

# **Biannual Progress Report**

研究生:黃梅鳳

指導老師:張博宇 博士

中華民國 一百零五年九月

## 摘要

Linear transformer driver (LTD)在 pulse-power 的應用上有非常卓越的表現，主要是利用緊密堆積型感應加速器的能量儲存和交換，以達到在極短的持續時間內(約 100-300 ns)產生高峰值的功率脈衝[1][3]。LTD 主要的概念是電感型產生器，類似於 Linear induction accelerator(LIA)、Inductive voltage adder(IVA)和 Linear pulsed transformer(LPT)。

Linear transformer driver 主要是由電容、開關、鐵磁芯組合而成。內部是由多個 brick 組合而成，每一個 brick 內部則是分別由兩個電容並和一個導通開關(open switch)串聯而成。由於 LTD 被設計運用在極短時間內能輸出高功率脈衝，又因為 LTD 輸出的高功率脈衝電流是藉由每一個 brick 輸出的電流疊加而成，因此在每一個 brick 內部的 switch 的導通速度必須要足夠快，才能使得 LTD 在極短時間內輸出高脈衝電流。

此次的 Biannual progress report 還會提到 J.R.Woodworth 的團隊 [2]比較了四種不同開關的工作結果。另外還會討論觸發開關的驅動電路，分別利用 BJT 和 IGBT 的實驗結果[4][5]。

## Abstract

The linear transformer driver (LTD) is a developing pulsed-power technology which shows promising for applications that require high-power, high-voltage, high current, and short output pulses (~100 ns). The LTD driver is an induction generator similar to the linear induction accelerator (LIA), the inductive voltage adder (IVA), and the linear pulsed transformer (LPT).

Linear transformer driver consists of capacitors, switches and magnetic cores. It is composed by many bricks. Each brick has two capacitors and one switch connected in series. In order to generate high power and high current using LTD, switches have stringent demand on breakdown in very short time.

J.R.Woodworth's team has introduced behaviors of four different switches and will be discussed here. At the end, we will further introduce using BJT and IGBT to trigger switches.

## 目錄

|  |    |
|--|----|
| 摘要.....  | 1  |
| Abstract.....  | 2  |
| 圖目錄.....   | 4  |
| 表目錄.....   | 5  |
| 第一章 緒論.....  | 6  |
| 第二章 元件介紹.....  | 8  |
| 2-1 linear transformer driver stages(LTD)構造.....                                     | 8  |
| 2-2 不同開關之特性比較.....   | 12 |
| 2-2-1 HCEI 開關.....   | 13 |
| 2-2-2 Sandia 開關.....   | 14 |
| 2-2-3 Kinetic 開關.....  | 15 |
| 2-2-4 L3 開關.....   | 17 |
| 2-3 觸發脈衝元件.....  | 18 |
| 2-3-1 雙載子接面電晶體(bipolar junction transistor, BJT).....                                | 18 |
| 2-3-2 金屬氧化物半導體場效電晶體 (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET)..... | 21 |
| 2-3-3 絕緣柵雙極電晶體 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT).....                        | 24 |
| 第三章 結果與討論.....   | 27 |
| 3-1 開關.....  | 27 |
| 3-2 IGBT.....  | 28 |
| 第四章 未來進度.....  | 30 |
| 4-1 短期目標.....  | 30 |
| 4-2 長期目標.....  | 30 |
| 第五章 總結.....  | 31 |
| 參考文獻.....  | 32 |

## 圖目錄

|   |              |
|---|--------------|
| 圖1-1-1 LTD 示意圖.....                               | 6            |
| 圖 1-2-1 pulsed-power system 設計之電路圖.....           | 7            |
| 圖2-1 專有名詞解釋.....                                  | 8            |
| 圖2-1-1 LTD 內部單一brick 結構的剖面圖.....                  | 9            |
| 圖2-1-2 LTD 內部 20 個 bricks 結構俯視圖.....              | 11           |
| 圖2-1-3 LTD 結構等效電路圖.....                           | 11           |
| 圖 2-2-1 四種開關.....                                 | 12           |
| 圖 2-2-1-1 HCEI 開關生命週期測試.....                      | 13           |
| 圖 2-2-2-1 Sandia 開關細節結構.....                      | 14           |
| 圖 2-2-2-2 Sandia 開關生命週期測試.....                    | 14           |
| 圖 2-2-3-1 Kinetic 開關內部細節.....                     | 15           |
| 圖 2-2-3-2 Kinetic 開關生命週期測試.....                   | 16           |
| 圖 2-2-4-1 L3 開關內部細節結構.....                        | 17           |
| 圖 2-2-4-2 L3 開關生命週期測試.....                        | 錯誤! 尚未定義書籤。7 |
| 圖 2-3-1-1 N 型和 P 型電晶體.....                        | 200          |
| 圖 2-3-1-2 電晶體的三個工作模式.....                         | 200          |
| 圖 2-3-1-3 NPN 型電晶體電流電壓關係圖.....                    | 錯誤! 尚未定義書籤。0 |
| 圖 2-3-2-1 N 型和 P 型 MOSFET.....                    | 233          |
| 圖 2-3-2-2 N 型 MOSFET 結構圖.....                     | 233          |
| 圖 2-3-2-3 MOSFET 的三個工作型態.....                     | 233          |
| 圖 2-3-3-1 IGBT 結構圖, 左邊為 NPT-IGBT 右邊為 PT-IGBT..... | 266          |
| 圖 2-3-3-2 IGBT 等效電路圖.....                         | 266          |
| 圖 2-3-3-3 IGBT 的工作特性.....                         | 266          |
| 圖 3-1-1 開關設計.....                                 | 277          |
| 圖 3-2-1 電路模擬.....                                 | 28           |
| 圖 3-2-2 電路模擬.....                                 | 29           |

## 表目錄

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 表 2-2-1 四種開關之物理參數 ..... | 12 |
|-------------------------|----|



## 第一章 緒論

在當今高度文明的社會，首當其衝的問題即是能源的開發，各國都不斷致力於發展新的技術來解決能源不足的問題。目前約有 80% 的已開發國家，其能源都是由化石燃料而來，造成相當程度的環境破壞問題。再者，化石燃料的來源並不是源源不斷的，表示我們對這些化石燃料的需求將受到嚴重的限制。而面對日趨爆炸成長的人口數量，要維持現況或是更高的生活需求，能源的消耗必定是更高的，因此在能源的永續發展是非常需要被正視的。

如核融合方面的研究，脈衝功率系統(pulsed-power system)能運用在能源的開發上，因此近年來，有團隊發展出一種新的脈衝功率系統技術稱為 Linear transformer driver(LTD)，此系統的詳細細節將在後續章節解釋。



圖1-1-1 多個單元(brick)並聯而成的 LTD 系統，每一個 brick 則由兩個電容和一個開關串聯而成。

本實驗室預計使用 LTD 產生所需要的電流來驅動 x-pinch。使用一般 pulsed-power system 驅動 x-pinch 的概念如圖 1-2-1 所示，左邊綠色框線內能量儲存區塊(Energy Bank)，是藉由多個電容並聯而成，與 x-pinch 之間串聯一個開關(switch)。在電容兩端先用高壓電源供應器(high voltage power supply)輸入 $\pm 100\text{KV}$  的電壓來充電，待其電容充飽後，能量暫時儲存在電容內部。藉由快速關閉開關將儲存在電容內部的能量瞬間傳遞到 x-pinch。這邊的開關將使用能夠在 ns 等級下迅速關起導通的元件為主。

