

# 雙極性類鋸齒波壓電驅動器開發探討

## The Study of Bipolar Sawtooth-Like Waveform Converter as PZT Driver

廖泰杉

Tai-Shan Liao

壓電材料之滯—滑效應設備取決於平台與支撐件材料的靜態和動態摩擦特性；它們不需要高精密機械元件，亦不受灰塵與其他擾動影響，廣泛地應用於壓電驅動位移裝置。單極性信號驅動壓電元件長期使用下會產生極化現象，而造成推動會有偏移現象，造成位移失準。為了解決壓電元件極化之疑慮，通常使用雙極性信號驅動壓電元件，利用電壓極性相反，可以抵銷極化現象。因此提出新型雙極性類鋸齒波驅動器開發探討，文中描述電路設計與測試結果，未來探針掃描顯微鏡與或其它穿隧掃描顯微鏡都可以使用上。

It does not require high-precision mechanical components, also free from dust and other disturbances because the apparatus with Stick-slip effect device depends on the platform and supports static and dynamic friction material characteristics for very wide application of piezoelectric displacement devices. Unipolar signal to drive the piezoelectric component under long-term use will produce polarization problem and cause displacement deviation. It is usually using the bi-directional signal to drive a piezoelectric components because the bi-directional signal with a voltage of opposite polarity can offset the polarization in order to solve doubts of polarized effect of piezoelectric components. Therefore, a bipolar sawtooth-like waveform converter as piezoelectric driver was presented. Circuit design and test results described in this article. This technique can be used by scanning probe microscope, or scanning tunneling microscope in the future.

### 一、前言

自 1982 年掃描探針顯微鏡<sup>(1)</sup>的發明，它一直是表面科學研究的重要工具，因為它主要涉及到使用微探針來檢測樣品表面納米或甚至原子尺度上的特徵及顯示試樣表面的三維特徵。截至目前為止，全世界已開發了幾十種類型的探針顯微鏡，這些包括可以獲得光學圖像的解析度為 500 Å 近場光學顯微鏡，測定體積分布之磁顯微鏡和化學力顯微鏡。

以及熱電的掃描探針顯微鏡、分析電子自旋之掃描探針顯微鏡、光電掃描探針顯微鏡、鐳射掃描探針顯微鏡、靜電顯微鏡與原子力顯微鏡等。然而，上述的掃描探針顯微鏡有一個常見的要求：應用不同類型的壓電工作平臺進行掃描。使用壓電工作平臺的主要原因是它們可以促進微米或奈米位移。所以利用滯滑摩擦產生的摩擦驅動平臺是常用於穿隧式顯微鏡探頭移動控制，滯滑摩擦產生的摩擦驅動壓電工作平臺是被正高電壓至負高壓 (+HV<sub>-</sub> -HV) 鋸

齒波信號驅動工作平台上之支撐件作類鋸齒波信號之運作;當外部鋸齒波電壓訊號以等速緩慢上升的過程並對致動器做輸入時,此時利用導引機構與滑台間的摩擦力,使滑台向前移;當類鋸齒波信號之急遽變化區間,此時慣性力遠大於靜力(含摩擦力)極限產生很高加速力,得以將滑台往前推出;當電壓降至最低點時,回到初始位置,而滑台因慣性的關係停留在原處,重複該動作,即可使滑台往前邁進,如此一來便能完成長行程逐步位移。這種驅動裝置於高真空環境下提供高可靠度與高重複性之運動,並且具有簡單與經濟之電子電路成本。每個壓電元件裝置可以用一條線接至地端,若安置於移動裝置上,則移動裝置不需要任何信號線與電源線。

