

行政院原子能委員會  
委託研究計畫研究報告

電漿離子注入設備功能提昇研究

The performance promotion research on the PIII facility in INER

計畫編號：[992001INER035](#)

受委託機關(構)：黎明技術學院 電子工程系

計畫主持人：甯逢春

核研所聯絡人員：蔡文發

聯絡電話：0919702405

E-mail address：[ft.ning@msa.hinet.net](mailto:ft.ning@msa.hinet.net)

報告日期：2010/12/15

# 目 錄

中文摘要 .....	I
英文摘要 .....	II
壹、計畫緣起與目的 .....	1
貳、研究方法與過程 .....	2
一、整體過濾式脈衝陰極電弧電漿源系統組態及功能測試 .....	3
二、提昇脈衝電流產生器性能 .....	7
三、修正螺線管式引導磁場線圈周邊零組件安排 .....	8
四、改善同步觸發控制電路提昇脈衝電漿源的注入效率 .....	9
五、提昇脈衝電漿源的工作頻率，改善快速充電電路 .....	11
參、主要發現與結論 .....	17
肆、參考文獻 .....	19

# 電漿離子注入設備功能提昇研究

The performance promotion research on the PIII facility in INER

(計畫編號：《992001INER035》)

甯逢春

黎明技術學院電子工程系

## 中文摘要

核能研究所的電漿離子佈植設備目前使用的 ECR 或 ICP 電漿源，都是使用氣體產生的電漿源，尚未發展固體電漿源提供離子佈植使用，亦即週期表內的金屬離子無法使用，大大限制其在工業上的應用。98 年度已設計製造一套脈衝電流產生器，並配合一 80 度彎曲的脈衝磁場線圈，成為脈衝磁場偏向線圈系統，擬用於產生脈衝過濾式陰極金屬電弧電漿源，取代現有連續過濾式陰極金屬電弧電漿源。本計畫主要目的是要繼續上年度的研究成果，將傳統式陰極金屬電弧電漿源與此脈衝磁場偏向線圈系統結合起來，引出純淨脈衝金屬電漿源，供電漿離子注入之用。再改善同步脈衝控制電路，將此過濾式陰極電弧所產生脈衝電漿源，與原有之注入電漿離子專用之脈衝高壓產生器進行同步控制，使脈衝電漿源與脈衝注入高壓源在注入時機與脈衝寬度上，能加以配合控制，以有效地達成金屬源的電漿離子注入功能；還要增進充電電源的效率與功率，以提昇金屬源的電漿離子注入速率。

## 英文摘要

The plasma sources developed for PIII in INER are of ECR and ICP gaseous type. The solid metallic plasma sources are useful and needed for various PIII industrial applications. A guiding magnetic coil in vacuum working with a high current pulse modulator has been designed and manufactured in 2009. This solenoidal magnetic coil when driven with the high current pulses would excite strong axial magnetic field which would guide the input cathodic arc plasma to the substrate downstream periodically. The goal of this project is to combine the traditional cathodic arc plasma source with this pulsed magnetic field system to obtain the filtered cathodic metal plasma source for PIII applications. The pulsed magnetic field must be matched accordingly with the high voltage implantation pulse both on timing and pulse-width conditions in order to obtain higher PIII efficiency. The timing control system has been modified to adjust the triggering time of the pulsed magnetic system easily in order to match the delayed plasma on the substrate with the high voltage implantation pulses. The charging efficiency and power have also been modified to increase the repetition rate of implantation. This proper filtered metallic plasma source will improve and enhance the PIII industrial applications.

## 壹、計畫緣起與目的

核能研究所電漿離子佈植設備不管使用 ECR 或 ICP 電漿源，都是使用氣體產生的電漿源，尚未發展固體電漿源提供離子佈植使用，亦即週期表內的金屬與非金屬離子無法使用，大大限制其在工業上的應用。本計畫主要目的是要設計製造一套脈衝電流產生器，用於產生隨注入時刻而驅動之脈衝磁場，改善現有的直流過濾式連續金屬電漿源，引出脈衝金屬離子束，提供金屬電漿離子佈植使用，擴大其工業應用之領域。過濾式陰極電弧電漿源係藉由陰極和陽極間通入大量電流引發陰極表面電弧點，將陰極材料快速蒸發，由於電弧點夾帶極高能量，使蒸發的氣體也同時被離子化，形成固體金屬電漿源。在陰極材料快速蒸發過程中，因伴隨大顆粒之固體粒子產生，為避免其對鍍膜品質影響，使用一高彎曲度磁場將電漿源的離子偏轉 90 度左右，用來濾除質量大的粒子，增加鍍膜緻密性與減少粗糙度。這種連續產生之電漿源，由於內含的離子束流太大，不適合直接使用在電漿離子佈植設備。因此我們計畫研製一套同步過濾式脈衝陰極電弧電漿源系統，提供現有電漿離子佈植設備使用。98 年度已設計製造一套脈衝電流產生器，並配合近 80 度彎曲的脈衝磁場線圈系統，本研究繼續將傳統式陰極金屬電弧電漿源與此脈衝磁場線圈系統結合起來，引出純淨脈衝過濾式陰極電弧電漿源，供電漿離子注入之用。

