

# 儀器電源電路設計與應用實務

## Instrument Power Electronic Designs and Applications

廖泰杉

Tai-Shan Liao

本文介紹國科會精密儀器發展中心應學術界與工業界需求所開發之低電壓驅動電路模組、1000 V / 10 W 高壓電源驅動模組及雙極性高壓放大器，供各位讀者參考，並歡迎技術移

In this paper, some apparatus were presented such as light emitting element driver employing single 1.5 V cell, 1000 V / 10 W high voltage module and bipolar high voltage amplifier. These products were applied by industrial companies and some universities. The transference of these techniques is welcomed.

### 一、前言

電源電路是任何電子儀器、設備、工具及產品所必備之必要技術，基本上可分為兩類，第一類是線性電源，第二類是交換式電源。線性電源體積重、效率差，但是電源品質可設計到最好；交換式電源是目前任何電子產品之主流，舉凡電腦用電源，HID 燈之電源、控制器等都得到。隨著電子材料的發展，交換式電源體積可以愈做愈小、效率愈做愈高，這也是目前電子產品所使用之電源主流。交換式電源對於電壓的輸出可分為升壓及降壓技術。交換式電源技術型態可分為順向式、半橋式、全橋式與驅返式。而控制方式又有頻率調變控制 (PFM)，脈衝寬度調變 (PWM) 及變頻式等多樣化之產生，並可以依照不同需求使用不同技術與技巧來實現。在此不介紹現行市場上的使用商用電源，而是介紹最近兩年來學術界及工業界要求國科會精密儀器發展中心 (以下簡稱精儀中心) 電子課

所提供的電源電路設計服務，讓喜好電源電路設計之讀者，在商用電源之外的天地，互相切磋研究，精益求精。

### 二、低電壓電源之發展

低電壓驅動電路裝置元件目前已有相當多的產品規格，其中能夠以 1 V 以下的電源電壓驅動電路裝置元件如表 1 所示，這意味單電池電壓就可驅動低功率電路，相當適用於掌上型及可攜式產品。

此種單電池就可升壓分為如下幾個方式：

- (1) 電荷幫浦方式；
- (2) 利用變壓器去提高電壓方式；
- (3) 低壓振盪信號與倍壓器結合方式；
- (4) 低壓振盪信號與小電感方式。

電荷幫浦方式雖然可以作為升壓動作方式，但是單個電荷幫浦方式升壓倍數大約 1 至 2 倍左右，若要把電壓從 1 V 升至 3 V 以上，需要串接 2 個電

表 1.  
低電壓控制積體電路晶片比較表。

型號	輸入電壓 (V)	輸出電壓 (V)	輸出最大電流 (mA)	最佳效率 (%)	製造商
TPS61000	0.8–3.6	1.5–3.3	100	80	TI
TPS61010	0.8–3.3	1.5–3.3	200	92	TI
TPS61016	0.8–3.3	1.5–3.3	200	92	TI
LTC3400	0.85–5	2.5–5.5	300	95	Linear
LTC3401	0.5–5	2.6–5.5	600	97	Linear
LTC3423	0.5–5	2.6–5.5	1200	95	Linear
LTC3424	0.5–5	1.5–5.5	1200	95	Linear
MAX856	0.8–1.65	3.3–5	100	80	Maxim
RT9261	0.85–7	1.5–5	×	75	Richtek
RT9262	1–6.5	Adj	×	90	Richtek
RT9263	1–6.5	Adj	×	90	Richtek
RT9266	1–6.5	Adj	×	90	Richtek
RT9267	1–6.5	Adj	×	90	Richtek
RT9269	1–6.5	Adj	×	90	Richtek
UCC39413	0.8–3.8	3.3	200	85	Untriode
UCC39413	1–5.5	5	500	85	Untriode
UCC39412	1–3.8	3.3	60	85	Untriode

荷幫浦方式電路裝置，且其為 MOS 結構，電源電壓在 1 V 以下並不易正常工作，故實際上將其用在單電池工作並不是很理想。第二種方式是利用變壓器來提升電壓，但是變壓器用於低電壓驅動電路裝置體積太大且價格太高，故亦不合宜。第三種方式使用二極體與電容的倍壓器電路，是其效率差與升壓輸出阻抗過高，亦是不盡理想。第四種方式為低壓振盪信號小電感方式，為目前最常用之方式，其利用低電壓振盪信號驅動主電晶體作為開關，而小電感受主電晶體開關控制，當高頻信號控制開關切換，電感有儲能作用，且因電感之特性，瞬間會有感應脈衝高壓產生，因而產生低壓至高壓之轉換。

