

產生高電壓短脈衝方波的經濟方法

A New Economic Method to Generate Fast High Voltage Pulse

鍾介文、林志民

Jieh-Wen Tsung, Jim Jr-Min Lin

利用電荷在傳輸線 (此為同軸電纜) 中等速傳輸的特性，將一定長度的同軸電纜充電至高壓後，再用快速電晶體開關瞬間將電荷導向與傳輸線匹配的負載，即可產生方波，其寬度由傳輸線的長度與訊號傳遞的速度來決定。此裝置可以輸出極高瞬間功率的脈衝，實測輸出至 $50\ \Omega$ 負載之最高電壓達 1380 V，最短脈寬小於 20 ns。此法取材容易，造價低廉，產生脈衝的波形相當接近理想的方波，且穩定度極佳，具有不下於高價儀器的品質，應有很高的應用價值。

A fast high voltage pulse generating device, which is capable to replace expensive commercial pulse generators, is presented. In this device, a coaxial cable is charged to a high voltage, and then the charges are released to an impedance-matched load through a fast transistor switch. Because charges are transmitted with constant speed in transmission line, a square wave can be generated. Also, the pulse width can be precisely controlled by the length of the cable. The testing results show that the highest pulses height is 1380 V, and the shortest pulse width is less than 20 ns. Thus, the pulse generated by this method has extremely high instantaneous power. The pulses are jitter-free, and the waveforms of the pulses approach to an ideal square wave, too. This device is simple and economic, but the quality of the output pulse is not worse than very expensive instruments. Hence, we believe that this design will have many applications.

一、前言

高電壓脈衝 (high voltage pulse) 在科學研究及工業上有非常廣泛的應用。一般而言，高電壓脈衝意味著高能量密度 (high power density)，例如：將 1 kV 電壓送至 $50\ \Omega$ 負載時，電流為 20 A，功率達 20 kW。通常產生高電壓脈衝的線路及元件，需作特別的設計與要求。電壓越高，電流越大，自然是

越難產生。再者，脈衝的速度 (上升時間 (rise time)、脈寬 (pulse width) 則更難與高電壓、大電流兼顧。

在某些應用上，如閃光燈、火星塞或使氣體放電以產生脈衝雷射光，高電壓脈衝的能量密度為主要的考量，其波形則相對較為次要。科學上的應用可能對波形的要求較高，例如：使帶電粒子 (離子、電子等) 偏轉的高電壓脈衝，其波形直接影響

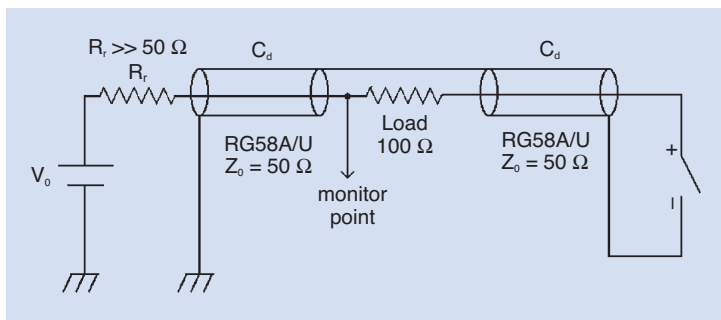


圖 1. 參考 Blumlein line 理論設計而成的電路。其中兩條 C_d 是作為放電產生高壓短脈衝之用的傳輸線， R_r 是限流電阻，負載為了配合阻抗匹配使用 $100\ \Omega$ 電阻，其中開關是用手將兩根開路電線快速捏合再放開，模仿機械開關，以避免電子開關的內阻抗干擾整體阻抗匹配。

粒子的軌跡，越是定義精確的波形 (如精確高度及寬度的方波)，越能精準地控制粒子的行進。在高速的應用上，脈衝的上升時間與最小脈寬等成為十分重要的參數。另一個常見的應用是作為時間閘 (time gate) 的控制，如施加高電壓脈衝在粒子放大器 (微通道板 (micro channel plate)、影像增強器 (image intensifier)、光電倍增管 (photo multiplier) 等) 上，使其只放大在閘內的訊號，相當於高速快門的功能。

