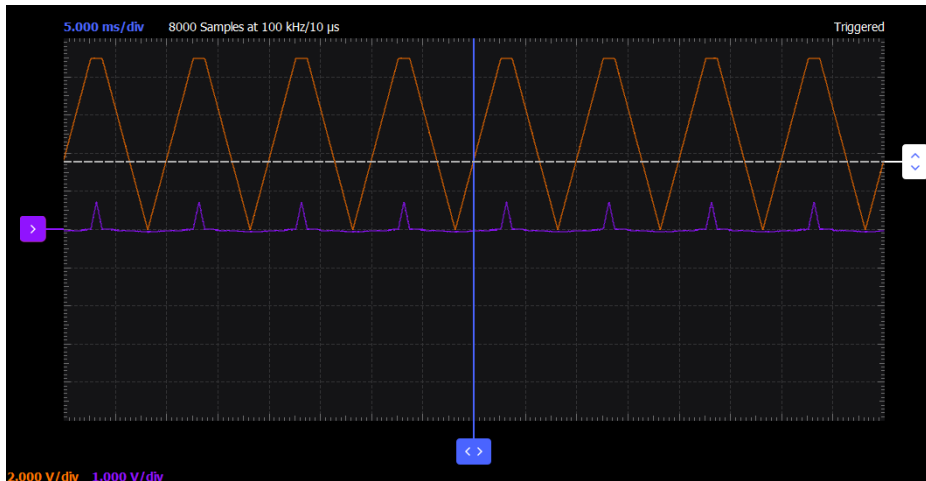


圖 7 PNP-BJT 射極輸出信號波形

問題 1: 斷開 Q1 的集極並將其保持開路，此時擊穿電壓為何？若將集極與射極連結，此時擊穿電壓為何？

3.3 降低二極體的有效正向電壓

1. 如圖 8 電路圖與圖 9 電路接線圖所示，完成接線。

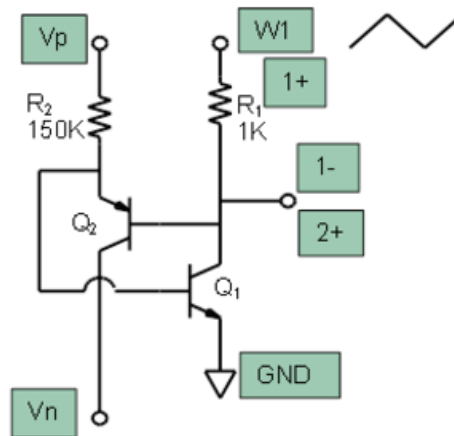


圖 8 降低二極體有效正向電壓的電路圖

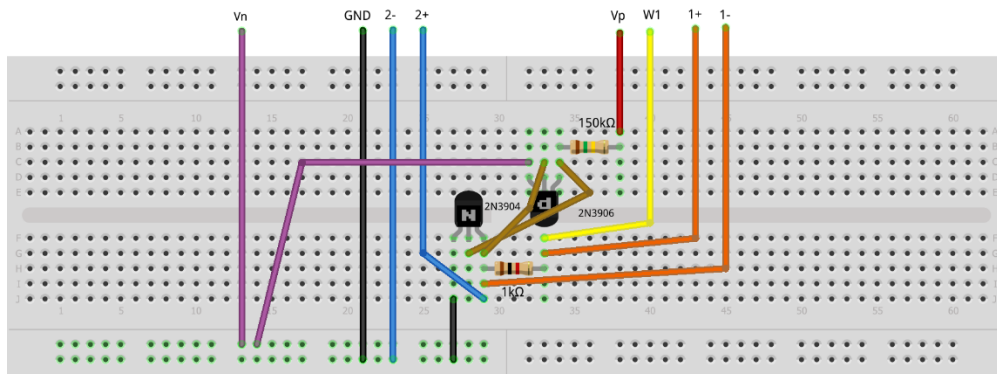


圖 9 降低二極體有效正向電壓的電路接線圖

2. 以電腦上 Scopy 軟體介面，設定波形產生器產生振幅 8 V 和偏移 2 V 的 100 Hz 三角波，透過 W1 送出訊號。分別設定電源供應器為+5 V 與-5 V，透過 Vp 與 Vn 送出訊號。
3. 示波器 channel 2 用於測量電晶體兩端的電壓。流過電晶體的電流約是 channel 1 測量到的電壓除以電阻值 (1 K Ω)。
4. 比較 3.1 與 3.3 的示波器輸出信號波形，3.1 的導通電壓約為 650 mV，而 3.3 約為 100 mV。如圖 10。