表 1 所提供之積體電路晶片是目前市場流通的產品，其控制方式大部分是頻率調變方式 (PFM) 及脈衝寬度調變方式 (PWM)，國外報價為單價每 1000 顆內 1.5 美金，國產品單顆為新台幣 5 元至 20 元，國內外單價差距十分明顯，當然有些功能上是有差異的。低功率及低輸出電流以國內產品最為經濟，但是高功率及高輸出電流似乎國外產品略勝國內產品，主要是因為國內類比積體電路晶片設計與製造技術仍然落後歐美國家。

### 三、低電壓電源之應用

發光元件如 LED、雷射二極體、冷光管在生活上應用很廣，例如掌上型儀具或工具儘可能使用低電壓源。發光元件 (LED) 或雷射二極體之臨界啟動電壓都在 1.6 V 以上，單顆電池一般約 1.5 V，故不能直接推動發光元件。倘若要以最經濟之方式且使用單顆 1.5 V 電池來推動發光元件，可使用以下兩種升壓電路：

- (1) 負阻抗與電感 (L) 電容 (C) 組成升壓振盪電路；
- (2) 馳張振盪電路與電感 (L) 組成升壓振盪電路。

#### 1. 負阻抗與電感電容組成升壓振盪電路

任何實際電感與電容皆非理想，多多少少含有電阻成分，如圖 1 所示。電容與電感並聯，有一寄

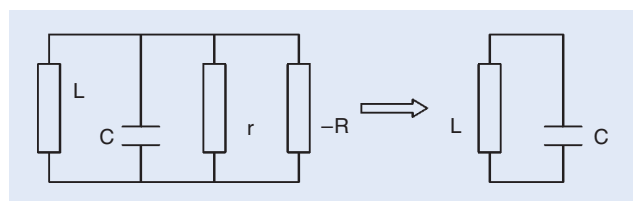


圖 1. LC 電路與負阻抗關係圖。

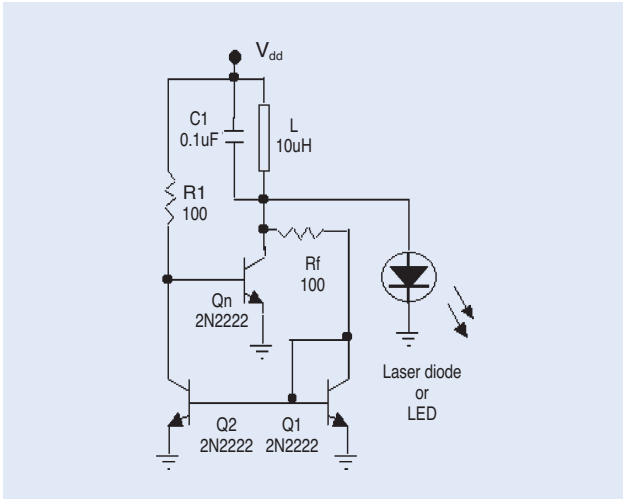


圖 2. 負阻抗電路與低電壓驅動發光元件。

生電阻  $r$ ，倘若並聯一負電阻  $(-R)$ ，使負電阻消除 LC 並聯電路之正電阻，則就變成單純 LC 諧振電路。

由拉普拉斯轉換計算，其共振頻率為  $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ ；再由電感之自然逆抗特性產生好幾倍施加電壓之脈衝振幅，如此就可以用很低之工作電源，在電感之連接點得到高於發光元件臨界啟動電壓。

圖 2 為使用 3 個 2N2222NPN 電晶體所組成的負阻抗電路。假設三個電晶體之電流增益  $h_{fe}$  都一樣，則由此電路  $V$  點看進去，其電流  $I$  與  $V$  電壓關係如下式：

$$I = \beta \frac{V_{dd} - V_{bc}}{R_f} + \beta \frac{V_{bc}}{R_f} - \frac{\beta}{R_f} V$$

由上式知負電阻與  $R_f$  電阻有關， $R_f$  不能太大。負阻抗與 LC 電路組成一自激式正弦振盪電路，其頻率  $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ ；此電路振盪頻率愈高，其電感端電壓振幅愈大，但整體耗功率也愈大。若  $L = 10 \mu\text{H}$ 、 $C = 0.1 \mu\text{F}$ 、 $R_i = R_f = 100 \Omega$ ，則量測到的振盪頻率約 167 kHz；輸入工作電源 ( $V_{dd}$ ) 為 0.907 V，則可使紅光雷射二極體有 1.7 mW 功率輸出，但總消耗功率約 40 mW。圖 3 之量測波形為工作電源 0.85 V 時，驅動紅光 LED 之情形。