若要產生一個高電壓的方波，雙開關推拉法 (push-pull) 是一個可能的方法。這類的元件，在市場上有可購得的商品，如德國 Belhke 公司的 HTS-GSM 系列⁽¹⁾，但其最小脈寬約在 $100\ \text{ns}$ 左右，不適用需要更短脈寬的場合。某些專業的公司 (如英國的 Kentech Instruments Ltd.)⁽²⁾ 製造可提供更窄脈寬高電壓方波的儀器，但極為昂貴。

筆者因離子影像的研究，需要可控制寬度的高電壓脈衝，早期使用雙開關的方法，但不易產生足夠短的脈衝 ($10-100\ \text{ns}$)。Zeng 和 Ma 曾經使用一個根據 Blumlein line 理論^(3,4) 設計而成的電路，以傳輸線的長度控制方波的寬度，並搭配 polymer-foil 的人手擊發開關，可以產生上升時間為 $1\ \text{ns}$ 、振幅為 $10\ \text{kV}$ 的方波。為了測試 Zeng 和 Ma 設計的線路^(4,5)，首先架設如圖 1 所示的高壓短脈衝產生

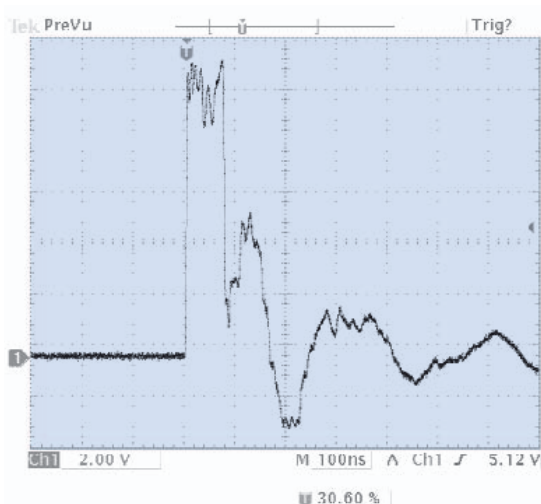


圖 2. 由 Blumlein line 電路產生的短脈衝。為了安全因素沒有使用高電壓。其 V_0 是 $20\ \text{V}$ ， C_d 長度是 $10\ \text{m}$ 。可以看出訊號因為阻抗無法匹配，使訊號在電路中來回反射，造成方波變形與雜訊。

設備，測試結果卻發現此電路因為阻抗匹配要求很高，產生的方波實際上很容易變形 (見圖 2)，且容易振盪。

由於離子影像的研究必須嚴格要求高壓脈衝的穩定度，而且希望此脈衝可以由電子開關自動控制其頻率。考量經費的限制，故研發改良一種利用傳輸線長度作為脈寬控制的高電壓脈衝產生電路，實測電壓、電流、脈寬及速度均十分優越，且造價低廉。以下即報告其設計原理及實測結果。

二、設計原理

此設計的主要原理是基於訊號在傳輸線中傳遞時的幾個特性^(6,7)：

- (1) 訊號電荷行進的速度為一定值。
- (2) 在傳輸線中，電壓與電流的關係可由其特性阻抗 Z_0 (對 RG58A/U 同軸電纜而言， $Z_0 = 50\ \Omega$) 來描述：