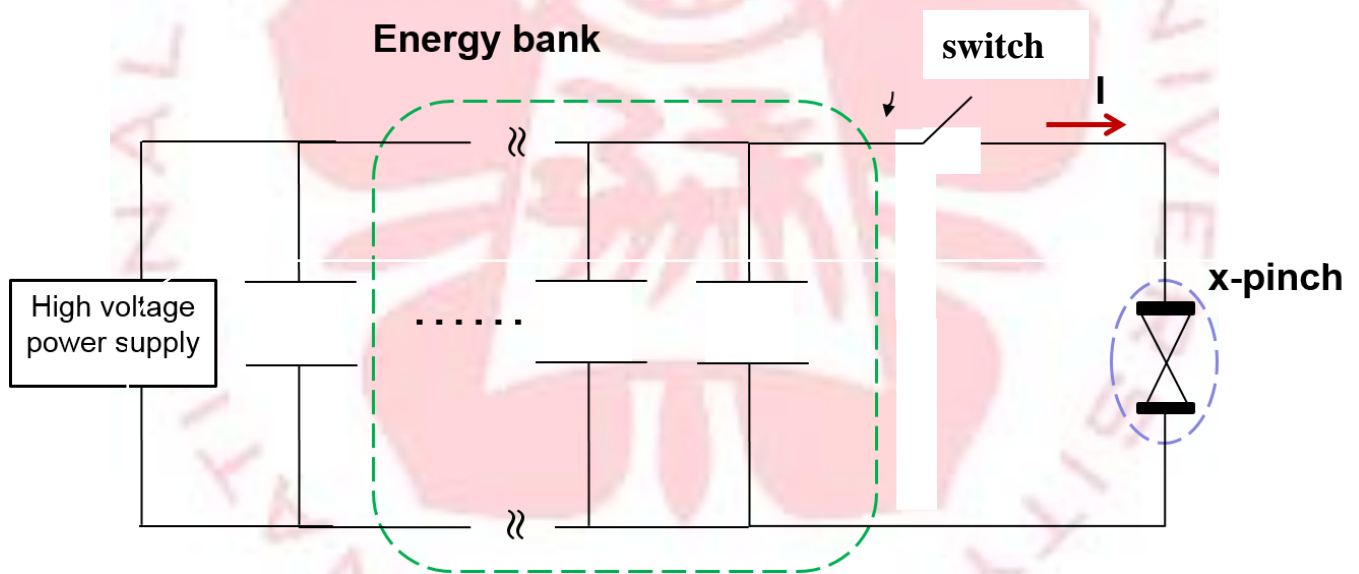


圖 1-2-1 pulsed-power system 設計，藉由 high voltage power supply 先將 energy bank 內的電容充電等電容都充飽電後，再將開關關閉，瞬間輸出大電流，用來驅動 x-pinch。



## 第二章 元件介紹

此章節將會提到，透過 LTD 原理設計而成的 pulsed-power system，其內部的元件結構組成，以及元件分別的介紹。

另外一提，以下的圖表是對專有名詞的詳細解釋。藍色曲線的部分是指我們輸出的一個觸發脈衝；在觸發脈衝 peak 出現後到誘發紅色曲線(開關導通後產生的電流)這段時間稱為延遲時間(delay time)。另外，因為每一次的誘發開關導通的時間會稍微有一點不一樣，我們稱這個範圍為 jitter。

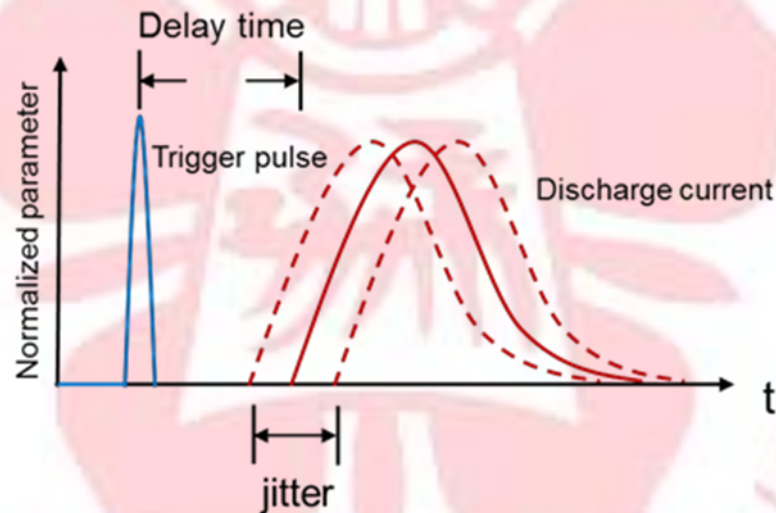


圖 2-1 藍色曲線的部分為觸發脈衝，紅色曲線的部分為開關導通後產生的電流。在觸發脈衝峰值出現時間到誘發紅色曲線這段時間稱為延遲時間。而每一次誘發開關導通的時間會稍微不一樣，我們稱這個範圍為 jitter。

### 2-1 linear transformer drivers(LTD)構造

利用 LTD 製成的 pulsed-power system 主要是利用緊密堆積而成的感應加速器的能量儲存和交換，達到在極短的持續時間內(約 100-300 ns)輸出高峰值的功率脈衝[1][3]。

Linear Transformer Drivers 主要是由多個電容、開關、鐵磁芯組

合而成。而單一的 LTD 內部由多個單元並聯組合而成，稱之為 brick。每一個 brick 內部則分別由兩個電容和一個導通開關(gas switch)串聯而成，剖面結構如圖 2-1-1 所示[2]。

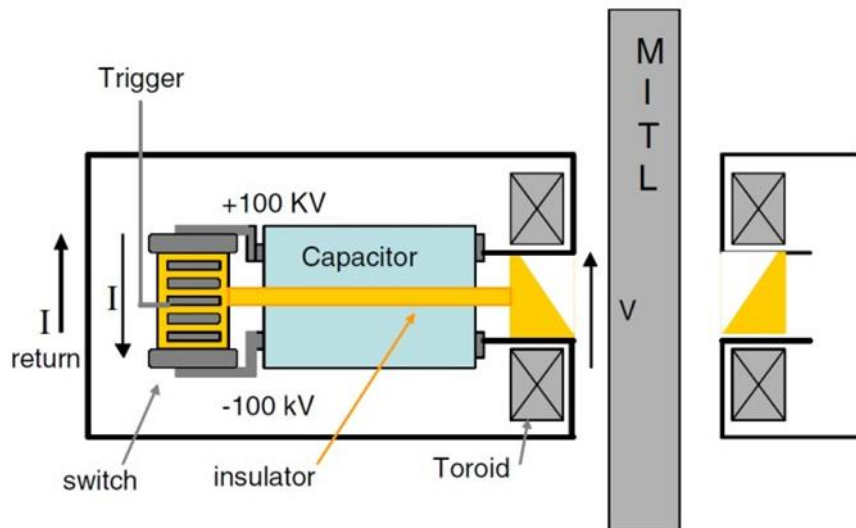


圖 2-1-1 Linear Transformer Drivers 內部單一 brick 的剖面圖。每一個 brick 內部都由兩個電容和一個開關串聯而成。開關兩側的電容會利用高壓電源施加 ±100 kV 的電壓，因此開關必須能夠承受 200 kV 的電壓差；透過 trigger pin 送入一個觸發訊號，使開關導通。

Linear Transformer Drivers 為了能夠在極短的時間內產生高功率脈衝，對於能夠被控制觸發的導通開關有很嚴格的要求。未經觸發而自行觸發(pre-fire)的機率要夠低才行。當觸發訊號(trigger pulse)輸出後，約 5-10 ns 後開關將會導通(activated)，此時間差又稱為延遲時間(delay time)，又因為每次觸發的延遲時間不一定相同，此時間上的不確定性稱為 jitter。因此，一個好的開關必須具備 pre-fire 機率低且 jitter 小的特性。基本上，我們將以 A.A Kim 設計的 LTD 來進行[3]，詳細的設計我們將在以下討論。