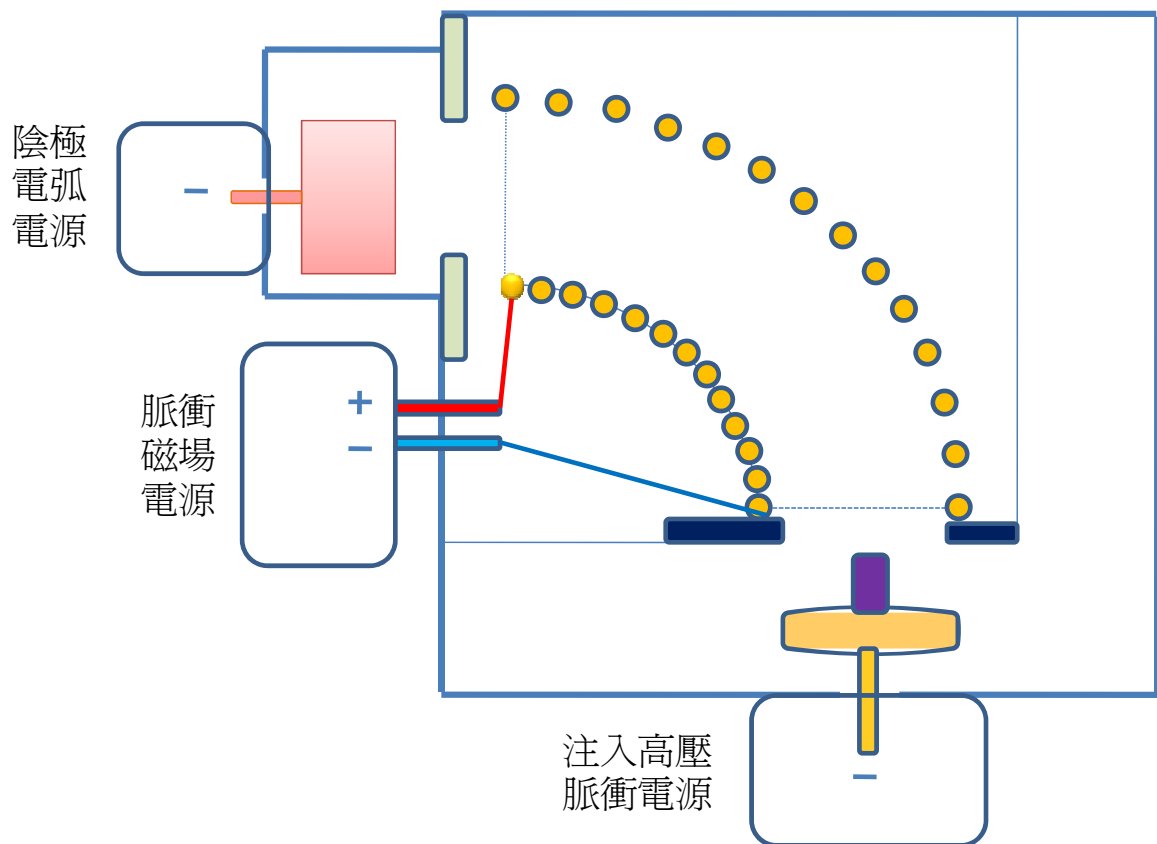
## 貳、研究方法與過程

本計畫主要研究方法是:利用本所已開發的陰極電弧直流電漿源,結合研製之脈衝磁場線圈系統,成為一整組脈衝過濾式陰極電弧電漿源;為與電漿離子佈植設備之高壓脈衝產生器配合,再設計製造一個定時控制及延時脈衝產生器,控制這兩組脈衝電源,使能配合同步工作,達成最佳注入效率。此脈衝產生器是利用定時積體電路組成;其中的兩組脈衝訊號,可調節訊號間彼此的延遲時間和脈衝寬度,第三組訊號可用來控制充電電源的充電時機,使脈衝成形電路能以最高的電源利用效率儘快的充電達到預定的電壓值,因而能提高注入頻率。

主要研究過程是:首先在真空腔體上安裝陰極電弧直流電漿源,結合脈衝磁場線圈系統,進行整體過濾式脈衝陰極電弧電漿源系統之電路組態及功能測試,包括前級充電電源的設計與選定,脈衝電流與磁場之大小與波形之量測,和過濾式脈衝陰極電弧電漿源輸出之驗證。其次開動脈衝過濾式陰極電弧電漿源的定時控制器,調節產生磁場脈衝與電漿離子佈植設備之高壓脈衝之間的延遲時刻,使兩套脈衝系統能具備同步運轉功能之測試,驗證觸發時間能準確配合注入需求。最後再改善充電電源的充電方式及功率,以提高系統操作頻率及功率,進一步提昇浸沒式電漿離子注入之效能。以下對各個主要研究項目細節,逐一說明。