$$Q = CV \quad (1)$$

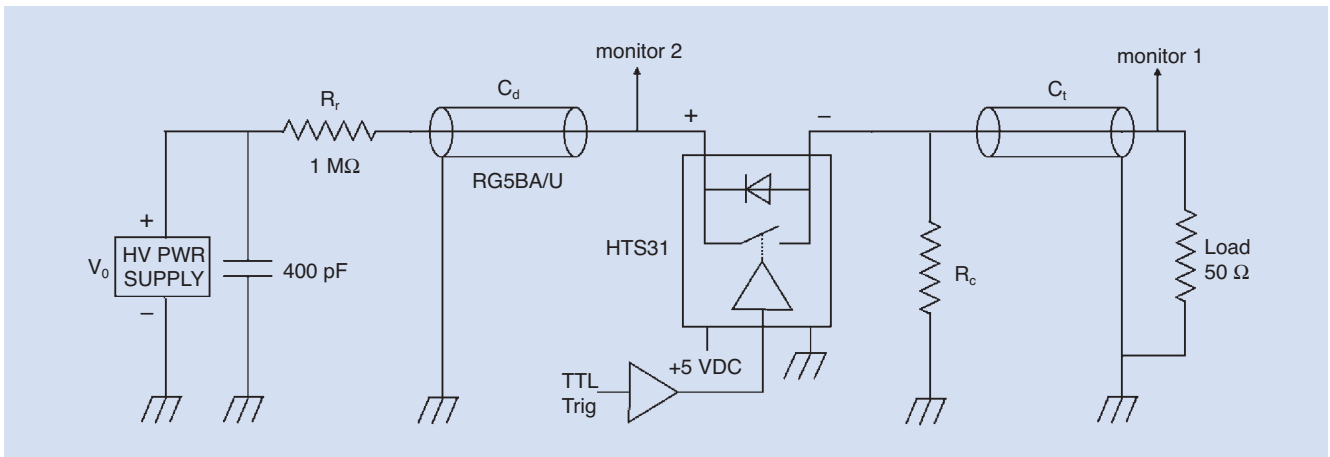


圖 3. 高壓短脈衝產生電路圖。圖中電源供應器供應的高電壓經過 4700 pF 的電容穩壓，使 C_d 充電。 R_r 是限流電阻。HTS31 即電子開關，當開關接通， C_d 所儲存的電荷釋放形成方波，經由 C_t 傳輸到 50 Ω 的負載。其中 R_c 是用來補償 HTS31 的內電阻的阻抗匹配。

(3) 訊號到達傳輸線端點時，依端點所接的負載 Z_L ，電流會反射，反射率為

$$r = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2)$$

當 $Z_L = Z_0$ 時稱為阻抗匹配負載，反射率為零。若 $Z_L = \infty$ (即開路)，則 $r = +1$ ，電荷完全反射回電纜中。

根據以上三個特性，若先將傳輸線充電至高電壓，再瞬間將電流導向與傳輸線匹配的負載，根據特性 (1)，電流通過負載的時間將正比於傳輸線的長度，當電流全流過負載後，傳輸線中已無電荷，電壓降到零。在理想狀況下，這個方法可以產生一個方波，此方波的寬度由傳輸線的長度與訊號傳遞的速度來決定。在此我們使用 RG58A/U 同軸電纜為傳輸線，其實測傳遞速度為 2.31×10^8 m/s，相當於 4.33 ns/m。電纜的長度可容易地控制在公分的精度，如此方波的寬度可在次奈秒量級做十分精密的控制。負載的阻抗必須與傳輸線匹配，避免訊號在負載端反射，使脈衝變形。

對已經充電的靜態傳輸線而言，可看成在纜線中有兩道相反方向的電流， I^+ 與 I^- ，則 $V = (I^+ + I^-)Z_0$ ， $I^+ = I^- = V/2Z_0$ ， I^+ 或 I^- 以特性傳遞速度在電纜中流動，遇到電纜的端點時，則反射回電纜

中。

參考圖 3 來說明此高壓脈衝的產生機制。高壓直流電源通過 R_r 對同軸電纜 C_d 充電至 V_0 ，負載端為匹配同軸電纜的電阻 (50 Ω)。因為同軸電纜 C_t 到負載的反射為零，故不論電纜 C_t 的長度是長還是短，電纜 C_t 加上負載的等效電路相當於 50 Ω 的電阻。

見圖 4，當開關接通， C_d 內的電流開始往兩端釋放，此時可以看作 C_d 內的電荷正好分成兩半相等的數量往兩側移動，黑色為往開關端移動的電荷，白色為往電源端的電荷。黑色訊號維持在 C_d 中傳輸的速度往下游傳輸，白色訊號則馬上被 R_r 反射，因為它具有和另一半電荷脈衝一樣的脈寬，兩者疊加後，黑色脈衝完全移出電纜的時間，剛好能使白色脈衝完全反射接續其後 (見圖 4(c))，所以，在輸出端探測到的高壓短脈衝 $V(t)$ ，預期其電壓將會只有 V_0 的一半，其脈寬會是訊號在 C_d 中傳輸所需時間的兩倍。