我們將使用電容值為 40 nF 的電容，單一 brick 中兩個電容串聯後，總電容值為 20 nF。預計總共有 20 個 brick，整體 LTD 總電容值為 0.4 uF。因為電容將被施加 ±100KV 的電壓，總能量為  $E_{\text{stored}} = \frac{1}{2} CV^2 =$

8 kJ。假設電感值為 50 nH，則 LTD 輸出電流的 rise time 可以粗估為

$$T_{\text{rise}} = \frac{1}{4} \times 2\pi\sqrt{LC} \approx 220 \text{ ns}, \text{ 預期的輸出電流會是 } I \approx \frac{V}{\sqrt{L/C}} = 570 \text{ kA},$$

與 A.A Kim 所設計的 LTD[3] (如圖 2-1-2 所示)相同。

LTD 的結構原理可以用圖 2-1-3 的等效電路圖來表示。圖中的 C 表示 LTD 總電容值， $L_B$  表示 LTD 內部(不含負載及鐵磁芯)的電感值， $R_S$  表示 LTD 內部的電阻值， $L_L$ 、 $R_L$  分別表示負載電感和電阻， $L_C$ 、 $R_C$  分別表示鐵磁芯的電感和電阻。





圖2-1-2 LTD 內部 20 個 bricks 結構俯視圖。這邊由 20 個 bricks 並聯而成，來使輸出的電流疊加成大電流。以 A.A Kim 的 LTD 為例(如圖 2-1-2 所示) [2]，總共有 20 個 bricks 並聯，每一個 brick 裡面由兩個 40 nF 的電容和一個開關串聯，開關兩側的電容充電至 $\pm 100$  KV，因此 switch 的工作電壓必須至少能夠承受 200 KV。此設計 LTD 可以輸出 0.5 MA。

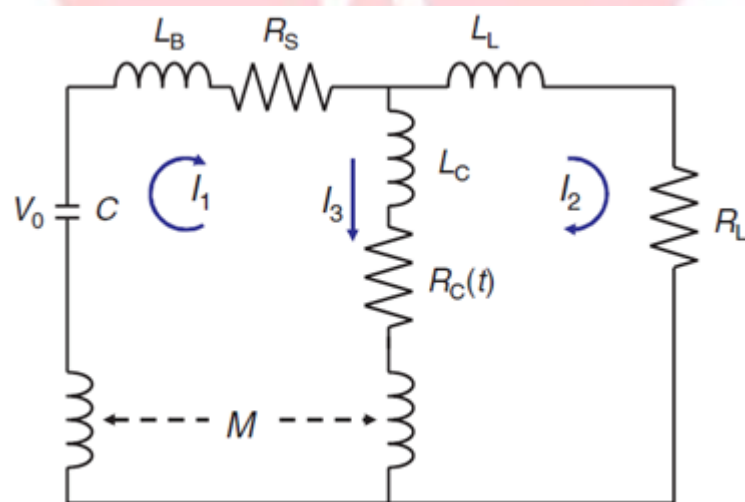


圖2-1-3 LTD 等效電路圖[1]

## 2-2 不同開關之特性比較

Linear transformer driver 的設計，因為要求在極短的時間內讓20個並聯的brick 同時輸出電流疊加成高電流，所以必須要求每一個brick 內部的開關同時導通，因此，對於開關的要求非常嚴格。

J.R.Woodworth 的團隊比較了四種不同開關的特性[2]，圖2-2-1，與table 2-2-1 分別是四個開關的照片和規格，分別在開關兩端施加 $\pm 100$  kV，其測試結果如下。



圖 2-2-1 由左而右分別為 HCEI、Sandia、Kinetech 和 L3 等的單位製作的開關。

表 2-2-1 四種開關之物理參數

| Switches     | HCEI          | Sandia         | Kinetech      | L3             |
|--------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Gaps         | six each 6 mm | two each 12 mm | two each 5 mm | two each 12 mm |
| Air pressure | 57 psia       | 130 psia       | 242 psia      | 72 psia        |

## 2-2-1 HCEI 開關

HCEI 開關高約 16 cm，因為尺寸較大，因此電感值也較大(~115 nH)，它優點是內部有六個間隙(gap)，因為只需要使其中一個間隙導通後，剩下的五個間隙即可立即被誘發而導通，因此在使用時，開關比較容易被觸發而導通。

其他的開關因為只有兩個間隙，因此需要比觸發 HCEI 開關還要更高的電壓，才能夠使他們導通。另外，如圖 2-2-1-1 所示，HCEL 可被觸發超過 10000 次，然而前 50 發有很不穩定的延遲時間，有可能是因為電極表面不均勻所造成的。剛開始時，電極表面有凸起的地方會比較容易被觸發，大部分的電流會通過該點，造成局部加熱，將表面凸起的部分熔化，使其表面變的平整，此過程稱自我恢復(self-curing)。而在放電 1400~1500 次時，因為其中一塊電極掉了，造成延遲時間的不穩定。

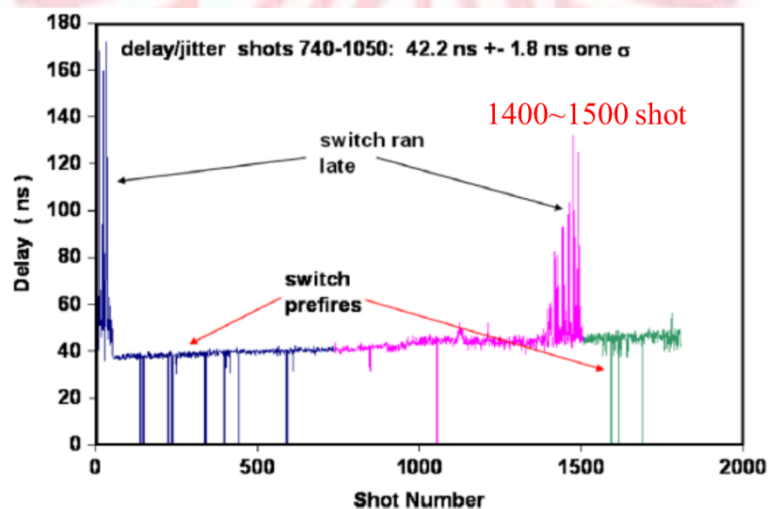


圖 2-2-1-1 HCEI 使用壽命測試。一開始因為電極表面不均勻，造成觸發的前面 50 次有很大的不穩定性。在 1400~1500 次時，則是因為其中一個電極掉了，而造成的不穩定。

## 2-2-2 Sandia 開關

圖 2-2-2-1 是 Sandia 開關較為細節的圖示。為了降低此開關的電感值，電極呈現錐形，整體的高度為 9.2 cm 寬度為 10.2 cm。圖 2-2-2-2 為此開關使用壽命的測試結果，測試期可持續使用三天，用三個顏色代表不同天的測試結果。平均延遲時間為 42 ns，jitter 為 $\pm 5.7$  ns。