## 二、壓電驅動器之發展

過去 40 年來,有關壓電驅動器之文獻已有多項成果被發表;例如, Park<sup>(2)</sup> 等作者於 1987 年發表掃描式電子顯微鏡文章,其文章裡討論到使用低電壓之運算放大器,高電壓雙極性電晶體,高阻值回授電阻組成高電壓之運算放大器,用以推動壓電元件之驅動電路裝置。1992 年 Clark<sup>(1)</sup> 等作者發表掃描式探針顯微鏡硬體之設計文章,該文章中使用數位轉換類比信號轉換器與高壓線性放大器組成一個高壓正弦信號產生器,用以推動壓電管元件。另外 Chen<sup>(4)</sup> 等學者發表 inchworm 壓電致動器之數位控制器之設計,其中控制器結構是由 MOS 電晶體組成高壓放大器,用以推動壓電致動器。1992 年 Wallace<sup>(5)</sup> 發表一篇 inchworm 移動裝置與電腦之間介面設計,其中同樣提到使用高壓雙極性電晶體,用以提升驅動移動裝置內之壓電元件之電路。Strom<sup>(6)</sup> 等人於 1995 年使用光耦合器、低壓高頻寬運算放大器、4 個 N 型雙極性電晶體、4 個 P 型雙極性電晶體及回授電路組成線性高壓運算放大器,用以驅動掃描式探針穿隧顯微鏡內之壓電致動器電路。Eng<sup>(7)</sup> 等學者於 1996 年發表可用於空氣中或真空中環境的滯滑運動之控制電路,其中使用正負 15 V 電源與變壓器實現 800 V 高電壓之斜坡之信號,用以推動具滯滑運動之壓電制動器。在 1999 年期間 Pelekhov<sup>(8)</sup> 等人發表原子力顯微鏡之應用,

其中高壓放大器,主要由低壓運算放大器與 4 個 NPN 雙極性電晶體組成,用以驅動原子力顯微鏡內之壓電元件。Marrion<sup>(9)</sup> 等學者發表一篇探討有關壓電致步裝置 (piezowalker) 與摩擦組態之間動態性質,其中僅用到四分之一單極性正弦波推動壓電元件。

Colclough<sup>(10)</sup> 於 2000 年發表一個直流耦合之金氧半場效應電晶體放大器組成高壓放大器,提供 200 V 與 340 mA 雙極性高壓輸出推動壓電元件,此類高壓放大器具有經濟成本低與最少元件數,優於其他類比式高壓放大器之設計。Ting<sup>(11)</sup> 於 2001 年利用 3 個高速電流式運算放大器, N 型金氧半場效應電晶體放大器高壓放大器與 P 型金氧半場效應電晶體之對稱式架構組成高速電流式高壓放大器,並成功地應用於近場光學掃描顯微鏡。2004 年,蔡<sup>(12)</sup> 等多位學者利用 1 個低壓運算放大器、多個 N 型金氧半場效應電晶體放大器與 P 型金氧半場效應電晶體組成串接對稱式架構的線性高壓放大器,輸出高壓可達 1800 V<sub>pp</sub>, 並成功應用於推動需要高壓之壓電元件。

Duggal<sup>(13)</sup> 等人於 2004 年利用具有 NPN 雙極性電晶體與 PNP 雙極性電晶體之電流鏡架構電路與低壓運算放大器,組成線性高壓放大器,以利驅動壓電元件。由於驅動壓電元件之電路特性易受小信號頻寬、輸出阻抗、傳輸線阻抗、功率消逸等因素之限制,因此 Fleming<sup>(14)</sup> 等人提出利用低壓高速運算放大器之雙運算放大器架構組成線性高壓放大器,有效改進 100 nF 高電容性之壓電管負載之運作,此種架構之小信號頻寬最大可達 2 MHz。

Flaxer<sup>(15)</sup> 於 2010 年發表一款迷你型之教育用途之掃描穿隧顯微鏡,使用數位轉類比之轉換器與高壓運算放大器推動掃描穿隧顯微鏡一壓電管。2011 年, Gao and Wu<sup>(16)</sup> 兩位學者針對驅動功率放大電路與壓電元件之寄生電容之間作一項研究,並把實驗結果作一比對討論,此項研究有助於驅動壓電管負載或壓電元件之電路設計。以上文獻所提出討論,幾乎聚焦於如何設計驅動壓電制動器之線性高壓運算放大器電路。