若觀察時間遠長於訊號在電纜中傳輸的時間，此時電流早已在電纜中來回反彈很多次，於是電荷累積在同軸電纜中，同軸電纜可等效於電容器，滿足以下方程式：

$$Q = CV \quad (3)$$

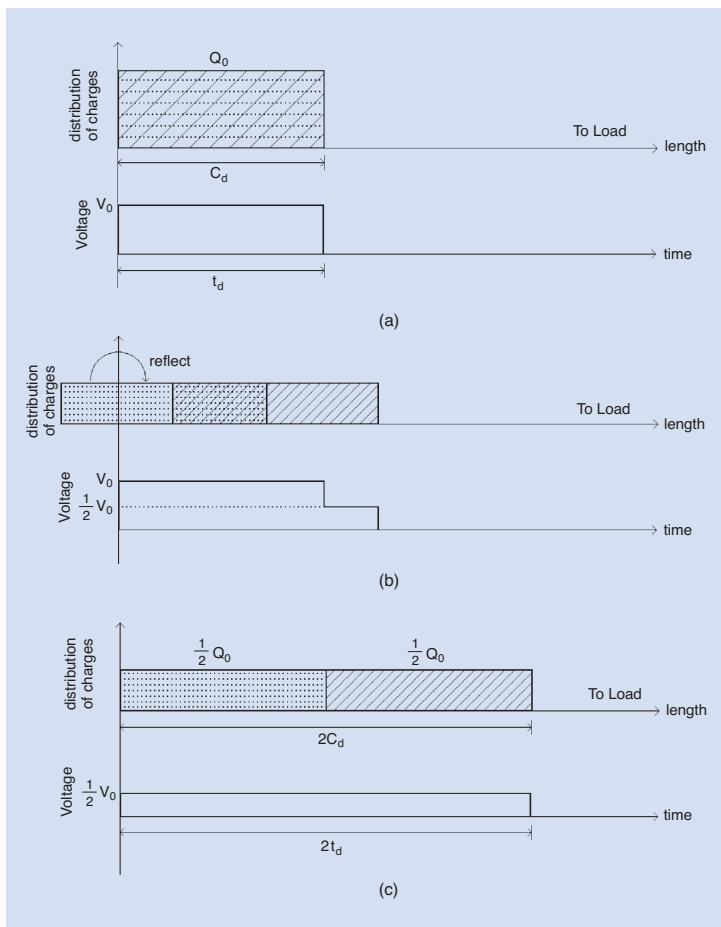


圖 4. 電纜放電輸出機制示意圖。圖中顯示電荷隨電纜長度之分布，為方便說明，黑色電荷流向負載 (I^+)，白色電荷流向 $R_r(I^-)$ 而被反射回電纜中。(a) HV 開關接通的瞬間， $t = 0$ 時，(b) $t = 0.5 t_d$ 時，(c) $t = t_d$ 時。此處 $t_d =$ 同軸電纜長度 (C_d) / 電荷傳遞速度。

(3) 式中， C 為同軸電纜的電容值，此電容值和電纜的長度成正比 (30 pF/ft)。因此，只要控制同軸電纜的長度，就可以控制電纜中所累積的電荷。當高壓開關接通，電纜放電至匹配的負載，此時遵守 (1) 式，電荷以等電流形式釋放，就可以形成一個特定電壓且特定脈寬的方波。

見圖 3，在放電同軸電纜 C_d 靠電源端，必須加上一個大電阻 R_r 。其作用有二：第一，在對電纜 C_d 充電時，作為限流之用；第二，在電纜 C_d 放電時，讓 C_d 下游的電路和電源供應器隔離。當開關接通，電纜中的電荷以等電流開始向 C_d 的兩端傳輸， R_r