Jitter 較大的其中一個原因，是因為有兩個間隙。另一個可能是因為利用 80 KV 的工作電壓難以導通。

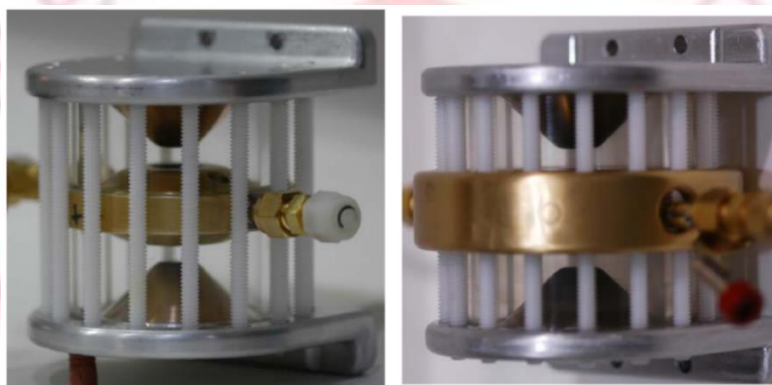


圖 2-2-2-1 Sandia 開關細節結構。上下兩個錐形電極，中間還有一個電極，使這個開關有兩個間隙。

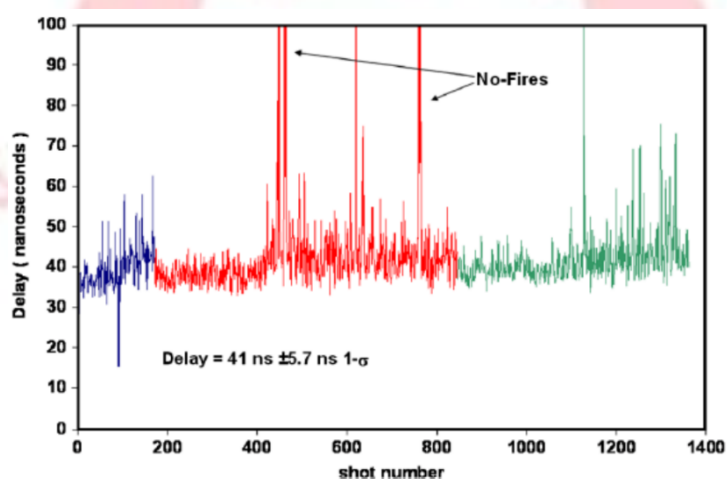


圖 2-2-2-2 Sandia 開關使用壽命測試。

### 2-2-3 Kinetic 開關

圖 2-2-3-1 為 Kinetic 開關內部細節圖示。此開關為直徑 x 高度等於 7.5 cm x 12 cm 的圓柱體，內部兩端電極是可以依照需求調整間距，內部有四個觸發電極(trigger pin)。此設計有較小的電感值及較長的使用壽命，因為當觸發脈衝透過觸發電極進入開關而誘導兩端電極崩潰時，每一次的觸發脈衝是隨機誘發觸發電極的，並非固定誘發特定的電極，因此觸發電極及開關的使用壽命可以延長。圖 2-2-3-2 為此開關使用壽命的測試結果，測試期可持續使用四天，圖 2-2-3-2 上的四個顏色代表不同天的測試結果。平均延遲時間為 43.4 ns，jitter 時間為 $\pm 3.3$  ns，並且僅有 2 個 pre-fire 事件。

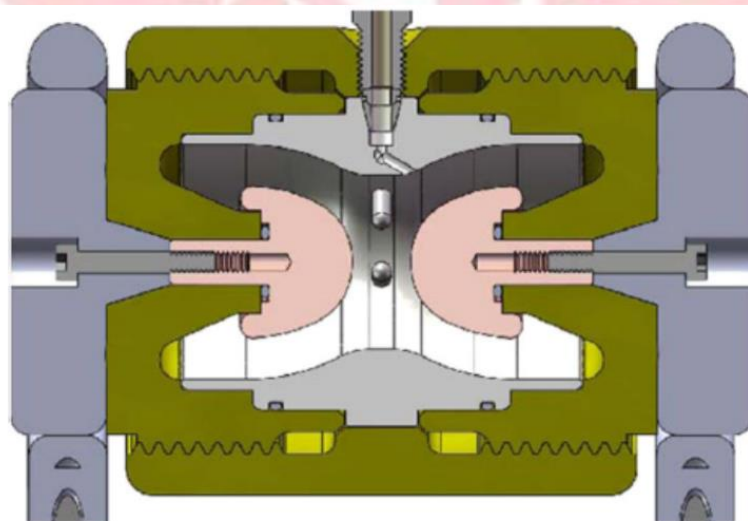


圖 2-2-3-1 Kinetic 開關內部細節，粉紅色的部分為電極，而在電極的上下左右各有一支觸發電極。



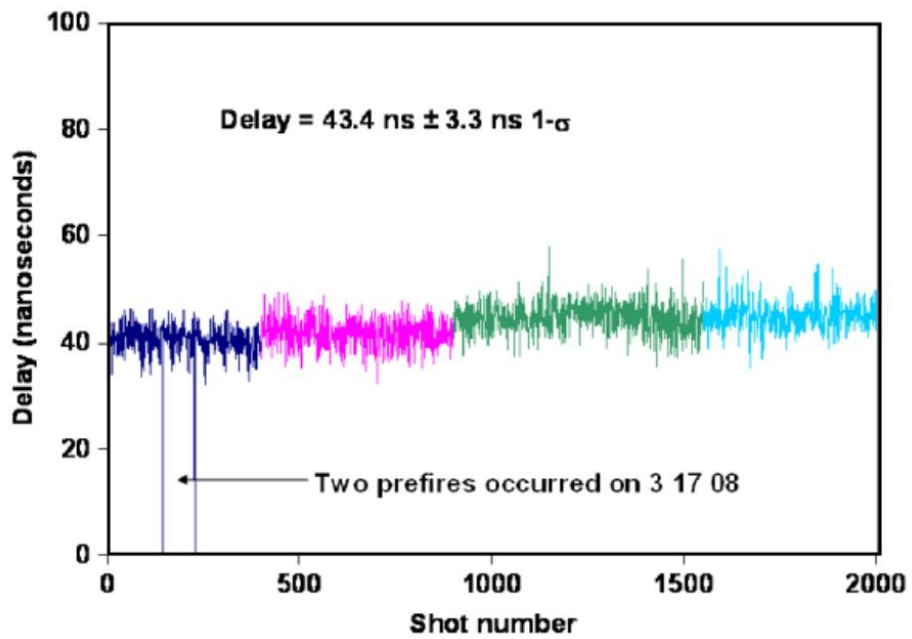


圖 2-2-3-2 Kinetic 開關使用壽命測試。使用壽命可達四天，且非常的穩定。四個不同顏色表示不同天做的測試，但是整個測試是連續不間斷的。

## 2-2-4 L3 開關

圖 2-2-4-1 是 L3 開關內部細節。此開關直徑為 14.6 cm，高為 7.6 cm。圖 2-2-4-2 為使用壽命的測試結果，四個不同顏色的線段表示不同天做的測試，平均延遲時間為 45 ns，jitter 為 $\pm 1.2$  ns。在約 1300 發後(第四天)延遲時間強烈的不穩定，是因為觸發電極( trigger pins )壞掉而造成的。



圖 2-2-4-1 是 L3 開關內部細節，左邊電極部分可以看到中間有燒焦的一圈，表示崩潰發生的地方幾乎都在這一圈。

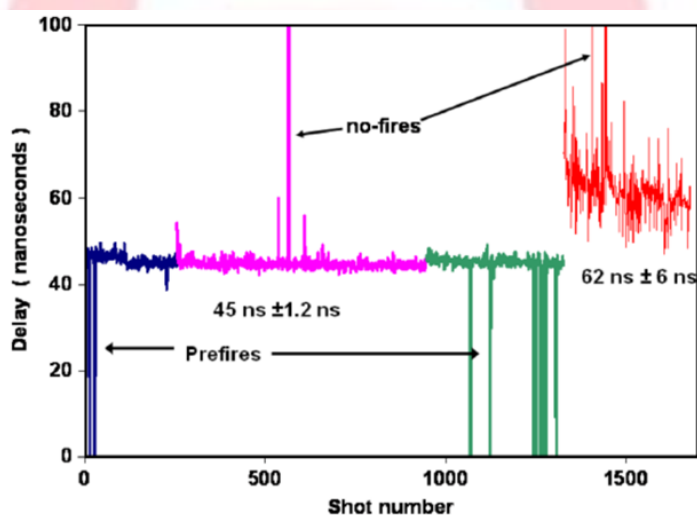


圖 2-2-4-2 L3 開關使用壽命測試，四個顏色代表不同天做的測試，四個不同顏色表示不同天做的測試，但是整個測試是連續不間斷的。第四天紅色線段的部分，可以看出來非常的不穩定，是因為觸發電極壞掉所致。