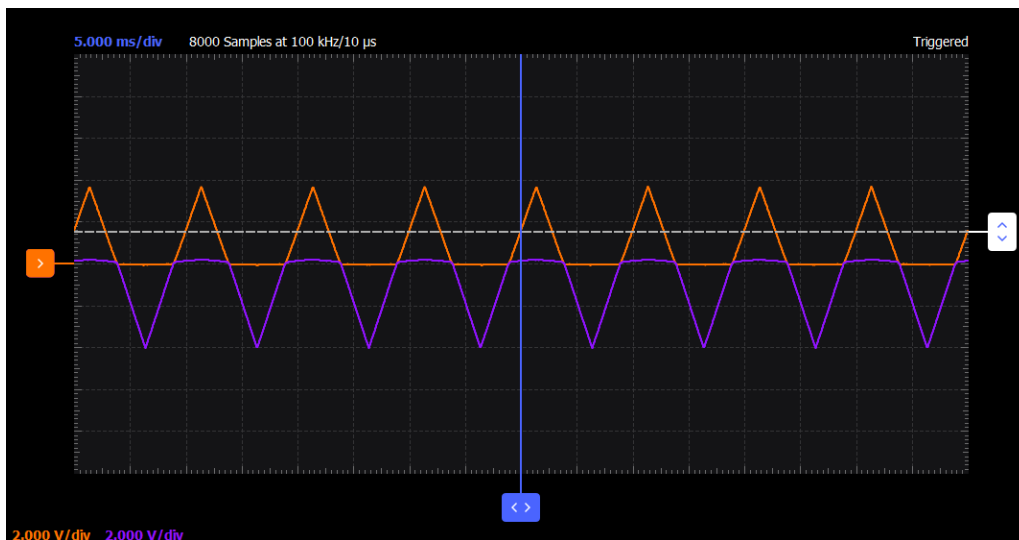


圖 10 較低的二極體有效正向電壓的輸出信號波形

問題 1：Q2 的集極是否可以連接到其他節點，例如接地？輸出會有什麼效果？

教案五、MOS 電晶體做成二極體

一、目的

- 讓 MOS 電晶體做成二極體，量測此時的電流與電壓特性。

二、材料

ADALM2000 主動學習模組、麵包板、跳線數條、1 K Ω 電阻器 x1、150 K Ω 電阻（或 100 K Ω 與 47 K Ω 串聯）x1、小信號 NPN-BJT 電晶體（2N3904）x1、100 Ω 電阻 x1、小信號 PNP-BJT 電晶體(2N3906) x1、100 Ω 電阻 x1、ZVN2110A N-MOS 電晶體 x1、ZVP2110A P-MOS 電晶體 x1

三、程序

(M2K 使用手冊 spectrum、signal generator、power supply)