可以阻擋往電源端的電流使之反射，使釋放的電荷構成方波。 R_r 和 C_d 的組合在充電時相當於 RC 電路， R_r 的值會影響 C_d 充電速度的快慢⁽⁸⁾，

$$V = V_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (4)$$

其中

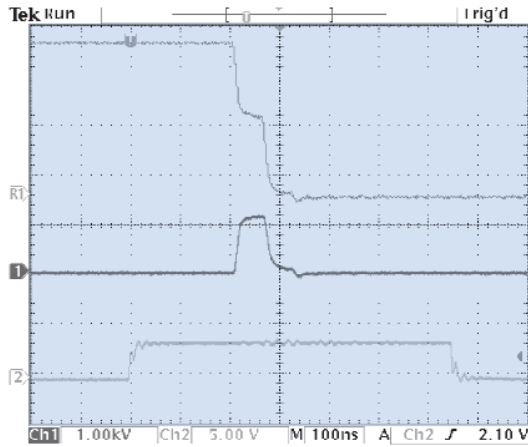
$$\tau = R_r \times C_d \quad (5)$$

當 R_r 的數值越大，時間常數 τ 增加， C_d 充電將會變慢。所以在設定開關的頻率時，務必要考慮時間常數，例如，在本測試電路中，在放電電纜長度約 10 m 時，時間常數約為 1 ms，所以限制脈衝的重複週期為 10 ms (100 Hz)，約等於 10 倍時間常數 τ ，如此才不會造成充電不足開關就已接通的情況，導致高壓脈衝的電壓不如預期。

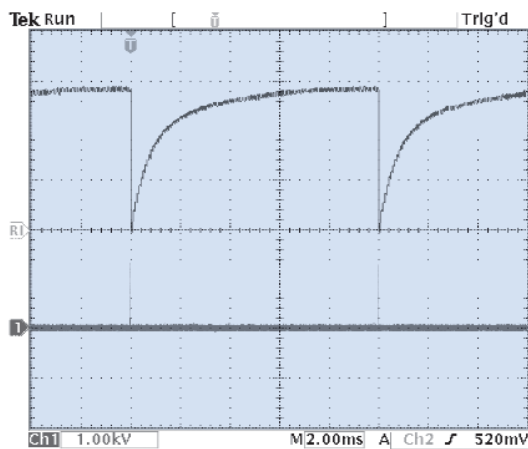
一般而言，要使高電壓大電流同時並存，需要有功率極高的電源供應器維持，但在本設計中，由於輸出訊號之 duty cycle (一個週期中輸出方波維持在高電壓處的時間比例) 極低，約小於 10^{-5} ，這意味著即使同軸電纜中儲存的能量不多，只要在很短的時間內釋放，也能產生極高功率的脈衝。這種工作時間較低的設計，只要是實驗室中常見的 12–50 W 的電源供應器就能勝任，大幅降低成本，也較為安全。

三、線路^(7,10,11)

詳細的線路如圖 3 所示。在電源輸出處，並聯 4700 pF 的電容以穩壓。 R_r 的電阻值不限定，但必須遠大於 50 Ω 。若使用小電流的電源供應器，電源越高壓，用的電阻應越大，以限制充電電流。同時，選用電阻時應考慮到 R_r 充電的時間常數。電阻越大，充電越慢。見圖 5(b)，此波形量自開關的正端，在經過電纜放電電壓下降之後，電壓將會因充電而上升。應調整電阻值至適當的大小，確保電壓在下一次開關開啟前飽和。本線路中，在放電電纜長度是 11.515 m， R_r 值為 1 M Ω 時，時間常數 RC 約為 1 ms。



(a) Ref1 1.00kV 100ns 300.000ns



(b) Ref1 1.00kV 2.00ms 20.00%

圖 5. 自圖三點路上測量點 1 和測量點 2 量得的訊號。(a) Ch1 為測量點 1 量得的高壓高頻脈衝，Ch2 為訊號產生器發出的觸發訊號，Ref1 為測量點 2 量得的訊號。觸發信號為 100 Hz，信號脈寬 650 ns， C_d 長度為 11.579 m。(b) 為放大時間尺度後測量得的結果，顯示 C_d 的充電曲線。

在此高壓開關使用德國 Behlke 公司的 HTS319。HTS31 的驅動脈衝由美國 Stanford Research Systems 公司的延遲產生器 DG535 供應。實驗中所有的驅動脈衝都是 650 ns 寬，如圖 5(a) 的曲線 Ch2。