## 2-3 觸發脈衝元件

如前文所述，在開關的設計上，將會利用觸發脈衝來誘發開關內部兩端電極的導通。在觸發脈衝的部分，為了達到較快的觸發脈衝時間，將使用絕緣柵雙極電晶體 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)。因為 IGBT 內部的結構類似於雙載子接面電晶體 (bipolar junction transistor, BJT) 和金屬氧化物半導體場效電晶體 (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET) 結合的工作型態，因此我們會先介紹 BJT 和 MOSFET 的工作型態，再介紹 IGBT。

### 2-3-1 雙載子接面電晶體 (bipolar junction transistor, BJT)

依照結構的不同下有 PNP 型及 NPN 型兩種，其結構圖如圖 2-3-1-1 所示。PNP 型的 BJT 是兩塊 P 型半導體中間夾了一塊較薄的 N 型半導體；若是 NPN 型半導體則是兩塊 N 型半導體中間夾了一塊較薄的 P 型半導體。因為此元件中是由二種極性的載子 (p-電洞和 n-電子) 共同負責傳輸電荷，所以它稱為雙載子。圖 2-3-1-1 BJT 有三個接腳分別為 E、B、C，分別代表為射極 (emitter)、基極 (base)、集極 (collector)。射極和集極的功用分別為發射和收集電子或電洞，基極則是用來控制通過射極和集極的電流大小。

使用 NPN 型的 BJT 時，當基-射極接面 (B-E) 為順向偏壓，基-集極接面 (B-C) 為反向偏壓，此種工作模式為作用區。由於射極的摻雜濃度遠大於基極，且基極寬度很薄。電子可以從射極跨過 B-E 接面而注入到基極，甚至通過基極區而進入 B-C 的空乏區，此空乏區內之電場會將電子吸引至集極區。同時，電洞也會從基極越過 B-E 接面吸引至射極，所以射極電流 ( $I_E$ ) 也包含射極注入到基極的電子流 ( $I_{nE}$ ) 及基

極注入到射極的電洞流 ( $I_{pE}$ )。由於射極的摻雜濃度遠大於基極，所以  $I_{nE} \gg I_{pE}$ 。至於 PNP 型 BJT，其電流方向和 NPN 型 BJT 電流方向相反，工作原理亦相反。

圖 2-3-1-2 是 NPN 型 BJT 的三種不同工作模式:截止模式 (Cutoff mode)、線性放大模式 (Amplification mode) 和飽和模式 (Saturation mode)。

1. 截止模式:如圖 2-3-1-3 所示，當 B-E 接腳偏壓低於某一個電壓時(約 0.6V)，B 接腳的電流趨近於 0，因此無法啟動電晶體。
2. 線性放大模式:NPN 型的電晶體是順向偏壓型( $V_{BE} > 0$ )。我們由圖 2-3-1-3 可以看到當電壓大於 0.7V 時， $I_B$  的值開始急遽增加，表示此電晶體開始被驅動，因此可以藉由調整  $I_B$  的值來控制電晶體的工作型態。觀察圖 2-3-1-2 可以發現，當  $I_B$  的值固定時，即使  $V_{CE}$  的值變大， $I_C$  的值並不會隨之改變。若是當  $V_{CE}$  的值固定， $I_B$  的值增加時，則趨線會往上移動，此時  $I_C$  的值會隨著  $I_B$  的增加而增加。
3. 飽和模式: $V_{BE}$  維持在 0.7 V 或較 0.7 V 稍高一點時， $V_{CE}$  卻小於 0.3V 時，稱做為飽和區。在圖 2-3-1-2 可以看到當  $V_{CE}$  改變時， $I_C$  有急遽變化，此時  $I_C$  和  $I_B$  就沒有線性放大的關係，電流放大特性逐漸消失。

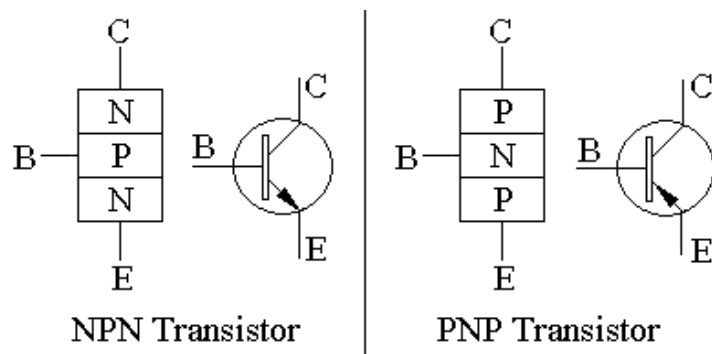


圖 2-3-1-1 左邊為 NPN 型 BJT，右邊為 PNP 型 BJT。

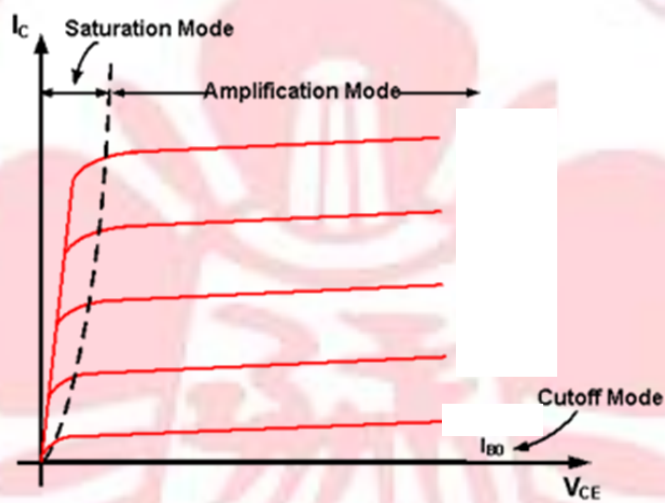


圖 2-3-1-2 電晶體的三個工作模式，截止模式(Cutoff mode)、線性放大模式(Amplification mode)和飽和模式(Saturation mode)。

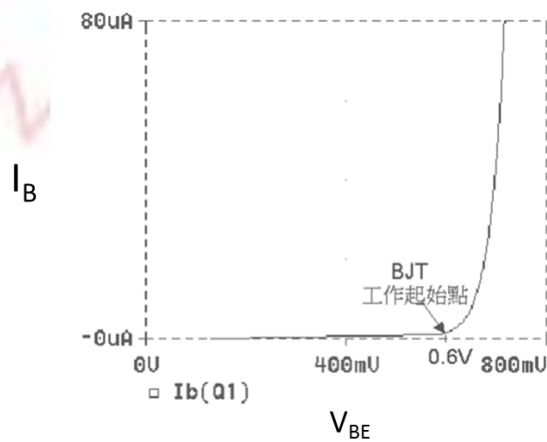


圖 2-3-1-3 N 型電晶體 B-E 接腳偏壓( $V_{BE}$ )和 B 接腳電流( $I_B$ )的關係。可以看到當 B-E 接腳偏壓( $V_{BE}$ )低於 0.6 V 時，B 接腳電流( $I_B$ )趨近於 0。