### 一、整體過濾式脈衝陰極電弧電漿源系統組態及功能測試

將陰極電弧直流電漿源，結合脈衝磁場線圈系統，成為整體過濾式脈衝陰極電弧電漿源系統。如下圖一所示，由陰極電弧直流電漿源產生的連續金屬電漿中，取出一部份引進螺線管線圈，藉由強磁場脈衝，引導電漿轉彎前進，使其中混雜的金屬微顆粒因慣性力而甩掉，在下游出口得到純淨的脈衝電漿源。



圖一 整體過濾式脈衝陰極電弧電漿源系統示意圖

表一、陰極電弧電漿源主要電機參數。

陰極尺寸	6 公分直徑
工作電流	連續直流 80~100 安培
外圍螺線管磁場線圈電流	3~10 安培
與螺線管線圈入口距離	~10 公分

表二、脈衝磁場線圈系統主要電機參數。

四級 600V~1KV PFN 阻抗	~ 0.5 $\Omega$
每級電感量 L/電容量 C	~10 $\mu$ H / 50 $\mu$ F
單極性脈寬	~160 $\mu$ s
單極性脈衝電流/磁通密度	1 ~ 2 KA / 1~2 KG
螺線管線圈電感量	15 ~20 $\mu$ H
脈衝電流重複頻率	100 ~ 1K Hz
螺線管線圈彎曲弧度	12 公分內半徑 / 20 公分外半徑

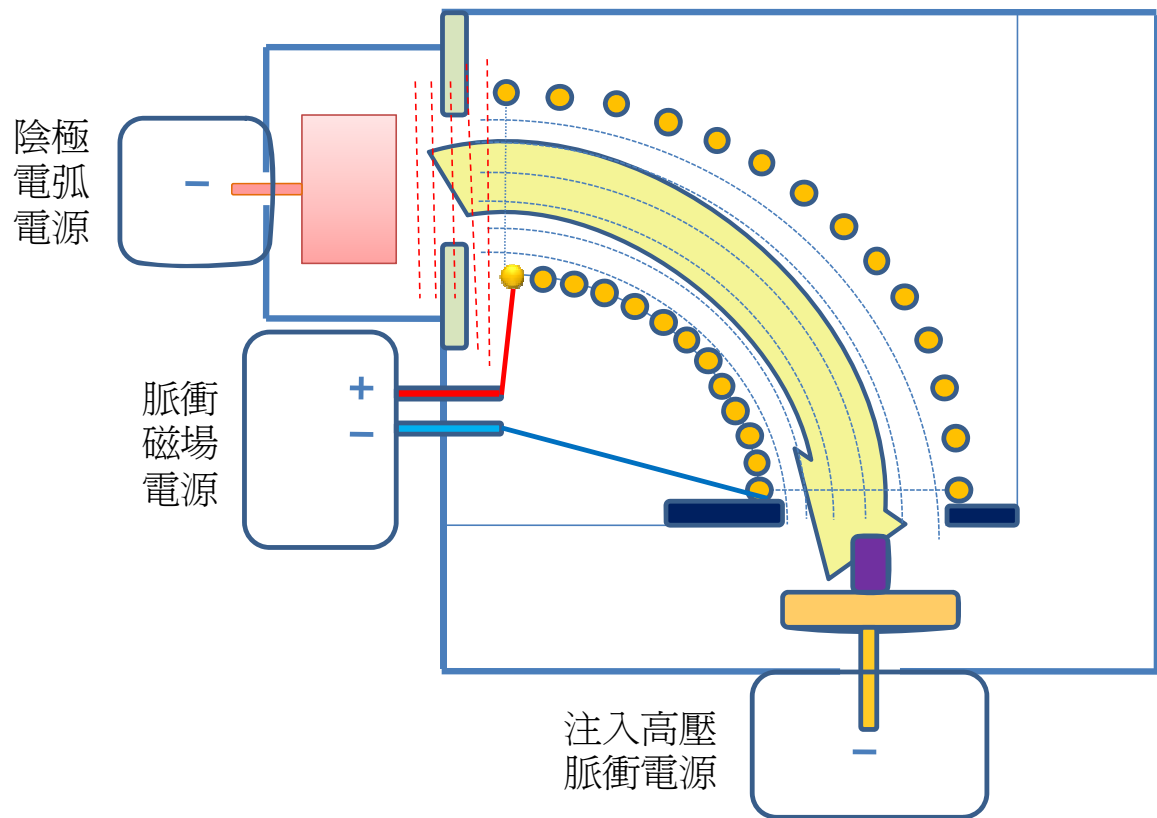
在結合陰極電弧直流電漿源及脈衝磁場線圈系統時，要考慮在電漿引進端、電漿偏轉段及電漿引出端的電磁場條件，因此，對脈衝磁場電源的極性安排，有幾種不同的組合狀態，需要經實驗加以決定。對陰極電弧直流電漿源來說，其靶材只能是接負極，正極是接在真空腔體上；而在脈衝磁場線圈系統中，其脈衝電源之原始設計是以負極性的脈衝去驅動線圈。