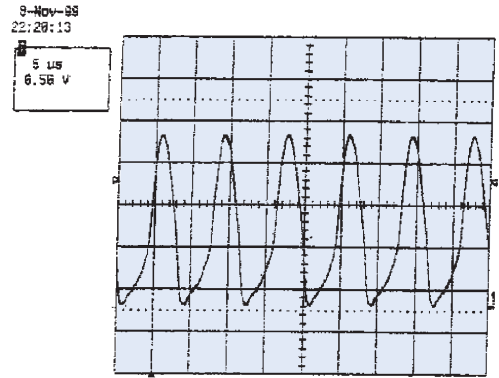


圖 3. 量測波形為工作電源 0.85 V 時，驅動紅光 LED 之情形。

## 2. 馳張振盪電路與電感組成升壓振盪電路

馳張振盪器與電感合併在一起就可產生比工作電源還高的振盪電壓，圖 4 為兩個電晶體、一個接地偏壓電阻與一個回授電容所組成低壓驅動發光元件電路。此電路係將二個共射極放大電路串接，一個 NPN 共射極放大器透過回授電容接至 PNP 共射性放大器之基極，PNP 共射性放大器之集極接至 NPN 共射極放大器之基極。如此可構成一回授電路，且合乎巴克豪生迴路增益準則 ( $Av\beta \geq 1$ )，整個迴路相移  $360^\circ$ 。接地電阻  $R$  則為一偏壓電阻，振盪器之主電晶體為 NPN；此電路最小啟振工作電源為 0.775 V。若  $R = 10 \text{ k}\Omega$ 、 $C = 56 \text{ pF}$ 、 $L = 10 \mu\text{H}$ ，則振盪頻率約 625 kHz。若工作電源  $V_{dd} = 1 \text{ V}$ ，可以驅動紅光 LED 有產生 800 mcd 輸出，或藍光 LED 產生 500 mcd 輸出，其工作波形如圖 5 所示。

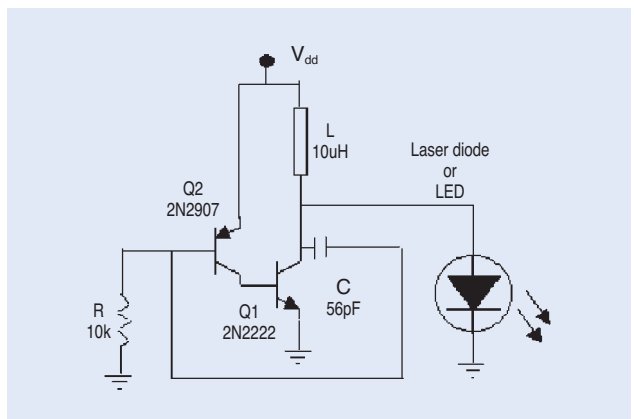


圖 4. 低電壓來驅動發光元件 (中華民國新型專利 192662 號，美國專利 US6603342B2)。

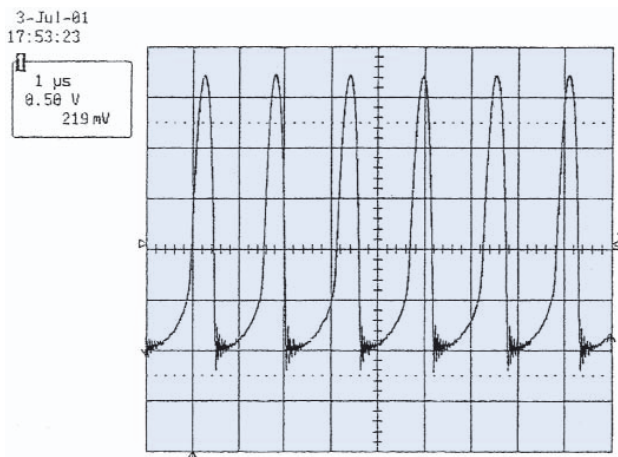


圖 5.  $R = 10\text{ k}\Omega$ 、 $C = 56\text{ pF}$ 、 $L = 10\text{ mH}$ ，振盪波形約 3 V。