## 2-3-2 金屬氧化物半導體場效電晶體 (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET)

圖 2-3-2-1 為 N 型和 P 型 MOSFET，MOSFET 為四端元件，接腳分別為閘極(G)、汲極(D)和源極(S)。金屬氧化物半導體場效電晶體電路符號中，從通道往右延伸的箭號方向表示此元件為 n 型或是 p 型的金氧半場效電晶體。箭頭方向朝內是 N 型 MOSFET，箭頭方向朝外則是 P 型 MOSFET。圖 2-3-2-2 為 N 型 MOSFET 的結構圖，接腳分別為閘極(G)、汲極(D)和源極(S)和基極(Bulk)。由結構圖可以知道閘極是由金屬、氧化層和半導體依序疊在一起的，類似於電容的結構。在閘極的腳位外加足夠的正電壓，即可在半導體靠內氧化層的介面上吸引導電電子，進而形成通道，讓源極和汲極間的 n+通道導通。因此只要借由控制閘極電壓，就可以控制氧化層內的電場變化，進而控制源極和汲極間的導電特性。以 N 型 MOSFET 為例，圖 2-3-2-3 顯示了三種不同工作模式：截止模式(Cutoff mode)、線性放大模式(Amplification mode)和飽和模式(Saturation mode)。

1. 截止模式:當閘極沒有外加偏壓時，源極和汲極間互不導通，此時為截止狀態。當外加偏壓慢慢上升時，在閘極腳位的金屬層會慢慢累積一些正電荷，而另一邊的氧化層會吸引等量的負電荷，但此時的負電荷會被電洞複合，仍然不足以驅動 MOSFET，因此此時源極和汲極仍然是不導通的。
2. 線性放大模式:若在閘極持續增加正偏壓，到達一定的臨界電壓時(圖 2-3-2-3 紅色線段和藍色線段交接觸表示在不同情況下的臨界電壓值)，在氧化層和半導體的界面會開始出現導電電子層，這時源極和汲極可以藉由此導電電子層型成通道進而導通。

3. 飽和模式:當  $V_{DS}$  增加時  $I_D$  幾乎不隨  $V_{DS}$  改變時，稱為飽和模式。



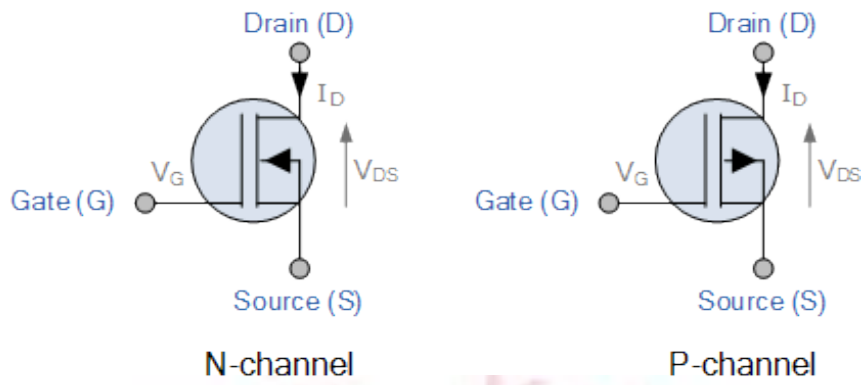


圖 2-3-2-1 N 型和 P 型 MOSFET

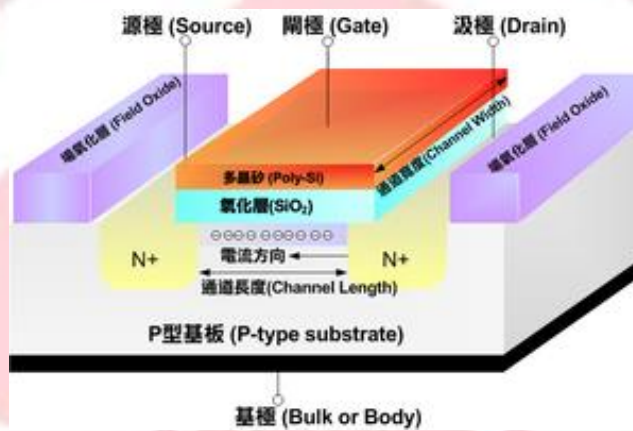


圖 2-3-2-2 N 型 MOSFET 結構圖

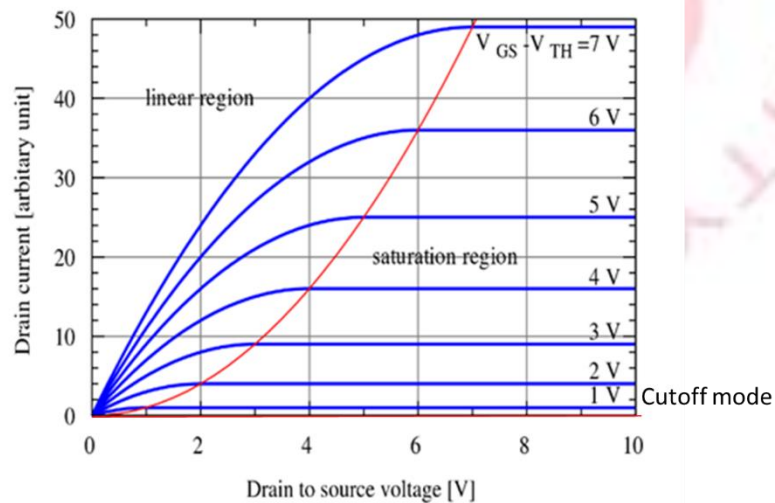


圖 2-3-2-3 MOSFET 的三個工作型態，截止模式(Cutoff mode)、線性放大模式 (Amplification mode)和飽和模式(Saturation mode)。



### 2-3-3 絕緣柵雙極電晶體 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)

IGBT 本質上是一個場效電晶體，從結構上來看和 MOSFET 非常的類似(如圖 2-3-3-1)，IGBT 在結構上只比 MOSFET 汲極的部分多了一層 N-和一層 P+層。MOSFET 在增加 N-和 P+層後，原本的汲極(Drain)腳位變成集極(Collector)，源極(Source)腳位變成射極(Emitter)。因此，可以將 IGBT 視為由 MOSFET 和 BJT 結合而成的，其等效電路圖如圖 2-3-3-2 所示。

從圖 2-3-3-2 我們可以看到有兩個 BJT，因為結構生成的問題，此種結構容易有栓鎖(Latch-up)的效應，因此要控制栓鎖效應關鍵就在於控制  $R_S$ 。此外，這樣的結構還能提高電流驅動的能力，但是另一方面需要注意的是，因為當溝道快速關斷時，雖然沒有了電子流，但是集極腳位(Collector)仍然持續有少數電洞注入，因此對於 IGBT 來說，電流無法立刻關斷，此現象稱為拖尾電流(tailing current)，這會影響 IGBT 的關斷時間還有工作頻率。因此，在較新的技術上，將原本 IGBT 的 N-和 P+之外多加入了一層 N+ buffer，這是為了改善拖尾電流的關斷速度，如圖 2-3-3-1(b)所示。

另外，IGBT 的電流主要是利用電壓來控制，其在電路的設計上比起利用電流控制的元件還要來的簡易，因此 IGBT 目前在功率元件應用上比較被廣泛使用。圖 2-3-3-3 是 IGBT 的工作特性，可以分為三個模式:截止模式(Cutoff mode)、線性放大模式(Amplification mode)、飽和模式(Saturation mode)。

1. 截止模式(Cutoff mode):當 IGBT 的閘極和射極間的電壓( $V_{GE}$ )為零，MOSFET 截止，此時會切斷 P 型 BJT 的電流供給而使晶體管截止。
2. 線性放大模式(Amplification mode): 當 IGBT 的閘極和射極間的電壓( $V_{GE}$ )為正時則 MOSFET 導通，此時 P 型 BJT 的集極和基極間的電阻會降低，會使得 BJT 導通。
3. 飽和模式(Saturation mode):當 IGBT 的閘極和射極間的電壓( $V_{GE}$ )接近某一個臨界值時，會趨近於飽和並開始驅動 IGBT。