此電路的作動程序如下 (見圖 5(a))：首先電纜經過充電，具有和電壓源同樣的電壓。此時訊號產生器發出觸發訊號 (圖 5(a)，Ch2)，經過觸發訊號

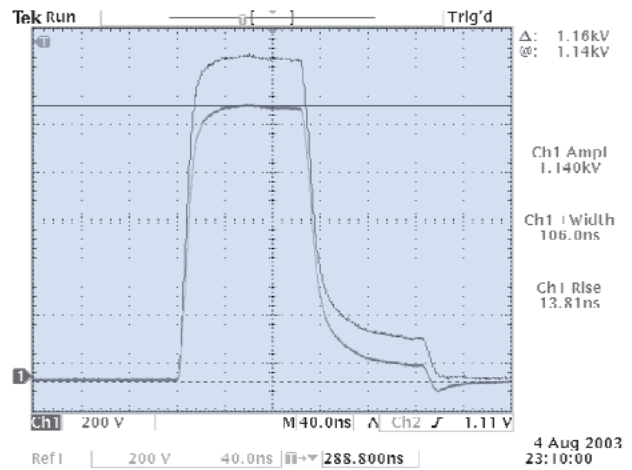


圖 6. 高壓短脈衝反射之波及其經過補償後的波形。Ref1 是未經過補償的波形，Ch1 是經過 176 Ω 阻補償後的波形。兩訊號之 V_0 皆為 3000 伏， C_d 長度為 11.579 公尺。

傳輸線、緩衝放大器、HTS31 內部電路延遲時間 (60 ns)，接著高壓短脈衝傳輸至負載 (圖 5(a)，Ch1)、最後經過探棒傳輸總共延遲 200 ns。同時，HTS31 正端的電壓下降 (圖 5(a)，Ref1)。最後，觸發脈衝結束 (圖 5(a)，Ch2)，HTS31 形成斷路，電纜開始充電，等待下一次放電。在實驗中，觸發脈衝皆為 100 Hz、4V。

比較圖 5(a) 中測量點 1 和測量點 2 量得的圖形，可以發現放電時兩者有電壓差約 350 V。這是來自於開關 HTS31 的內電阻。若使用一般實驗室中常用的 RG58 同軸電纜，整個線路的阻抗都是 50 Ω ，但是開關的內電阻會使電路變成 C_d 的 50 Ω 和開關內電阻串聯，再和負載 50 Ω 串聯，導致負載上的分壓，即輸出脈衝的電壓變小。

另外，若加上開關的內電阻，對 C_d 的輸出端而言，下游電路的阻抗將會比 50 Ω 還大，根據反射率定律，在高壓脈衝後端會產生正相的反射訊號 (見圖 6)。反射訊號產生的過程和上述訊號拉長兩倍的機制相似，參考圖 4，當高壓脈衝一抵達開關，反射訊號同時產生且回彈。由於高壓脈衝會拉長兩倍，它的脈寬剛好是反射訊號向後反彈，直到 R_1 再度反彈回來所需要的時間，因此這個阻抗不匹配造成的訊號會緊鄰高壓脈衝。

阻抗不匹配的反射訊號可以用圖 3 中的補償電阻 R_c 消除。 R_c 的作用在於與開關之後的電路並聯，調整 C_d 之後的電路使其在開關 on 時，等效阻抗為 50Ω ，訊號就不會反射。但 R_c 並聯會使開關下游電路的阻抗變小，因此在開關上的分壓變大，負載上的電壓會因此變低 (見圖 6)。因此，補償應根據使用者的需要斟酌使用。如果不在意脈衝的下降緣，或高電壓才是最主要的考量，就可以不用補償。

四、實測結果與討論

本測試使用三種不同長度的同軸電纜：6.515 公尺、11.515 公尺及 21.515 公尺，實際測量產生的高壓短脈衝寬度依序為 62.8 ns、106.7 ns 及 195.7 ns。根據計算可知，訊號在電纜中傳輸的速度為 2.31×10^8 m/s，所以訊號在 6.515 公尺、11.515 公尺及 21.515 公尺的同軸電纜中傳輸的時間依序應是 28.0 ns、50.31 ns 及 94.37 ns。仔細比較並扣除 6 ns 的系統性的加寬 (來自於 HTS31 的開啟速度及探棒的頻寬等等) 後，實測結果皆大約是 C_d 傳輸時間的兩倍而且正比於 C_d 的長度，印證原理中的說明。