基本上壓電元件有兩種運作模式,第一種模式是作為精細掃描調控,此種狀況下執行對策式樣品

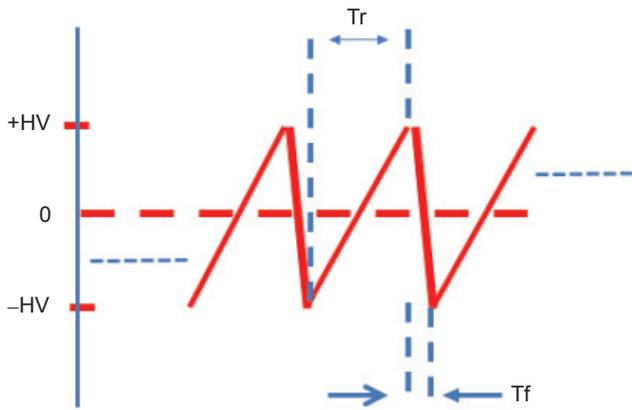


圖 1. 類鋸齒波信號之緩慢斜坡 ( $T_r$ ) 段與之急遽變化 ( $T_f$ ) 區間示意圖。

精細掃描，掃描距離約為微米等級或者是更小距離。第二種模式是利用慣性滯滑效應或摩擦助步原理產生重複步進運動，此種模式可以運動較長距離，約毫米之距離。第二種模式較常用於粗疏定位移動，而不用於攫取資料之掃描，不過亦有摩擦力顯微鏡利用慣性滯滑效應觀測到原子等級大小尺度之性能。使用滯滑摩擦移動概念於壓電制動器之移動設計甚少被討論。上述文獻亦只有 1996 年與 1999 年分別被 Eng 等人與 Mariotto 等人提出，不過他們亦只提出單極性鋸齒波與單極性四分之一正弦波去驅動壓電元件，更不用說單擊發動作如何運作。

### 三、雙極性類鋸齒波產生器發展

但是單極性信號驅動壓電元件長期使用下會產生極化現象，而造成推動會有偏移現象造成位移失準，為了解決極化之疑慮，通常使用雙極性信號驅動壓電元件，利用電壓極性相反可以抵銷極化現象，故雙極性之信號優點含有正負電壓對稱特性，是可以讓壓電元件長期使用下不會產生極化現象，先進之壓電致動器多採用雙極性信號區動。單擊發動作之優點是可以讓壓電元件組成之移動件作單步位移之調整。因此 2008 年筆者曾提出單擊發雙極性波形產生裝置及方法專利<sup>(17)</sup>。此裝置包含一時脈波形產生器，用以產生一作為基本時脈頻率之方波與一三角波；一除數電路，電連接於該時脈波形

產生電路；一時脈同步觸發開控產生電路，電連接於該除數電路與該單擊發電路，產生一寬度為該基本時脈頻率之 2 倍之開控信號，該開控信號之上升緣與該基本時脈頻率之上升緣同步，以精確截切一個週期之該基本時脈頻率。該波形產生裝置係用以產生單擊發雙極性負斜率鋸齒波與雙極性正斜率鋸齒波、單擊發雙極性正弦波或方波。這個作法是採用三角波分解與整合出正負斜率鋸齒波，因此方式用於高頻電路運作會有相位失調，造成信號失真問題，為解決此高頻運作問題，於本文提出新的改良式之單擊發雙極性類鋸齒波電路設計。

### 四、單擊發雙極性類鋸齒波轉換系統原理

本文所提一個類鋸齒波信號壓電工作平台是被正高電壓 (+HV) 至負高電壓 (-HV) 的鋸齒波信號驅動如圖 1 所示，此信號促成工作平台上之支撐件之運作。

圖 1 中類鋸齒波信號之緩慢斜坡 ( $T_r$ ) 段是使工作台跟著支撐件運動；當圖 1 中類鋸齒波信號之急遽變化 ( $T_f$ ) 區間，此時慣性力遠大於靜力極限，產生很高加速力，動態摩擦過程決定此區間類鋸齒波信號之相位和能量的耗散；總而言之，造成工作台上支撐件滑動是工作台與支撐件其淨運動結果。從微觀角度來看，因為機構件恢復塑性變形和機構件表面原子的重排必須首先發生，故機構件兩個表面之間侷域的膠粘特性界面將產生一個特定時間閾值以上，摩擦力不會返回其靜態值，除非機構件表面保持靜止，且有足夠長的時間形成新的物理化學界面。所以低滑動速度愈慢，其造成滯滑現象愈嚴重，就如同摩擦裝置中軟弱的彈簧一樣。此外，圖 1 中滯滑週期 ( $T_p$ ) 造成滑動部分移動的距離小於機構件表面交界處的尺寸，則機構件滯滑的趨勢受到抑制。單擊發雙極性類鋸齒波轉換器之電路方塊圖如圖 2 所示