參考整體電漿源系統的示意圖，第一種接線型式是將脈衝電源正極性接到線圈下游引出端的腔體接地上，這樣對引出端的優點是，可以與注入用脈衝高壓間藉由腔體金屬接地有效隔離；而脈衝電源的負極性脈

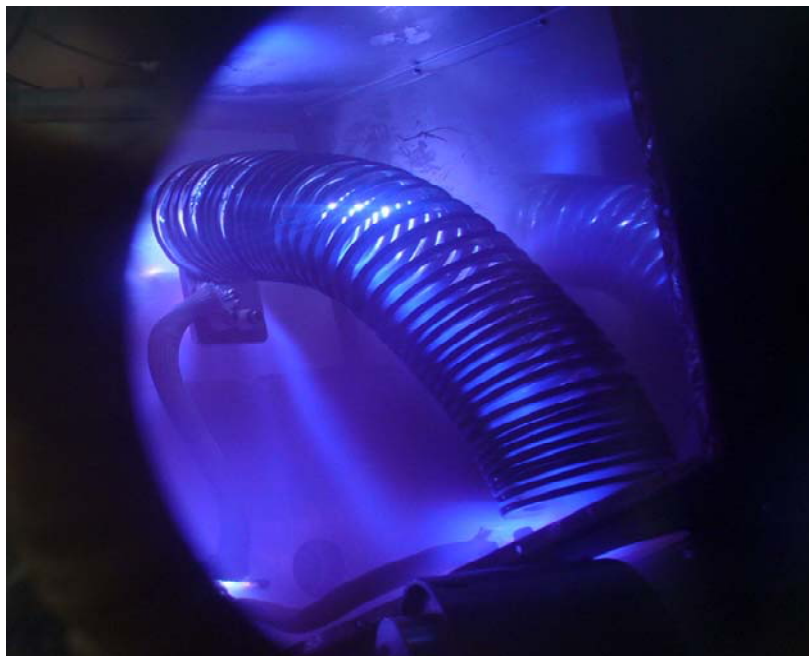


衝就接到線圈上游引入端，靠近陰極電弧電漿源出口。實驗結果顯示陰極電弧電漿源一啟動就發生電源短路，即使加上金屬隔板限制電漿輸入窗口直徑及電漿數量，電源短路現象雖然改善但仍不能避免，顯示上游線圈的負電壓極性吸引正離子轟擊，使電漿成為脈衝電源的並聯電阻性負載，導致放電矽控開關 SCR 失去自動關閉條件，而導致電源短路過載跳機。乃將磁場線圈兩端絕緣獨立起來測試，試驗結果仍然電源短路過載跳機。顯示過量電漿造成絕緣無效；於是將接線更換成第二種組合型式，把上游線圈引入端接到腔體接地上，這樣可以避免陰極電弧電漿源造成的脈衝磁場電源短路，缺點是由於腔體金屬接地的屏蔽隔離作用，在上游線圈引入端對陰極電弧電漿就無法建立理想的電場條件，而在線圈輸出端接著負極性的脈衝，這樣對引出端的缺點是，易受注入用脈衝高壓電場影響。實驗結果顯示陰極電弧電漿源一啟動就可以看到電漿偏轉現象，結果比第一種接線型式較有改善。

為進一步改善電漿引入區的電磁場分佈，第三種組合型式乃將脈衝電流產生器電路改為正極性脈衝輸出，將其接到電弧電漿源後的上游線圈引入端，並將與陰極電弧電漿源中隔之金屬電磁屏蔽板，改為介電材質鐵氟龍中隔板；當脈衝磁場加入時，在引入區瞬間出現的電磁場分佈，能吸引電子進入線圈中央，再經由軸向強磁場引導到線圈輸出端，負極性地線則接到下線圈輸出端的腔體接地上。實驗證明這是最好的組態；圖二顯示在電漿引進端、電漿偏轉段及電漿引出端的電磁場條件。圖三顯示脈衝磁場引出電漿的情況。同時別處出現的輝光顯示裸露的電極會吸引電漿、需要加以適當的電磁屏蔽。