比較圖 5 中測量點 1 和測量點 2 量得的圖形，可以發現放電時兩者有電壓差約 350 V。此電壓即是開關兩端的電壓。經由分壓電路計算，可以求得開關的內電阻為 14Ω 。

圖 6 中的訊號後端多出一個小的方波即是阻抗不完全匹配造成的反射訊號，大約 200 V。根據反射率定律計算，求出開關內電阻為 17Ω 在其他電壓的試驗中，發現開關的內電阻會因為電壓大小以及脈衝頻率而有所不同，而影響到短脈衝的電壓。對 50Ω 負載而言，1380 V 短脈衝可以產生 27.6 A 的瞬間大電流，最高可產生 38 kW 的瞬間功率。

圖 6 的測試結果顯示，高壓高頻脈衝的上升時間大約都在 12–13 ns 左右，但實際的上升時間應會更快。此誤差的主要來源是所用的高壓探棒 (Tektronix, P5100, 100X, 2500 V, 250 MHz) 頻寬不足。為了證明以上假設，使用頻寬 500 MHz 的低壓探棒 (Tektronix, P6139A, 10X, 300 V) 探測電纜放

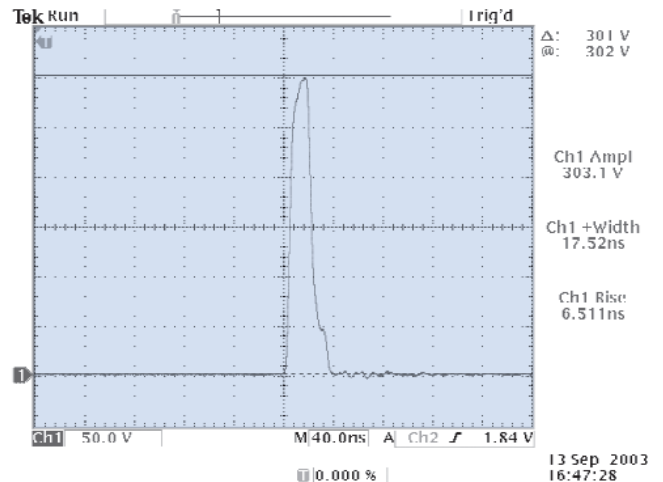


圖 7. 最短高頻脈衝實測結果。 C_d 是 1.512 公尺。 V_0 為 0.67 kV，沒有補償電阻。

電產生的 300 V 脈衝，其上升時間為 5.7 ns，當改回原用的 250 MHz 的高壓探棒來探測，上升時間就拉長到 10.0 ns。這表示高壓探棒的頻寬不足已經影響到高壓高頻脈衝的上升時間之測量，如果能用頻寬更寬的高壓探棒，應該就可以量到更接近實際情況的上升時間。這個困難目前因為設備侷限暫時無法突破，但至少可以確定，此高壓高頻脈衝的上升時間應會小於 10 ns。對 10 ns 的上升時間而言，1380 V 的方波，其變化速度 (slew rate) 為 1.38×10^{11} V/s，與同樣訴求的高壓脈衝產生裝置相比較，此高壓脈衝具有極佳的速度。

本電路可以產生的最短脈衝如圖 7 所示，脈寬為 17.5 ns。如果使用更短的放電電纜，產生的脈衝會因為上升時間和下降時間重疊而達不到應有的高度，於是脈寬變寬。本實驗使用的 HTS31 高壓開關上升時間為 5 ns，假設其他條件皆無缺陷，最短脈衝應可達到 10 ns。另外，礙於高壓探棒的頻寬不足，實際最短脈衝應該比圖上顯示的更短。

高壓短脈衝的信號抖動 (jitter) 亦有測試。以 DG535 訊號產生器產生的觸發脈衝為準，經緩衝放大電路放大後此信號抖動區間約為 640 ps，經過電纜放電產生的高壓短脈衝，其抖動區間變寬為 840 ps，可見主要的抖動來自於觸發的緩衝放大電路。以 11.515 公尺放電電纜產生的訊號 (脈寬 106.7 ns) 而言，抖動所佔的百分比為 0.8%，若以