本轉換器由斜坡波發生器，交流耦合器 ( $R1$  和  $C1$ )，零交越電路，除 2 電路，同步開控制電路，單穩態電路和類比開關組成。斜坡發生器可以產生週期信號為  $2W$  的鋸齒波。這個斜坡週期信號通過

交流信號耦合，形成對稱的雙極性週期性類鋸齒波。雙極性類鋸齒波如圖 3 左邊所示，信號從零點電壓開始，以一固定斜率上升至最高點正電壓後瞬間降至最低點負電壓後，再以一同樣固定斜率升至零點電壓，此稱為正斜率雙極性類鋸齒波信號，重複此信號產出稱為週期性正斜率雙極性類鋸齒波信號。反之，信號從零點電壓開始，以一固定斜率下降至最低點負電壓後，瞬間降至最高點正電壓後，再以一同樣固定斜下降至零點電壓，此稱為負斜率雙極性類鋸齒波信號，重複此信號產出稱為週期性負斜率雙極性類鋸齒波信號，如圖 3 右邊所示。

雙極性鋸齒波被發送至類比開關和零交越電路的輸入端。零交越電路可以產生週期性的方波，並同步於同周期之斜坡。數位除 2 分頻計數電路可以生成對稱工作比的脈波  $2w$  寬度之週期性方波，其週期為  $4w$ 。同步閘控制電路接受脈波  $2w$  寬度之週期性方波和  $2w$  脈衝寬度單穩態信號。單穩電路產生具有大於  $2w$  寬度之單觸發信號脈沖觸發同步

閘控電路後，然後該同步閘控電路可以輸出產生同步於輸入週期性  $2w$  寬度之週期性方波之  $2w$  的寬度單擊發脈波觸發類比開關導通。特別是，同步閘控制電路的輸出的一個  $2w$  寬度脈衝信號的上升緣同步到雙極性斜坡上升緣和電路接地的零交越點。在此  $2w$  寬度時間長度後，同步閘控制電路的輸出的一個  $2w$  寬度脈衝信號的下降緣關閉類比開關；同步閘控制電路完整輸出的單一信號，使得類比開關輸出，並得到一個雙極性類鋸齒波輸出，同時可選擇成單擊發雙極性類鋸齒形波輸出。

### 五、轉換器電路設計

圖 3 為單極性斜坡對雙極性類鋸齒波信號轉換器的設計電路，其中 IC1 (NE555) 與 Q1 電晶體，基納二極體 (D1) 等所構成定電流電路組成斜坡波形發生器，產生一個具有間寬度  $2w$  之斜坡信號，此信號之頻率由可變電阻器 (VR1) 和電容器 (C1)