上述電路是一種更為經濟且可節省電路板空間之應用電路 (如圖 6)。

## 四、低功率 1000 V 高壓電源模組

高壓應用範圍非常廣泛，舉凡壓電材料之推廣、光電倍增管、食品科技之殺菌等都使用高壓。在此我們介紹一種交換式 1000 V 高壓電源提供給讀者參考。

圖 7 為 1000 V 高壓驅動器電路圖，採離線式

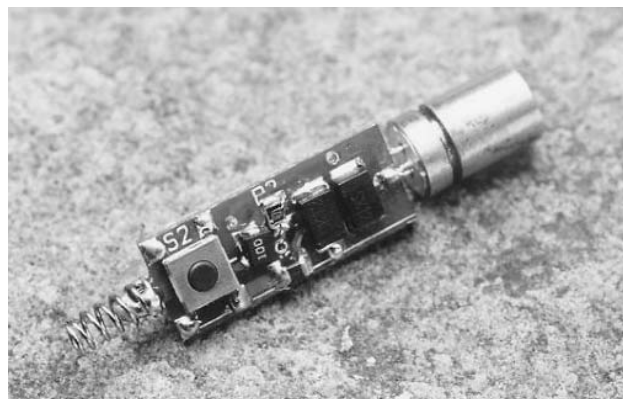


圖 6. 低電壓驅動雷射模組。

設計。在此電路中控制 IC 採用 SG384X 系列設計 (或替代品 UC3844)，此種控制 IC (SG3844) 其功能如圖 8 所示。其特徵係省電流，僅需  $30\text{ }\mu\text{A}$ ，故  $R_1$  ( $100\text{ k}\Omega$ ) 限制啟動電流。工作電流約  $3.8\text{ mA}$ ，低的工作電流能夠提供最好的電源效率及降低  $V_{cc}$  保持電容的需求。

SG3844 的振盪頻率  $f = 1.72 / R_4 (\text{k}\Omega) \times C_{10} (\mu\text{F})$ 。因有內建除 2 電路，其最大工作比為 50%，故其交換頻率為一半振盪器之工作頻率。SG3844 內誤差放大器之反向輸入與輸出分別接至回授端 (FB) (pin 2) 及 COMP (pin 3) 補償端，誤差放大器之正向端輸入接至內部 +2.5 V 固定偏壓。SG3844