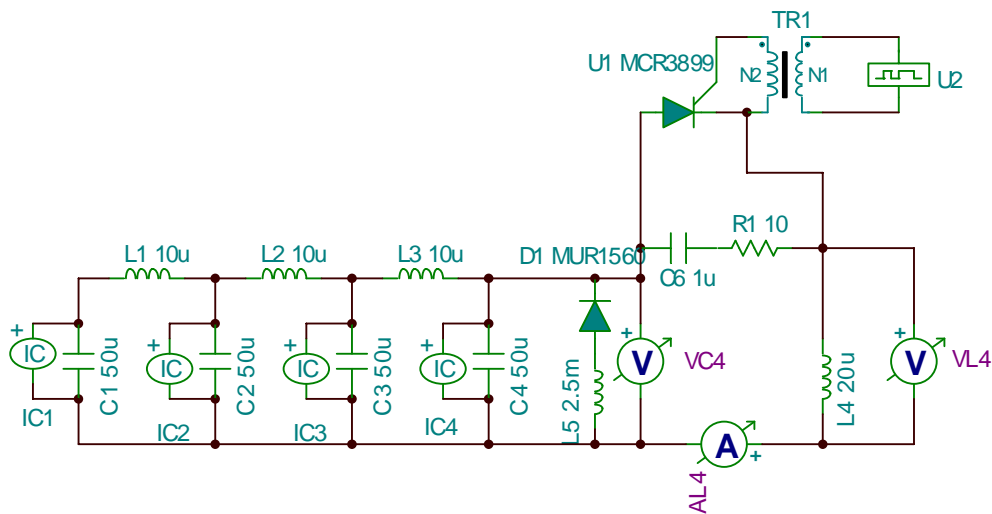
圖二、陰極電弧靶與脈衝螺線管磁場交界面之電磁場分布示意圖



圖三、脈衝磁場引導電漿圖

## 二、提昇脈衝電流產生器性能

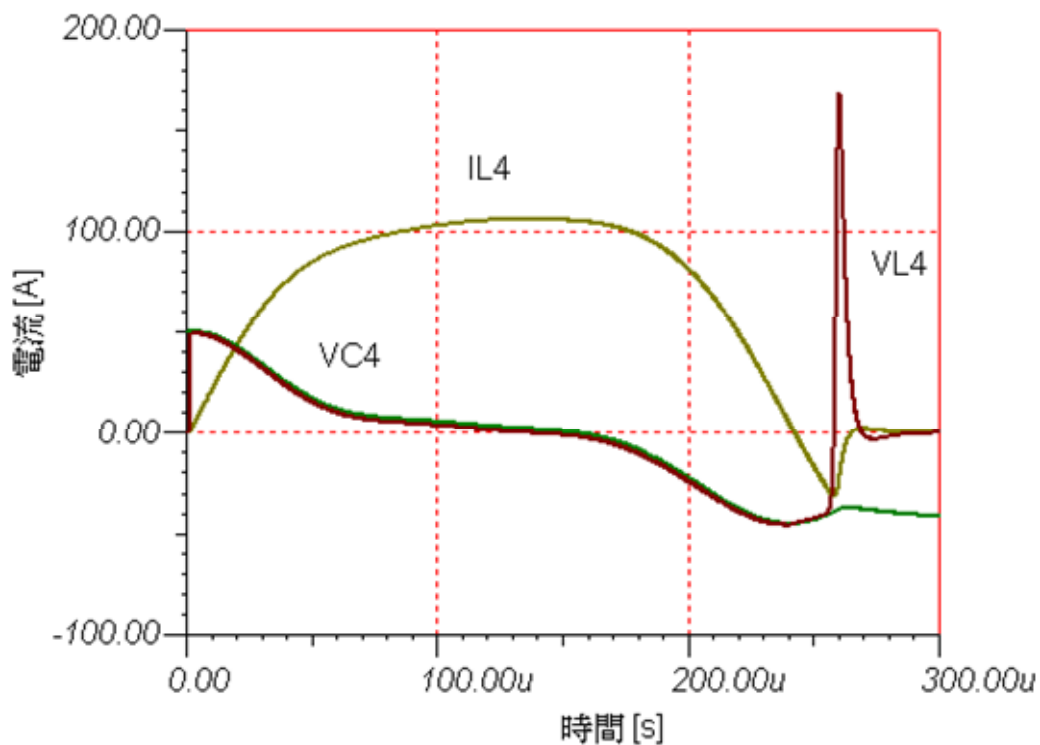
為配合新的直流連續過濾式陰極電弧電漿源規格，改良設計製造的脈衝電流產生器電路如下圖四所示，此脈衝電流產生器是利用四級脈衝成形電路(PFN)組成，能在螺線管線圈 L4 內驅動正極性脈衝電流。電路細節說明如下。



圖四、正極性脈衝電流產生器改良設計圖

所採用四級電感 L 電容 C 階梯式串聯電路組成的脈衝成形(PFN)電路，每級電容量 C1~C4 為 50 $\mu$ F，電感量 L1~L3 為 10 $\mu$ H，能得到脈寬為 160 $\mu$ s 的脈衝波形，電路阻抗 Z 約為 0.5 歐姆，充電 500 伏特下能得到 1KA 的電流；因為電路阻抗 Z 大於回路電阻，放電之後電容會造成反向充電，在下一次放電前需要把電壓充回原先預定數值。二極體 D1 能將放電後電容器組的反向充電儲能，經由回收線圈 L5，利用諧振電路 C-L5-D1 加速回收，使電容上的充電電壓轉變成正確的極性，如此能源使用效率大為提高，且縮短充電時間，也可以提昇脈衝電流產生器操作頻率。U1 是矽控整流器作為放電開關，額定值為 3KV/3KA，藉由一脈衝變壓器隔離驅動。AL4 是電流變壓器，用來量測脈衝電流數值及脈