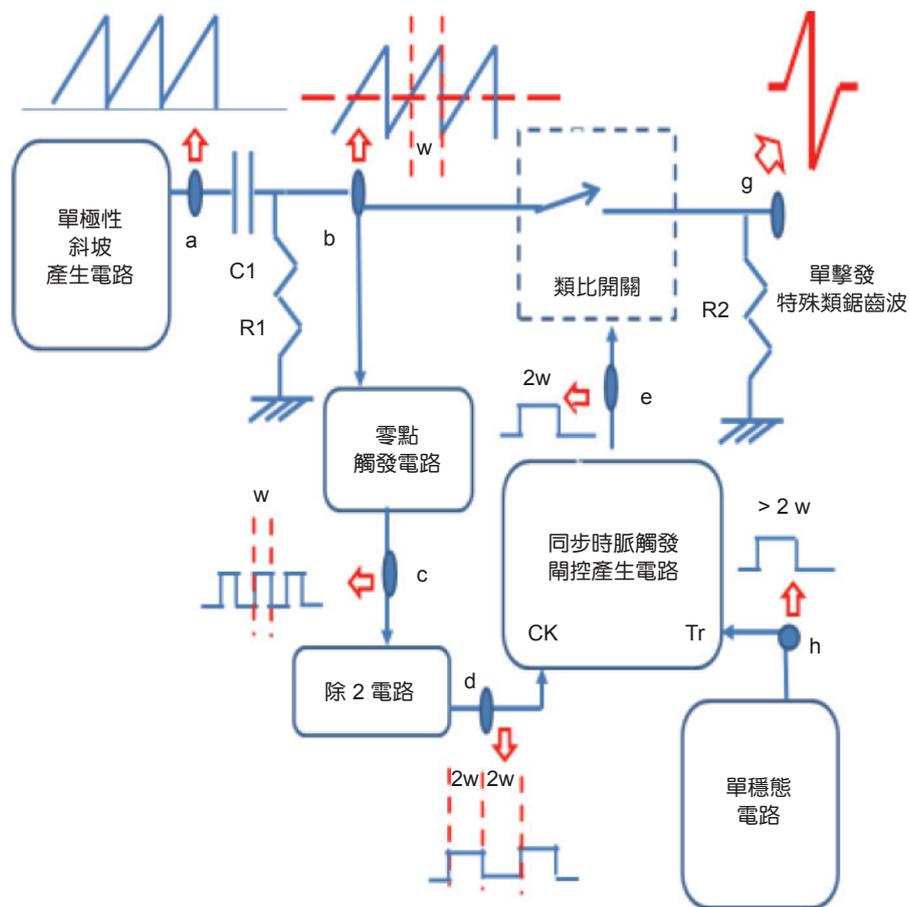


圖 2. 單擊發雙極性類鋸齒波轉換器方塊圖。

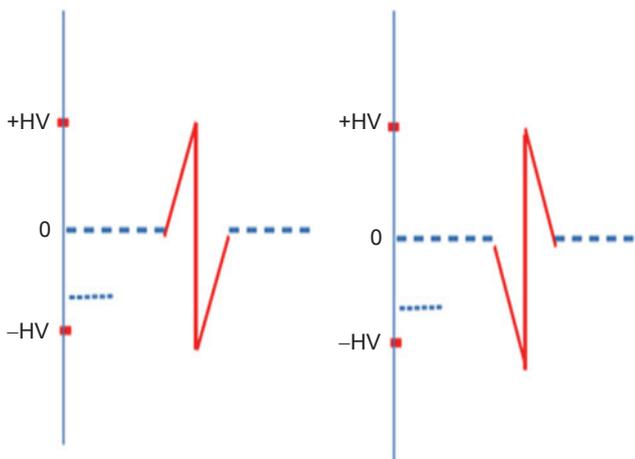


圖 3. 左為正斜率，右為負斜率雙極性類鋸齒波示意圖。

的值來決定。電阻  $R_5$  和電容  $C_2$ ，構成一個交流信號 (AC) 耦合器，可將單極性之斜坡信號變成雙極性之斜坡信號。運算放大器 (A1, A2) 扮演緩衝器，且能提供阻抗匹配，以保證不會和下一級產生負載效應。