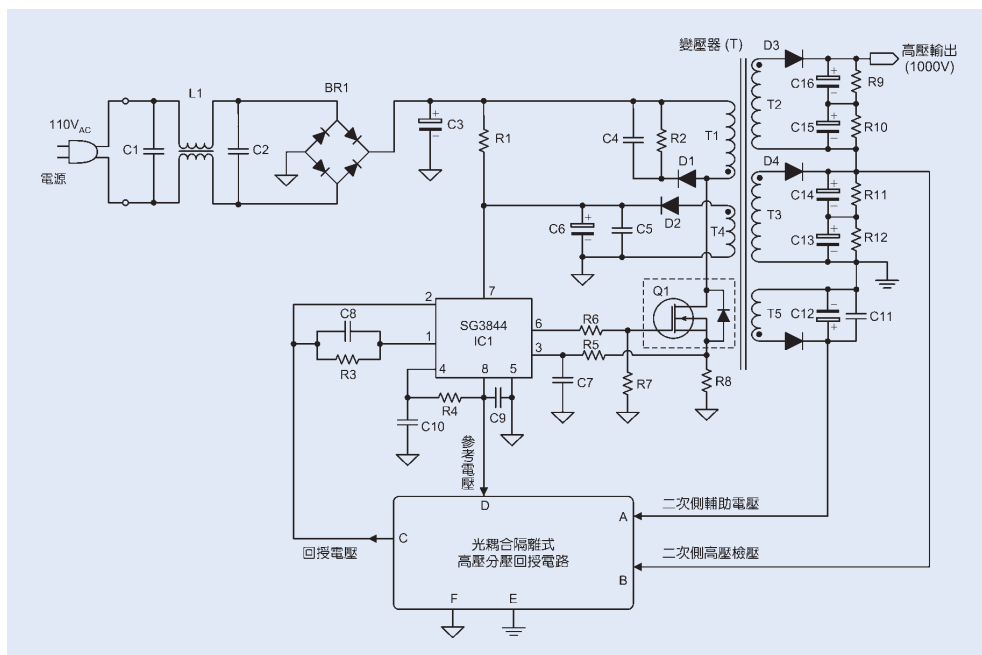


圖 7. 低功率 1000 V 高壓電源模組電路示意圖。

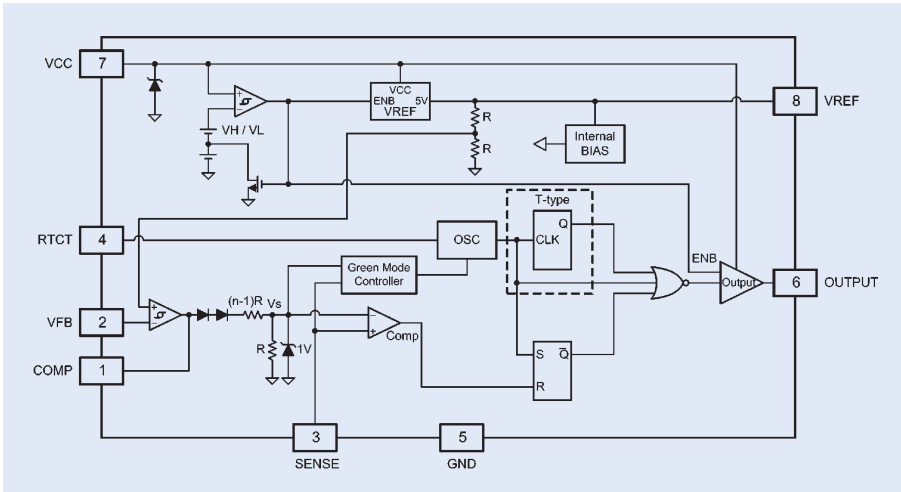


圖 8. SG384X 系列功能示意圖。

是電流感測控制， $R_s$  是外部電流感測電阻，橫跨在  $R_s$  電阻上之一次側尖峰電流則可依下式估計： $I_{pk} = (V_{comp} - 1.4) / nR_s$ ，其中  $n$  為電流感測輸入電壓增益，其典型值為 5。若  $n$  愈大，則其回授衰減愈大，以保證在輕負載輸出時回路穩定。SG3844 之電流感測比較器之反向輸入被限制在 1 V。SG3844 輸出級是 Bi-CMOS 輸出直接驅動外部  $Q_1$  (MOSFET) 電晶體，此輸出級具有低 ON 電阻及高電流推動能力，能夠輕易推動外部容性負載遠大於 1000 pF。為了避免不必要雜訊干擾， $C_{10}$  電容值決不能小於 1000 pF。同樣為了避免雜訊干擾 SG3844 之輸出 (pin 6)，用一個小電阻  $R_c$  串接至 MOSFET 之閘極，變壓器之設計是為交換式電源之重心所在，採用 EI025-2E6 鐵心，其參數如下  $A_e = 42.1 \text{ mm}^2$ ， $B_{max} = 0.250 \text{ T}$ ，又  $V_{dc}(\text{min}) = 130 \text{ V}$ 、工作頻率  $f = 100 \text{ kHz}$ 、 $T = 10 \mu\text{s}$ ， $T_{on} = 5 \mu\text{s}$ 。

(1) 一次側主線圈數 ( $T_1$ )：

$$N_{pri(\text{min})} = \frac{V_{dc(\text{min})} \cdot T_{on}}{B_{max} \cdot A_e} = \frac{130 \cdot 5}{0.25 \cdot 42.2} = 61.6 \approx 62$$

每圈之輸入電壓

$$\frac{V}{T} = \frac{V_{dc(\text{min})}}{N_{pri(\text{min})}} = \frac{130}{62} = 2.1(\text{V})$$

(2) 故第一個二次側圈數 ( $T_2$ )：

$$N_{sec} = \frac{V_{out}}{V/T} = \frac{275}{2.1} = 130 (\text{圈}) (T_2)$$

(3) 同理第二個二次側圈數亦為 130 圈 ( $T_3$ )。

(4) 一次側輔助圈：

$$N_{max} = \frac{V_{aux}}{V/T} = \frac{12}{2.1} = 5.7 \approx 5 (\text{圈}) (T_4)$$

(5) 二次側輔助圈：

$$N_{max} = \frac{V_{aux}}{V/T} = \frac{15}{2.1} = 7 (\text{圈}) (T_5)$$

若假定高壓輸出功率為 5 W，效率定為 85%，則輸入功率 =  $5/0.85 \approx 6 \text{ W}$ 。

(6) 一次側尖峰電流：

$$I_{pri(\text{pk})} = 4 \cdot \frac{\text{輸入功率}}{V_{dc(\text{min})}} \approx 4 \cdot \frac{6}{130} = 0.185(\text{A})$$