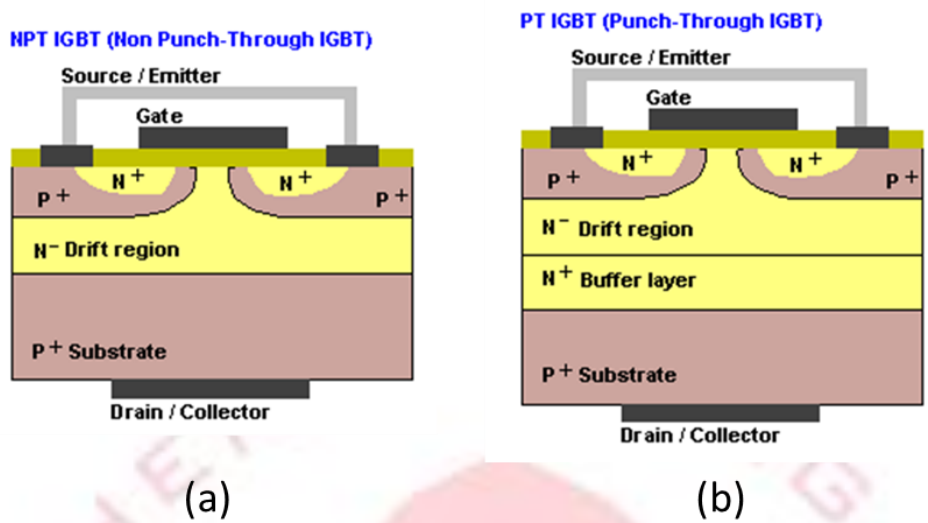


圖 2-3-3-1 IGBT 結構圖，(a)為 NPT-IGBT (b)為 PT-IGBT

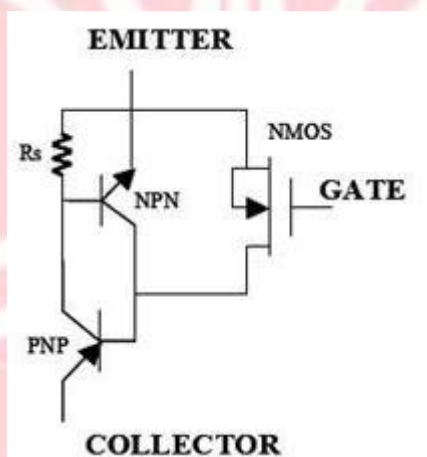


圖 2-3-3-2 IGBT 等效電路圖

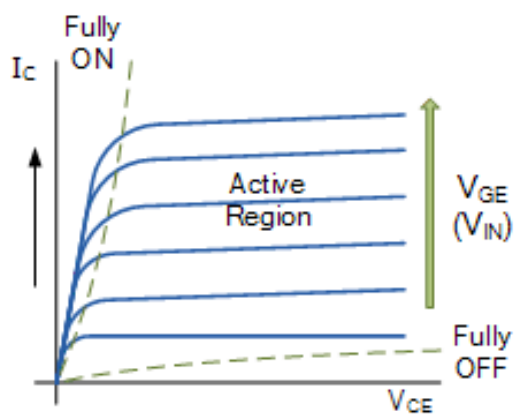


圖 2-3-3-3 IGBT 的工作特性

## 第三章 結果與討論

### 3-1 開關

由於目前實驗室已購買六顆 40 nF 的電容(中國製造)，我們必須先測試購買的電容是否符合規格，以及內部的電阻值和電感值等。測試的方法是分別量測電流並聯或串聯的放電狀況。

測試電容所需要的關鍵元件之一是開關，基本上我會以 Kinetic 開關的概念再修改來設計我們的開關，如圖 3-1-1 所示，圖 3-1-1(A) 是概念草圖，最後完成的開關結構是圖 3-1-1(B)。圖 3-1-1(B)開關的外層是壓克力管當作絕緣，壓克力管兩端再置入以壓克力棒加工而成的兩片圓片，並且在圓片中心點做螺紋加工，可旋入螺絲當作電極，在螺絲的前端旋入半圓蓋螺帽。我們可以藉由在螺帽尾端某一點做記號，旋轉一圈為一個螺牙間距，藉此來記錄我們的兩端電極間距。

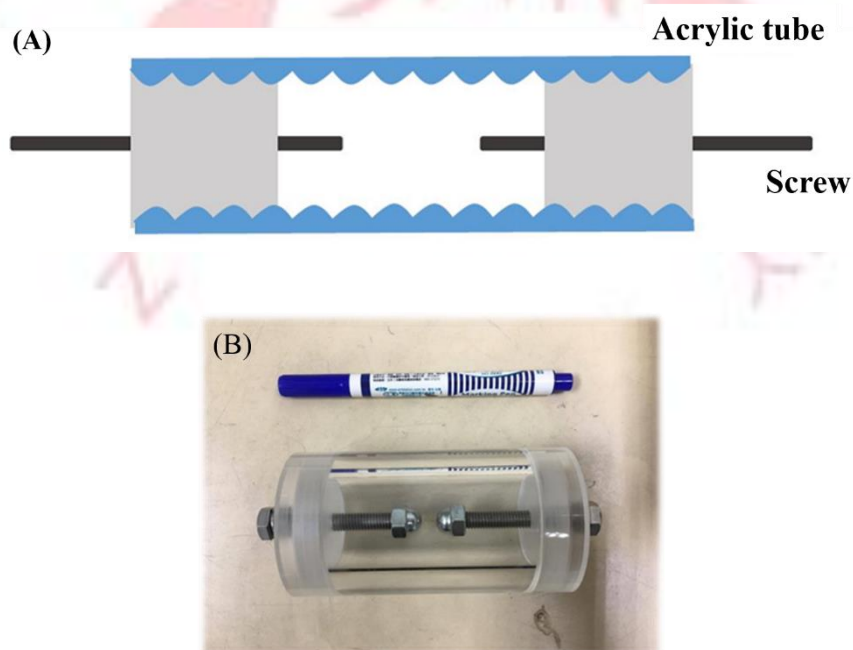


圖 3-1-1 開關設計

### 3-2 IGBT

因為電路模擬的程式上沒有 IGBT 元件，因此必須以等效電路模組來取代 IGBT 在電路模擬程式上的元件表示，藉由多個 IGBT 模組疊加達成輸出電壓提高的結果。但截至目前為止，雖然單一模組的 IGBT 模組電路模擬程式上的運作沒有問題，但在疊加 IGBT 等效電路後，卻沒有因為隨著模組的疊加，電壓成正比增加，因此目前還在測試當中。測試結果如圖 3-2-1 和圖 3-2-2。