衝磁場波形。圖五所示為脈衝電流產生器模擬波形圖。可以看到激磁線圈 L4 在脈衝前段出現正極電壓，而儲能電容 C1~C4 在脈衝後段因諧振放電後成為負電壓充電狀態，這負電壓一面阻斷放電電流，使 SCR 開關 U12 斷電，也在激磁線圈 L4 上產生反跳電壓；下一次放電前，回收電路及充電電源回路要及時將儲能電容 C1~C4 充電達到原先預定的正電壓才行，工作頻率越高時，要求的充電時間得越短。

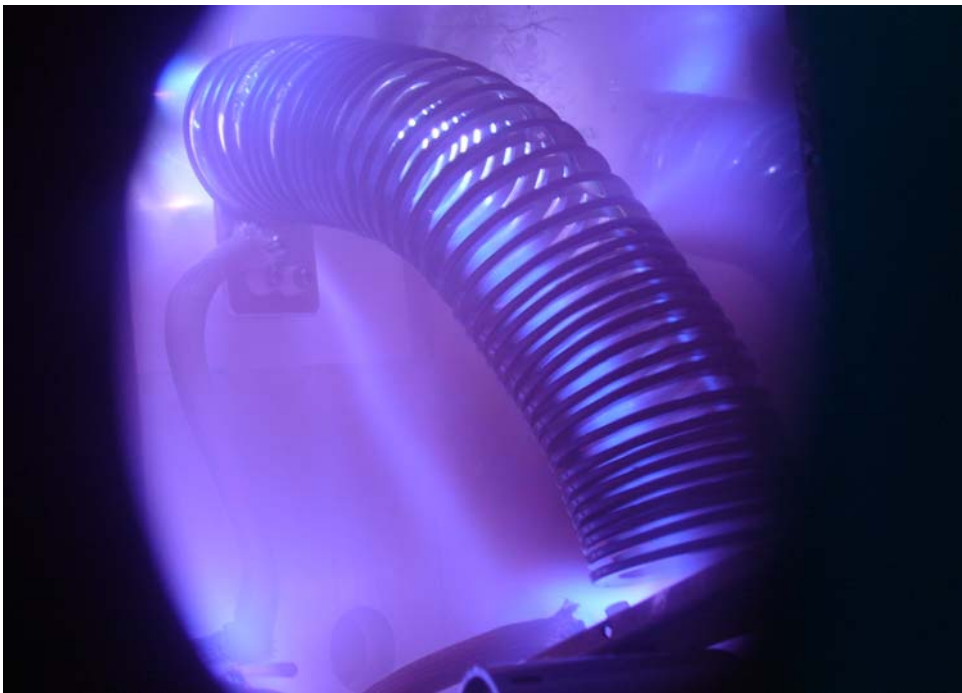


圖五、脈衝電流產生器電路之模擬波形圖

### 三、修正螺線管式引導磁場線圈周邊零組件安排

將脈衝電流引導進螺線管形線圈時，能在其中產生軸向磁場，利用此軸向磁場將使純淨電漿作圓弧形偏轉，甩掉顆粒狀雜質，引導走向注入工件。此螺線管是用 4mm x 10mm 扁方形純銅漆包線繞成弧形線圈，線圈內口徑為 60mm，安裝在密封機箱內，線圈彎曲的圓弧 80 度，內半