(7) 一次側電感：

$$L_{pri} = V_{dc(\text{min})} \cdot \frac{T_{on}}{I_{pri(\text{pk})}} \approx 130 \cdot \frac{5 \times 10^{-6}}{0.185} \approx 3.5(\text{mH})$$

(8) 磁路間隙大小：

$$L_{\text{gap}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot N_{\text{pri}}^2 \cdot \frac{A_e}{L_{\text{pri}}}$$

$$\approx 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot (62)^2 \cdot \frac{42.2}{3.5} \approx 0.058 \text{ (mm)}$$

(9) 一次側主線圈 ( $T_1$ ) 均方根電流：

$$I_{\text{pri(rms)}} = I_{\text{pri(pk)}} \cdot \frac{(0.5)^{1/2}}{3^{1/2}}$$

$$= 0.185 \cdot \frac{(0.5)^{1/2}}{3^{1/2}} = 0.076 \text{ (A)}$$

(10) 主線圈繞線線徑：

若溫升以 30 度，電流密度 = 450 圓密爾／安培，一次側主線圈面積 =  $450 I_{\text{pri}} = 450 \times 0.076 = 34.2 \text{ mil}^2$ ，所以漆包線之直徑為  $(4/\pi \times A)^{1/2} = (4/\pi \times 34.2)^{1/2} = 6.60 \text{ mils}$ ，故應選用 AWG#34 號線。同理二次側高壓線圈線徑應採用 AWG#45 號。以上為粗估設計值，經過實驗驗證及實驗室繞製線圈之方便性考量，變壓器之圈數參數如下：

鐵心材料：Tomita 公司 EI25-2E6；

磁路氣隙長度：1 mm；

$T_1$ ：70 圈 (AWG#28)；

$T_2$ ：105 圈 (AWG#34)；

$T_3$ ：105 圈 (AWG#34)；

$T_4$ ：5 圈 (AWG#34)；

$T_5$ ：6 圈 (AWG#34)。

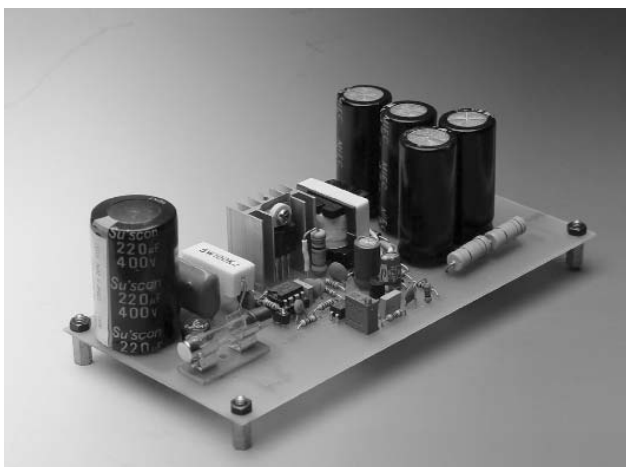


圖 9. 1000 V / 10 W 離線式高壓驅動模組。

以上所介紹之 1000 V 高壓驅動模組如圖 9 所示。經實驗測試後，其交流電壓輸入 90 Vac 至 140 Vac，其高壓 1000 V 輸出變化在 10 V 之內；換言之其線電壓調整率在 1% 之內。當負載為 100 k 時，交流電壓輸入 90 Vac 至 140 Vac，其高壓 1000 V 輸入變化亦在 10 V 之內，換言之其負載調整率變化亦在 1% 之內，整體輸出功率可達 10 W，效率最佳狀態為 70% 以上，此成果極具各界參考價值。1000 V 高壓驅動模組零件如表 2 所示。