運算放大器 (A3) 具有很高回授電阻，並扮演一個零交越 (zero-crossing) 功能之電路，自動把雙極性之斜坡信號變成雙極性之方波信號。二極體 (D2) 箝制雙極性方波信號為單極性方波信號，供給下一級數位除法計數電路用。除法計數電路是由積體電路 IC3 (CD4013) 所構成除 2 電路，此除法計數電路輸出具工作比為對稱 50% 之方波波形，其週期為雙極性之斜坡信號之 2 倍。同步閘門控制電路具有六個三輸入非及閘 (NAND) 之積體電路 (N1-N6)。N4 非及閘輸出為同步閘門控制電路之輸出，且接至電阻 ( $R_{11}$ ) 之一端，提供單擊發同步觸控信號，N6 非及閘 2 輸入接至 N2 非及閘 1 輸入與單穩態電路輸出。總而言之，整個同步閘門控制電路之輸出，是由 N4 非及閘輸出擔任，同步閘門控制電路之 2 輸入分別由 N1 非及閘之 1 輸入，N2 非及閘之 1 輸入與 N6 非及閘之 2 輸入，並接端扮演。IC2 (CA555) 用來做一個單穩態電路，當單擊發壓控開關起動一次時，產生一個單擊發信號。此單擊發信號時間寬度由電阻 ( $R_4$ ) 與電容 ( $C_6$ ) 來決定。IC2 類比積體電路的第 3 端提供一個單擊發信號至同步閘門控制電路的 N6 非及閘輸入。基本

上，此單擊發信號時間寬度需大於斜坡週期時間寬度。IC4 類比積體電路是類比開關，其電源需要大於 5 V 工作電壓才能正常運作。因為雙極性週期性類鋸齒波需要正負對稱電源，所以 IC4 類比積體電路類比開關電源端可用正負 5 V 電壓供給，如此才能使雙極性週期性類鋸齒波進入 IC4 類比積體電路類比開關之輸入，當選用 IC4 類比積體電路類比開關啟動時，雙極性類鋸齒波進入 IC4 類比積體電路類比開關之輸出送出雙極性類鋸齒波信號。

單刀雙擲開關 (Switch A) 有 3 個接觸點，標記為 sAa, sAb 與 sAc。單刀雙擲開關 (switch A) 之 sAc 接觸點與 IC4 類比積體電路類比開關之第 6 端腳輸入連接；當單刀雙擲開關 (switch A) 之接觸點 sAa 與 sAb 相接合時，IC4 類比積體電路類比開關之輸入與輸出是啟動連通 (on) 狀態。當單刀雙擲開關 (switch A) 之接觸點 sAa 與 sAc 相接合時，且由 N4 非及閘擔任同步閘門控制電路之輸出為高電位 (H) 時，此高電位 (H) 信號經由電阻 ( $R_{10}$ ) 與單刀雙擲開關 (switch A) 之接觸點 sAa 與 sAc 相接路徑，送至 IC4 類比積體電路類比開關之輸入，則 IC4 類比積體電路類比開關之輸入與輸出是斷開 (off) 狀態，除非同步閘門控制電路之輸出為低電位 (L) 時，才能使 IC4 類比積體電路類比開關之輸入與輸出是導通 (on) 狀態。

運算放大器 (A5) 是為緩衝器，是避免轉換器輸出與反向放大器 (A6) 之間電阻網路之負載效應產出。運算放大器 A7 與 A9 為緩衝器，運算放大器 A6 與 A8 為反向放大器；運算放大器 A6 為反向放大器提供負斜率之雙極性類鋸齒波信號，其增益可調；運算放大器 A8 反向放大器其增益為一倍，僅只是將負斜率之雙極性類鋸齒波信號，轉圓成正斜率之雙極性類鋸齒波信號；緩衝器 (A7 與 A9) 是避免轉換器輸出與反向放大器 (A6 與 A8) 之間電阻網路之產生負載效應。單刀雙擲開關 (Switch B) 有 3 個接觸點，標記為 sBa, sBb 與 sBc。當單刀雙擲開關 (Switch B) 之 sBa 與 sBc 接觸點接合時，轉換器提供負斜率之雙極性類鋸齒波信號輸出，當單刀雙擲開關 (Switch B) 之 sBa 與 sBc 接觸點接合時，轉換器提供正斜率之雙極性類鋸齒波信號輸出。