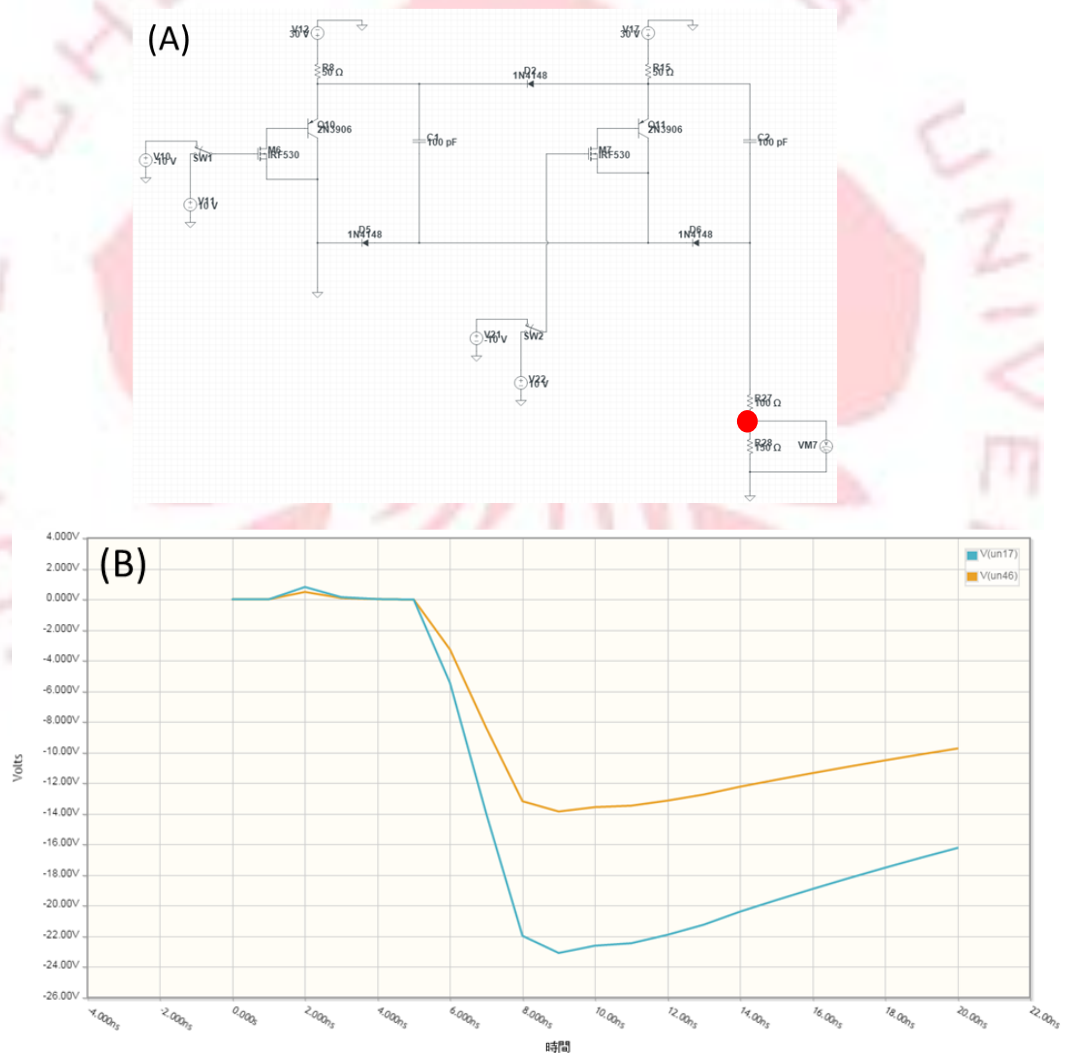


圖 3-2-1 (A)圖是 IGBT 兩個模組的模擬電路圖，(B)圖藍色線段是(A)圖中紅色點的輸出電壓，電壓值約為 23V。

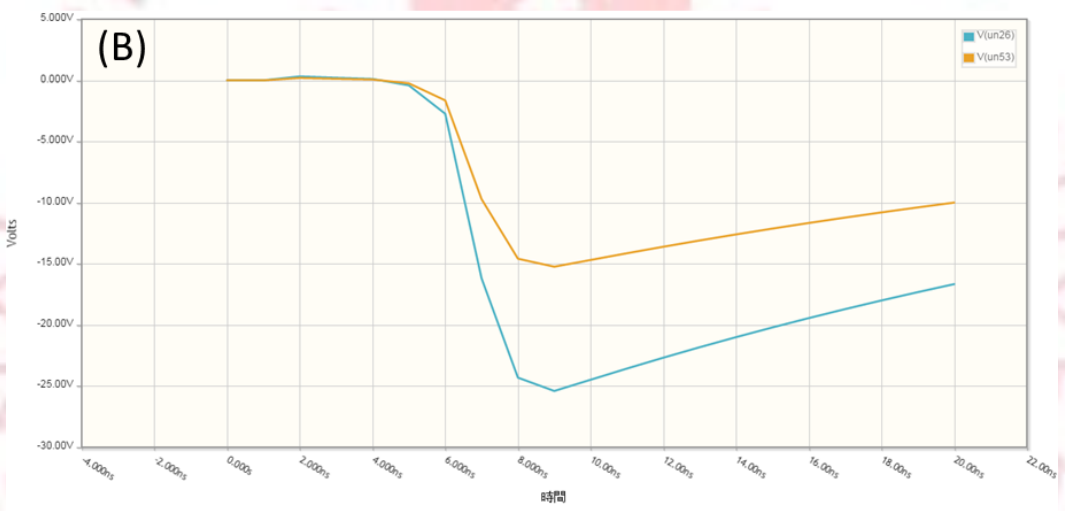
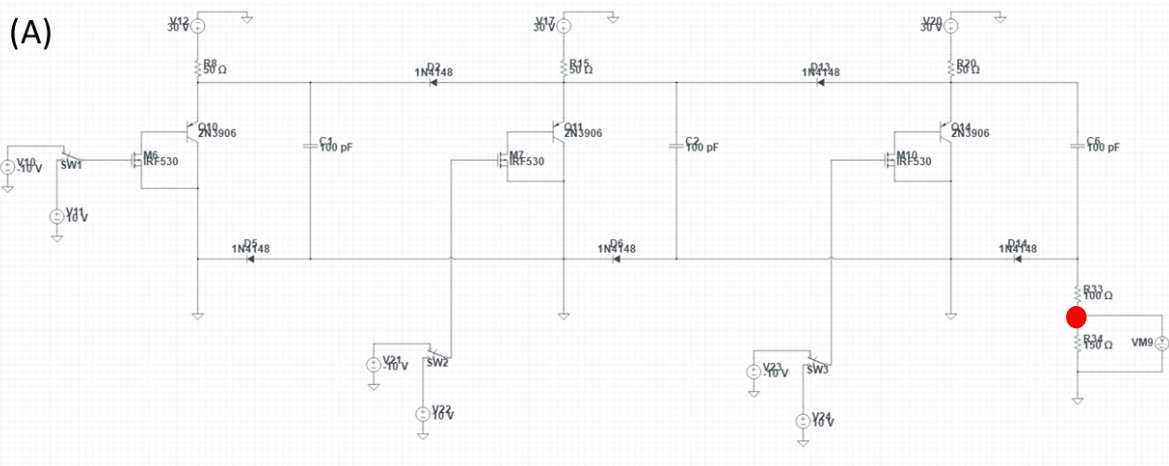


圖 3-2-2(A)圖是 IGBT 三個模組的模擬電路圖，(B)圖藍色線段是(A)圖中紅色點的輸出電壓，電壓值約為 25.4V。

## 第四章 未來進度

### 4-1 短期目標

1. 將設計完成的開關用來測試購入的電容於低電壓放電時的特性。
2. 解決使用 IGBT 等效電路來模擬其元件行為的問題，並利用 Marx generator 的概念來設計並運用到觸發脈衝。

### 4-2 長期目標

1. 模擬開關內部電場強度變化。
2. 做出觸發開關的驅動電路(trigger pulse circuit)。
3. 成功製作一個 brick。



## 第五章 總結

目前因為觸發開關的觸發訊號電路遇到瓶頸，因此先暫時擱置，經由和老師討論後決定先完成開關的設計以及加工，並用來測試電容於低電壓放電時的特性。若經過測試後，自行觸發開關有不妥的地方則繼續改善其設計，若成功後則再提高電容到較高的電壓來測試。

自行觸發的開關完成後，下一個步驟則可以再對開關加以設計，使其能夠藉由施加外加氣體來改變內部的壓力變化，達到不同的工作電壓環境。





## 參考文獻

- [1]Phys. Rev. ST Aceel. Beams **13**, 090401(2010)
- [2]Phys. Rev. ST Aceel. Beams **12**, 060401(2009)
- [3]Phys. Rev. ST Aceel. Beams **12**, 050402(2009)
- [4]IEEE Transaction On Plasma Science, VOL. 43, NO.4 (2015)
- [5]IEEE Transaction On Plasma Science, VOL. 14, NO.4 (2007)