表 2. 交換式 1000 V 高壓驅動器零件。

項目	型號與規格
$IC_1$	SG3844
$C_1, C_2$	0.01 $\mu\text{F}$ (200 V)
$L_1$ (電感)	2 $\times$ 30 mH
$BR_1$ (橋式整流)	DCW06M
電容 $C_1, C_2$	0.01 $\mu\text{F}$ (200 V)
電容 $C_3$	220 $\mu\text{F}$ (400 V)
電容 $C_4$	0.1 $\mu\text{F}$ (630 V)
電容 $C_6$	220 $\mu\text{F}$ (50 V)
電容 $C_5$	0.1 $\mu\text{F}$
電容 $C_7$	300 pF
電容 $C_8$	100 pF
電容 $C_9$	0.1 $\mu\text{F}$
電容 $C_{10}$	2.2 $\mu\text{F}$
電容 $C_{11}$	0.1 $\mu\text{F}$
電容 $C_{12}$	220 $\mu\text{F}$ (25 V)
電容 $C_{13}, C_{14}, C_{15}, C_{16}$	47 $\mu\text{F}$ (450 V)
電阻 $R_1$	30 k $\Omega$ , 1 W
電阻 $R_2$	100 k $\Omega$
電阻 $R_3$	130 k $\Omega$
電阻 $R_4$	2.3 k $\Omega$
電阻 $R_5$	1 k $\Omega$
電阻 $R_6$	30 $\Omega$
電阻 $R_7$	33 k $\Omega$
電阻 $R_8$	0.1 $\Omega$ , 1 W
電阻 $R_9 - R_{12}$	470 k $\Omega$ , 1 W
變壓器 ( $T$ )	$T_1$ ：70 turns, AWG28 $T_2$ ：105 turns, AWG34 $T_3$ ：105 turns, AWG34 $T_4$ ：5 turns, AWG34 $T_5$ ：6 turns, AWG34 Gap = 1 mm EI25-2E6 (core)

## 五、雙極性高壓放大器

很多科學應用所要求的高壓電源並不單單是一個直流高壓源，如對壓電材料之調制、非線性光學材料之調制或其他一些生物及機電工程之應用，亦需一交流式變化之高壓電源，其工作頻率往往大於 60 Hz 之市電頻率。故精儀中心電子課應學術界之需求，亦開發出雙極性可調 1800 V<sub>pp</sub> 高壓輸出放大器。其原理是雙極性可調高壓放大器由 110 伏的交流電源提供所需的電源，可將輸入端子的電壓放大約一百倍，其最大輸出直流電壓可達到正或負 950 伏。其最大輸出交流電壓可達到正負九百伏 (peak-peak)。整個高壓放大器主要由三部分組成，第一部分是一般的切換式直流正負 12 伏電源供應器，負責提供後級所需的正負 12 伏的直流電壓以及所需功率；第二部分是高壓直流電源供應模組，以一線性的 DC-DC 轉換器驅動一變壓器作第一次升壓，最後變壓器的二次側再以倍壓電路升至所需的高電壓；最後一部分則是以一低壓運算放大級驅動後級的高壓級，後級的高壓是決定整個高壓放大器的一個關鍵，高壓級是由串接的 PMOS 以及 NMOS 形成一 push-pull 高壓輸出級。由於該級是由功率電晶體所組成且提供極高的增益，所以是決定整個放大器頻率響應的關鍵所在。為了適應各種不同的應用，可以經由偏壓電阻的調整功率消耗和頻率響應作一個折衷設計。雙極性高壓放大器工程實體如圖 10。圖 11 與圖 12 分別為雙極性放大器工作輸出在 1800 V<sub>pp</sub> 和 200 V<sub>pp</sub> 頻率響應情形。

其規格如下：



圖 10. 雙極性可調 1800 V<sub>pp</sub> 高壓輸出放大器。

- (1) 最大直流高壓輸出：約 ± 950 V；
- (2) 最大交流高壓輸出：約 ± 900 V<sub>pp</sub>；
- (3) 放大倍數約 200 倍；
- (4) 功率增益頻寬約：100 kHz；
- (5) 負載 ≥ 1 MΩ。

而應用範圍則為：

- (1) 壓電材料；

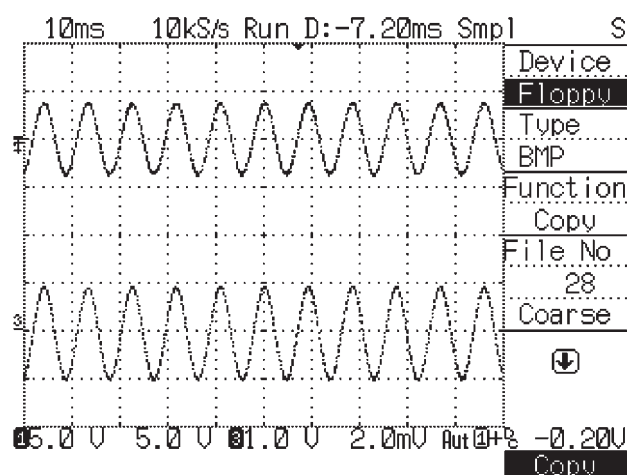


圖 11. 雙極性可調 1800 V<sub>pp</sub> 高壓輸出放大器輸入與輸出波形。上波形為 100 Hz 正弦波輸入 (衰減 1 : 1) 約 ± 4 V<sub>pp</sub>，下波形為 100 Hz 正弦波輸出 (衰減 1000 : 1) 約 ± 900 V<sub>pp</sub>。