最短脈寬 17.5 ns 而言，其百分比為 4.8 %，比例皆低。

相較於 Blumlein line 能輸出電壓為 V_0 的脈衝，此設計的理想輸出脈衝僅有 $V_0/2$ ，但 Blumlein line 似乎極不易做阻抗匹配，我們以 HTS31 來當作圖 1 中的開關，結果無法產生所要的方波，懷疑是 HTS31 的電阻過大所致。在低電壓時，用機械開關的效果雖然較好，但波形與穩定度遠不如圖 3 的設計。在這些測試中，不可避免地在同軸電纜端點的接線部分無法阻抗匹配，若此部分的長度不是太長，則不會造成顯著的影響。在圖 1 的 Blumlein line 電路中，非同軸電纜部分的長度已經縮減到 2 至 3 公分左右，但仍不能達到理想的波形，可見 Blumlein line 的阻抗匹配比圖 3 的設計要嚴格許多，造成實作上的困難。反觀圖 3 的設計，我們儘量讓非同軸電纜部分縮減到 5 至 7 公分左右 (受限於 HTS31 的形狀與尺寸)，得到的高壓短脈衝已經具有良好的波形和速度，而且十分穩定。

五、結論

綜觀以往諸多為產生高壓高頻脈衝而設計的電路或產品，為了兼顧高能量密度以及脈衝的速度與波形，往往必須耗費極高的成本，已致於大幅增加產品的價格。如何用更經濟的方法產生高壓高頻的脈衝，是一個極具挑戰性的課題。本高電壓脈衝產生電路最大的優點在於其使用的元件，如同軸電纜、高壓電源供應器、電子開關...等等，皆為實驗室中常見的設備。利用這些經濟普遍的元件互相組合，即可突破電子開關的脈寬限制，輸出脈寬小於 100 ns 的高壓脈衝，具有不下於高價產品的品質。脈寬利用傳輸線的長度控制，準確度可達次奈秒量級 (因測量儀器的限制，無實測數據)，同時因為負載之阻抗與傳輸線匹配，信號的波形不會受電纜長度影響。其輸出的高壓快速脈衝在 50 Ω 的負載時

功率極高。此電路產生的脈衝具有快速的上升時間，且具有極佳的穩定度，不易造成信號抖動的問題。此電路利用簡單快速的方式就能有不下於昂貴儀器的性能，值得廣泛地推廣與應用。

誌謝

感謝國科會補助 (NSC 92-2113-M-001-044)。

參考文獻

1. <http://www.behlke.de/>
2. Kentech Instruments Ltd., <http://www.kentech.co.uk/>
3. J. S. Blakemore, *J. Appl. Phys.*, **53**, 123 (1982).
4. Z. Z. Zeng and L. Y. Ma, *Review of Scientific Instruments*, **72**, 2448 (2001).
5. http://www.kentech.co.uk/transmission_lines/Blumlein_pfl.html
6. D. K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics*, 2nd ed. Reading Mass.: Addison-Wesley, Chapter 9 (1989).
7. J. H. Moore, C. C. Davis, and M.A. Coplan, *Building Scientific Apparatus*, 2nd ed., London: Addison-Wesley (1983).
8. H. Benson, *University Physics*, Rev. ed., New York: John Wiley (1996).
9. HTS31 的規格：耐壓為 3000 V，上升時間約為 5 ns，on-resistance 8 Ω ，最短脈衝為 100 ns。2002 年的價格約 726 歐元。
10. 呂助增，鄭博昆，實驗物理方法，初版，台北：聯經出版事業公司 (1990)。
11. 鄭博昆，應用電子學初版，台北：亞東書局 (1990)。

-
- 鍾介文小姐為國立清華大學物理系學生。
 - 林志民先生為國立台灣大學化學博士，現任中央研究院原子與分子科學研究所助理研究員，
 - Jieh-Wen Tsung is an undergraduate student in the Department of Physics at National Tsing Hua University.
 - Jim Jr-Min Lin received his Ph.D. in chemistry from National Taiwan University. He is currently an assistant research fellow in the Institute of Atomic and Molecular Science, Academia Sinica.