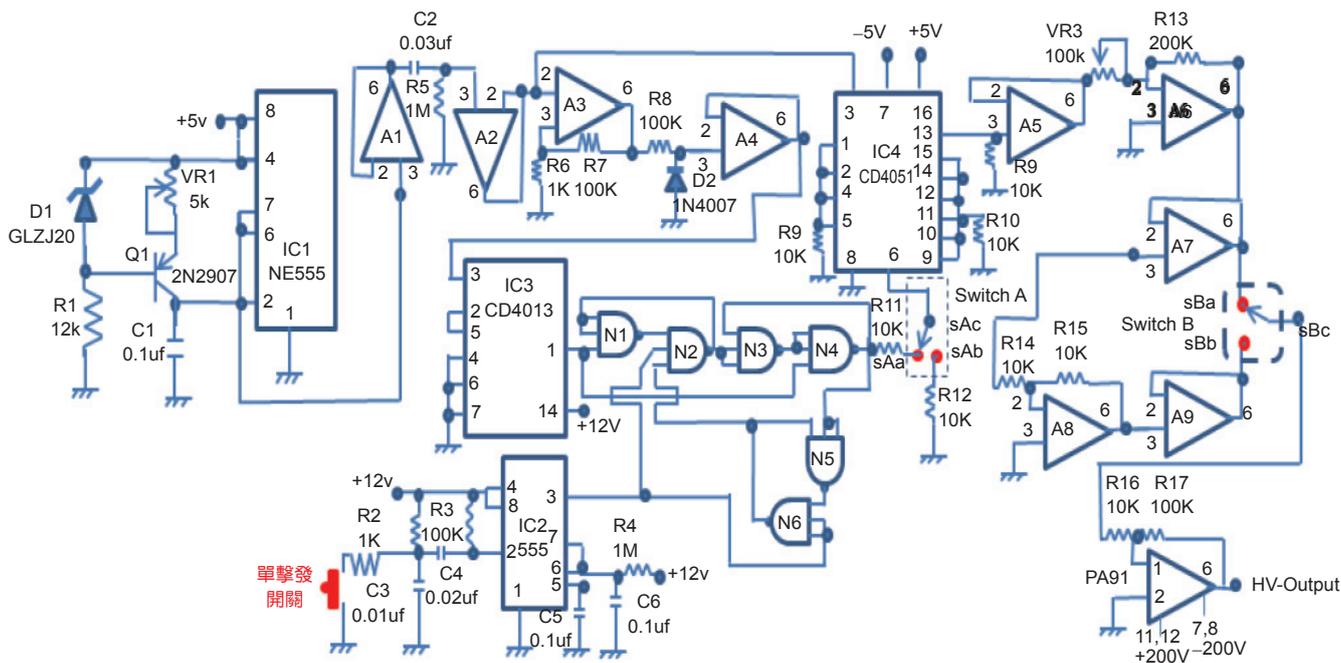


圖 4. 單極性斜坡對雙極性類鋸齒波信號轉換器電路。

## 六、電路測試與討論

圖 4 為說明整體單擊發雙極性類鋸齒波驅動滑動面上之滯滑電路裝置之實驗輸出波型結果。圖 4 上波形圖為單擊發同步信號輸出，下圖為單擊發正斜率之雙極性類鋸齒波信號輸出，週期時間寬度為 12 ms。

本文所提出雙極性類鋸齒波驅動器，最後搭配一個高頻寬線性放大器<sup>(18)</sup> (PA92, PA95 & PA94)，實驗驗證於數十微秒內由正高電壓瞬間急遽降至負高電壓，已經可以推動壓電元件或壓電管，未來開發強化前置信號電路處理與線徑之雜散電容之降低，預期正負高電壓瞬間電壓變化，可優於 10 us 之內。總而言之，精密定位是現代掃描顯微鏡、加工機、工具機或其他科學研究儀器設備所不可或缺，因此有許多不同種類之精密移動驅動裝置被開發，尤其是使用改良技術直流或步進馬達定位裝置。無論如何，這些電機馬達裝置需要磁鐵裝置，並且引發磁場問題限制了應用與體積無法縮小。微奈米級之定位是奈米科學和奈米技術領域的關鍵問題之一。奈米級精度之調整，移位和旋轉亦是許多小型、低成本的儀器設備之期望與要求。

拜近代科學材料技術進步之賜，壓電元件同時具有高頻率響應、高電能與機械能轉換效率和相當小的熱膨脹等特性。並可利用壓電元件之瞬間衝擊力來克服滑動面上之間的滯滑 (stick-slip) 現象，達到精密位置控制能力。雖然壓電元件容易受本身材料遲滯現象 (hysteresis) 的影響，在位移上並非