3.1 將 NMOS 連接為二極體

- 如圖 1 電路圖與圖 2 電路接線圖所示，完成接線。

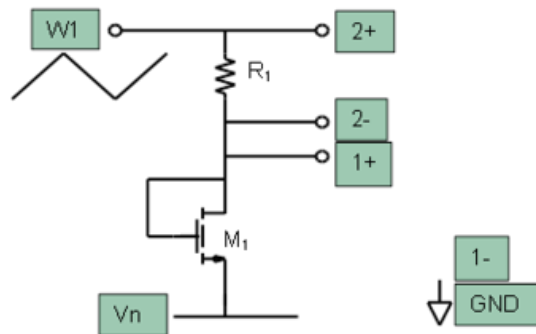


圖 1 NMOS 作為二極體的電路圖

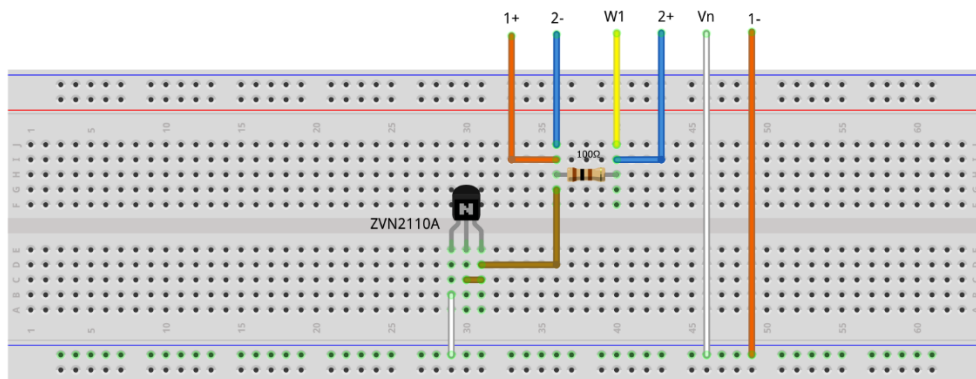


圖 2 NMOS 作為二極體的電路接線圖

2. 以電腦上 Scopy 軟體介面，設定波形產生器產生振幅 10 V 和偏移 0 V 的 100 Hz 三角波，透過 W1 送出訊號。設定電源供應器為 -5 V，透過 Vn 送出訊號。
3. 以 M2K 的示波器 channel 2 (2+, 2-) 接腳，連結與測量電阻器的電壓。M2K 的示波器 channel 1 (1+, 1-) 接腳，連結與測量電晶體兩端的電壓。流經電晶體的電流等於 channel 2 電壓除以電阻值 (100 Ω)。
4. 以電腦上 Scopy 軟體介面，使用 XY 顯示模式繪圖，其中 X 軸是示波器 channel 1 測量到的電晶體兩端電壓，而 Y 軸是示波器 channel 2 測量到電晶體的電流。
5. 將電壓與電流的數據匯出至 excel，計算並繪製電流 (I_D) 與電晶體兩端電壓 (V_{GS}) 的關係。在正向導通區域，電壓、電流關係應呈二次方關係，如圖 3。
6. 計算並繪製電流 (I_D) 與電晶體兩端電壓 (V_{GS}) 的平方根，應為線性關係。找到 V_{th} 和 k 的值。註： $I_D = k(V_{GS} - V_{th})^2$ 。