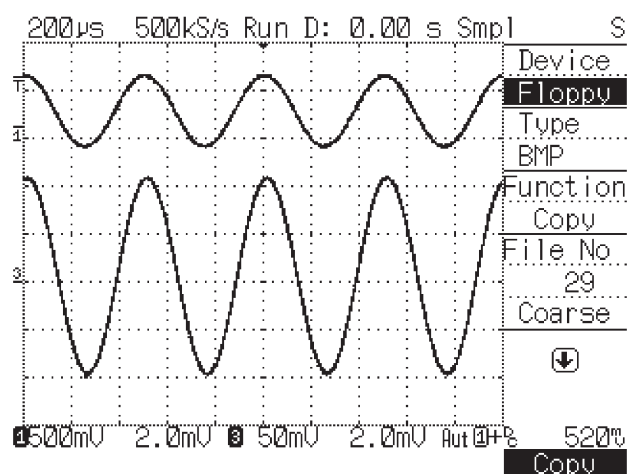


圖 12. 雙極性可調 200 V<sub>pp</sub> 高壓輸出放大器輸入與輸出波形。上波形為 2 kHz 正弦波輸入 (衰減 1 : 1) 約 740 mV<sub>pp</sub>，下波形 2 kHz 正弦波輸出 (衰減 1000 : 1) 約 200 V<sub>pp</sub>。

- (2) 光電管、光譜儀；
- (3) 微機電、奈米科技工程；
- (4) 非線性晶體材料；
- (5) 生物產業機電工程；
- (6) 靜電工程。

## 六、結論

電源雖然是一項傳統電力電子電路技術，但是它的用途非常廣泛，甚至更有它的特殊性。舉凡超音波換能器之諧振電源高壓脈衝電源在生物科技之應用等，皆非一般商用交換式電源技術所能處理，此亦為台灣產業所欠缺之經驗累積技術。精儀中心電子課將持續本著服務學術界及支援產業界之任務，接受一些特殊需求之電源開發服務案，並提供本身經驗給各界參考，相信對各界都會有很大的幫助。

## 參考文獻

1. Linear Technology LTC3400, LTC3401, LTC3423, LTC3424 Data sheet.
2. Untriode Technology UCC39413, UCC39412 Data sheet.
3. Rich-Tek RT9261, RT9262, RT9263, RT9266, RT9267, RT9269 Data sheet.
4. Texas Instrument TPS6100, TPS61001, TPS61003, TPS61006 Data sheet.
5. MAXIM Integrated Products MAX856 Data sheet.
6. A. L. Belousov, *Electronic Design*, 75, Mar. (1994).
7. B. Chek, "Low voltage LED driver circuit", US patent no. 4866430 (1989).
8. T.-S. Liao and C.-M. Chang, *Review of Scientific Instruments*, 71, 1569 (2000).
9. S. E. Bigbie, *Circuits for Electronics Engineers*, Mc-Grow Hill Publication Co., pp. 264-265 (1979).
10. T.-S. Liao and C.-M. Chang, *Review of Scientific Instruments*, 71, 3595 (2000).
11. C.-M. Chang and T.-S. Liao, *Review of Scientific Instruments*, 72, 1583 (2001).
12. T.-S. Liao, *Review of Scientific Instruments*, 73, 1565 (2002).
13. C. B. Grantbam, *Electronic Design*, 64, Oct. 27 (2003)
14. T.-S. Liao, M.-L. Chen, M.-H. Huang, and H.-L. Tsay, "Light emitting element driver with low supply voltage", US patent no. 660342B2 (2003).
15. 廖泰杉, 陳明麗, 黃明鴻, 蔡和霖, 「一種偏壓電阻接地之成低電壓驅動發光元件裝置」, 中華民國新型專利 0202888 號 (2003).
16. 廖泰杉, 陳明麗, 「一種可用一個 npn 及 pnp 電晶體、組成低電壓驅動發光元件裝置」, 中華民國新型專利 1926 62 號 (2002).
17. 廖泰杉, 陳明麗, 「一種低電壓驅動之發光指示器、辨識器及照明器裝置」德國新型專利 Nr. 2021875.8 (2003).

- 
- 廖泰杉先生為中原大學電子工程研究所博士，現任國科會精密儀器發展中心副研究員。
  - Tai-Shan Liao received his Ph.D. in electronic engineering from Chun-Yuan Christian University. He is currently an associate researcher at Precision Instrument Development Center, National Science Council.