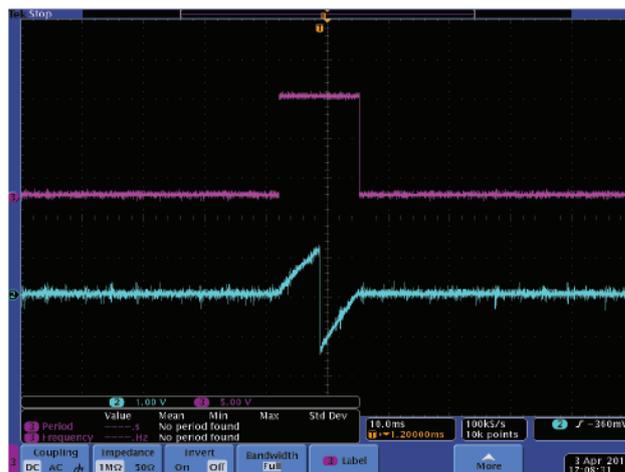


圖 5. 上波形圖為單擊發同步信號輸出，下波形圖為單擊發正斜率之雙極性類鋸齒波信號輸出。

完全線性的表現，然而可經由回授控制後，仍能使系統擁有奈米左右的精度。

目前最新之壓電驅動裝置原理植基於在一個可被高加速的支撐件與平台上之間的慣性滑動。這些壓電元件之滯－滑設備取決於平台與支撐件材料的靜態和動態摩擦特性。它們不需要高精密機械元件，亦不受灰塵與其他擾動影響，廣泛地應用於驅動位移裝置，本文所討論雙極性類鋸齒波產生器正是可應用於此種壓電平台之驅動電路。

## 參考文獻

1. G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, and E. Weibe., *Phys. Rev. Lett.*, **49**, 57 (1982).
2. S.-II Park and C. F. Quate, *Rev. Sci. Instrum.*, **58** (1987).
3. S. M. Clark, D. R. Baselt, C. F. Spence, M. G. Youngquist, and J. D. Baldeschwieler, *Rev. Sci. Instrum.*, **63**, 4296 (1992).
4. X. Chen, B. Cousins, M. McEllistrem, and R. J. Hamers, *Rev. Sci. Instrum.*, **63** (10), 4308 (1992).
5. J. L. Wallace, *Meas. Sci. Technol.*, **5**, 861 (1994).
6. V. Strom, R. D. Gomez, J. Nogues, B. Rodell, and K. V. Rao, *Meas. Sci. Technol.*, **6**, 1072 (1995).
7. L. M. Eng, F. Eng, Ch. Seuret, A. Kundig, and P. Gunter, *Rev. Sci. Instrum.*, **67**, 401 (1996).
8. D. V. Pelekhov, J. B. Becker, and G. Nunes, Jr., *Rev. Sci.*

*Instrum.*, **70**, 114 (1999).

9. G. Mariotto, M. D'Angelo, and I. V. Shvets, *Rev. Sci. Instrum.*, **70**, 3651, (1999).
10. M. S. Colclough, *Rev. Sci. Instrum.*, **71**, 4323 (2000).
11. J. Ting, EDN, 136 (2001).
12. J. I. Tsai, J. M. Shieh, T. S. Liao, and, C. C. Teng, EDN, 110 (2004).
13. D. Bipin, EDN, 100 (2004).
14. A. J. Fleming, *Rev. Sci. Instrum.*, **80**, 104701 (2009).
15. E. Flaxer, *Microscopy: Science, Technology, Applications and Education*, 1280, (2010).
16. B. Gao and G. Wu, *Cloud Computing and Intelligence Systems (CCIS)*, IEEE International Conference, 564 (2011).
17. 中華民國發明專利\_I 298976.
18. APEXMICROTECH.COM.



廖泰杉先生為中原大學電子工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員。

Tai-Shan Liao received his Ph.D. in electronic engineering from Chung Yuang Christian University. He is currently a researcher in Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.