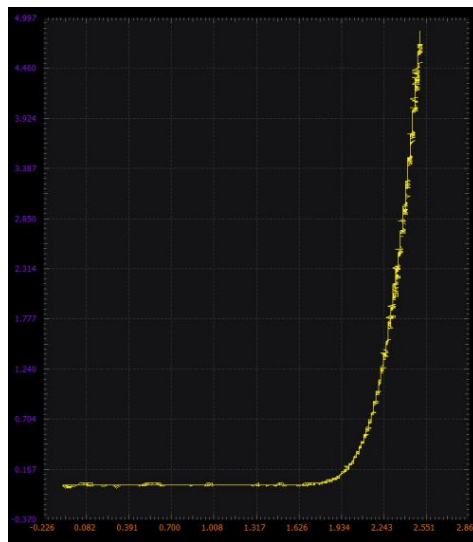


圖 3 NMOS 二極體電流與電壓的特性曲線圖

3.2 將 PMOS 連接為二極體

1. 使用 PMOS 重複實驗 3.1，完成連結。

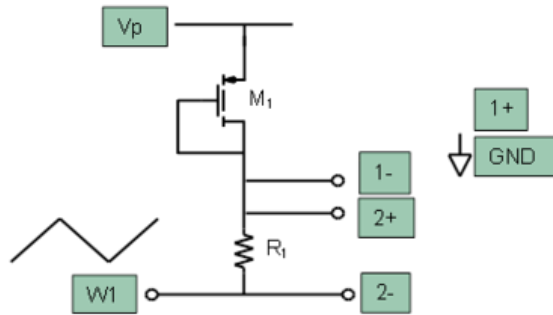


圖 4 PMOS 二極體的電路圖

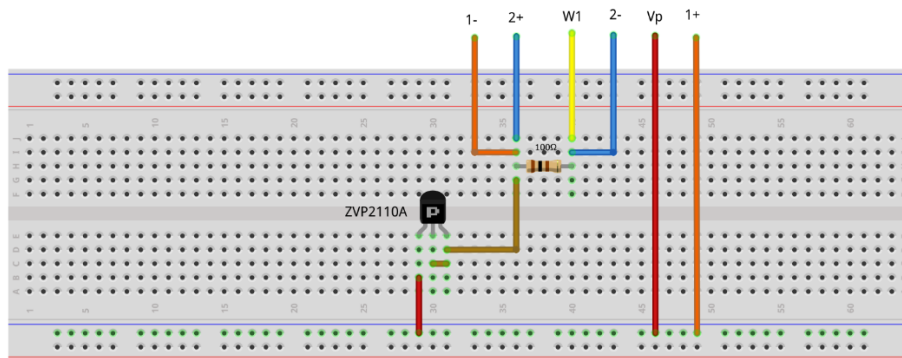


圖 5 PMOS 二極體的電路接線圖

2. 以電腦上 Scopy 軟體介面，設定波形產生器產生振幅 10 V 和偏移 0 V 的 100 Hz 三角波，透過 W1 送出訊號。設定電源供應器為 5 V，透過 Vp 送出訊號。
3. 以 M2K 的示波器 channel 2 (2+, 2-) 接腳，連結與測量電阻器的電壓。M2K 的示波器 channel 1 (1+, 1-) 接腳，連結與測量電晶體兩端的電壓。流經電晶體的電流等於 channel 2 電壓除以電阻值 (100 Ω)。
4. 以電腦上 Scopy 軟體介面，使用 XY 顯示模式繪圖，其中 X 軸是示波器 channel 1 測量到的電晶體兩端電壓，而 Y 軸是示波器 channel 2 測量到電晶體的電流。
5. 將電壓與電流的數據匯出至 excel，計算並繪製電流 (I_D) 與電晶體兩端電壓 (V_{SG}) 的關係。在正向導通區域，電壓、電流關係應呈二次方關係，如圖 6。
6. 計算並繪製電流 (I_D) 與電晶體兩端電壓 (V_{SG}) 的平方根，應為線性關係。找到 V_{th} 和 k 的值。註： $I_D = k(V_{SG} - V_{th})^2$ 。

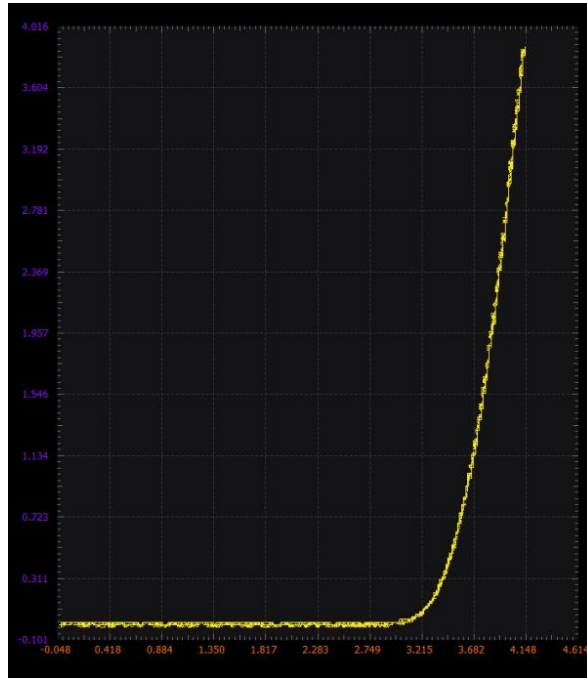


圖 6 PMOS 二極體電流與電壓的特性曲線圖

資料來源:

ANALOG DEVICES wiki

https://wiki.analog.com/university/courses/alm1k/alm_circuits_lab_outline

M2K 使用手冊

<https://reurl.cc/ZX6vVW>