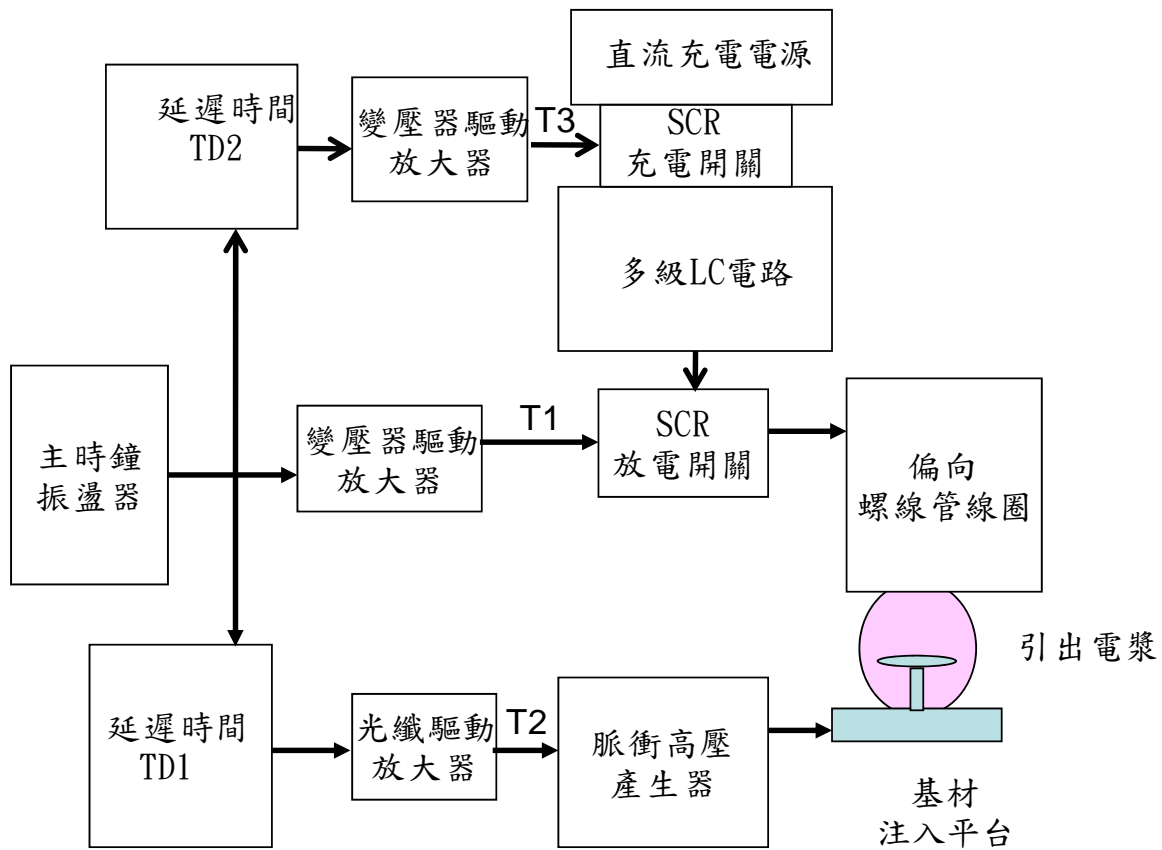
徑 12 公分，外半徑 20 公分，能有效阻截顆粒狀雜質於此。設計製造成品如圖六所示。左邊圓孔接到直流陰極電弧電漿源，中間有一塊 6 公分直徑圓孔的介電質間隔板，下方出口圓孔指向基材放置台。經實驗顯示，漆包線圈上會發生局部放電，檢視該點發現到漆包出現絕緣破壞。於是將漆包層除去再試，始得到正常的放電組態。



圖六、測試中的螺線管式引導磁場線圈

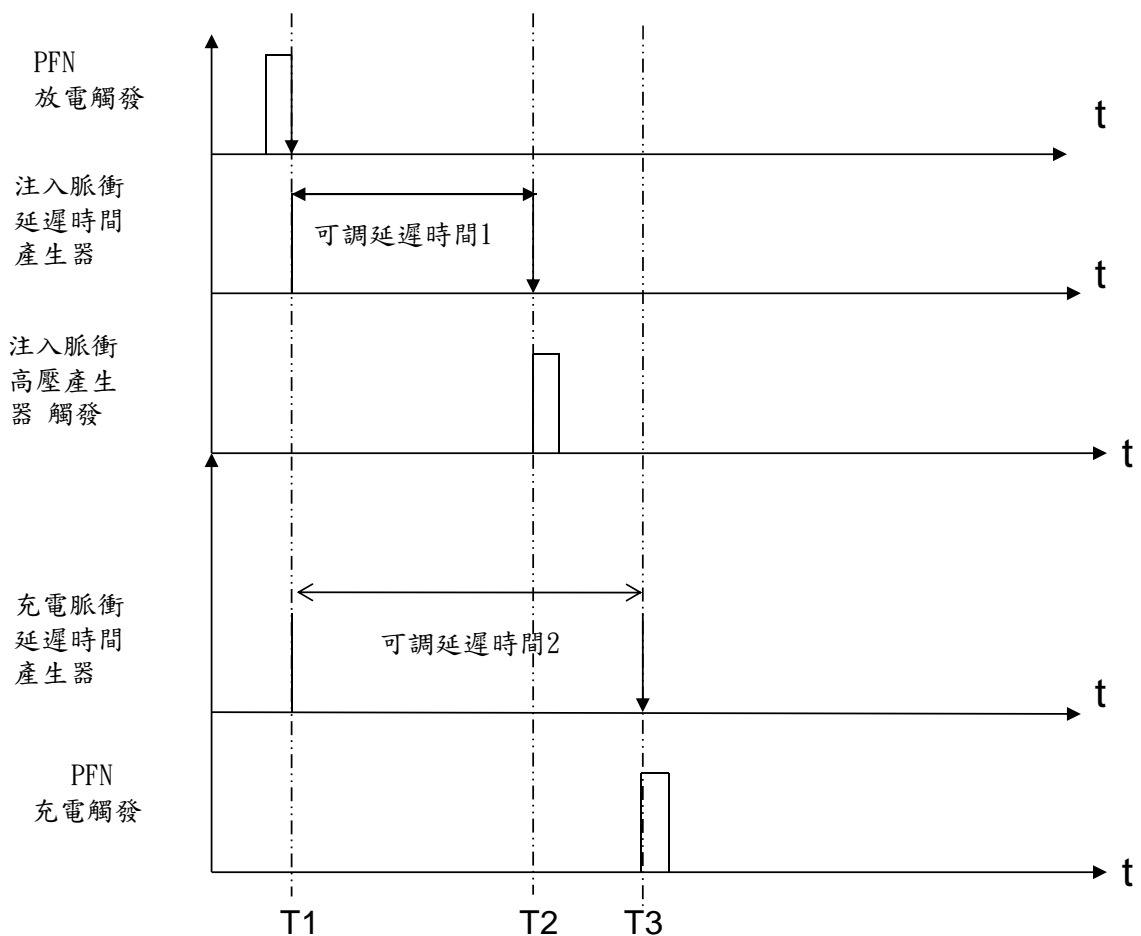
#### 四、改善同步觸發控制電路提昇脈衝電漿源的注入效率

從整體過濾式脈衝陰極電弧電漿注入系統動作要求來看，其中的脈衝電流產生器與高壓脈衝產生器兩者必須在動作時間上準確配合，才能達成注入效果，圖七顯示出設計的同步觸發控制電路的系統架構。



圖七 同步觸發及充放電控制電路系統架構圖

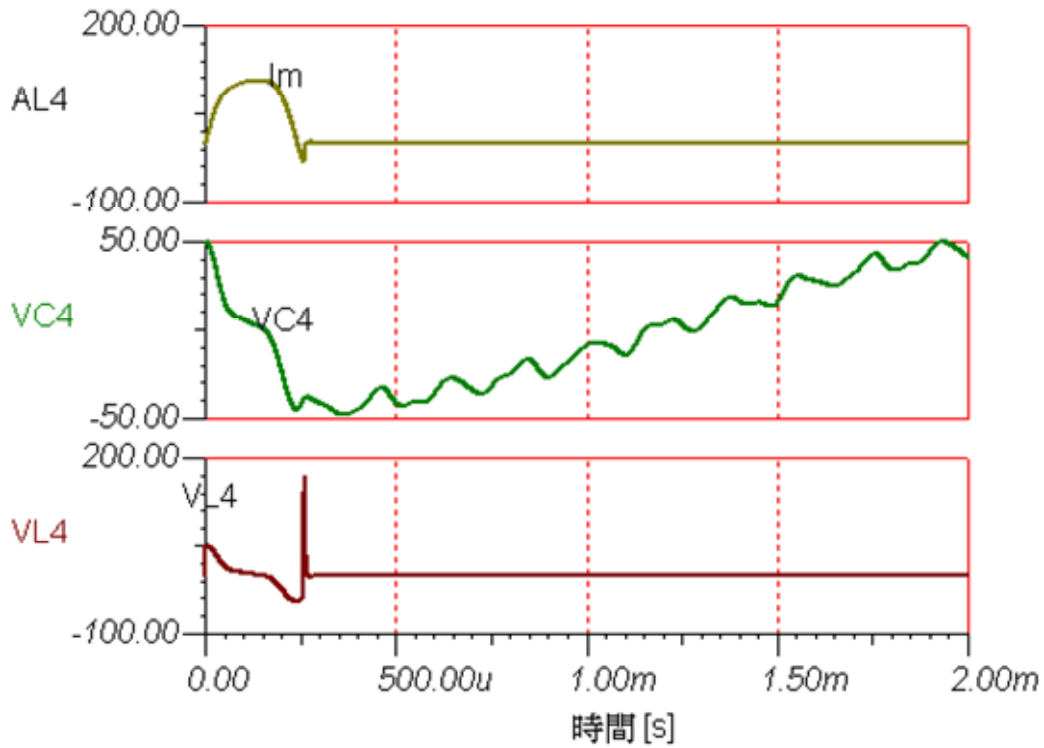
為使上述脈衝電流產生器能與電漿離子佈植設備之高壓脈衝產生器規格配合，順利進行電漿離子佈植，此一改良型延遲時間控制的脈衝產生器，改進原有以注入用高壓脈衝產生器為主，優先觸發的作法，改為採用順應自然的時序，以觸發脈衝電流產生器為主(master)，延遲觸發高壓脈衝產生器為從(slave)，先驅動 SCR 放電開關，建立脈衝磁場從陰極電弧電漿源截取電漿；再因應電漿遷移傳輸時間的需要，將延遲後的驅動脈衝經由光纖傳送到高壓脈衝產生器，激發產生注入高壓脈衝。這樣需要延遲的時間，只在 0.5 ms 以內。圖八顯示同步控制觸發電路與再充電控制電路的觸發時序。



圖八、放電注入同步觸發與再充電控制電路的時序圖

### 五、提昇脈衝電漿源的工作頻率，改善快速充電電路

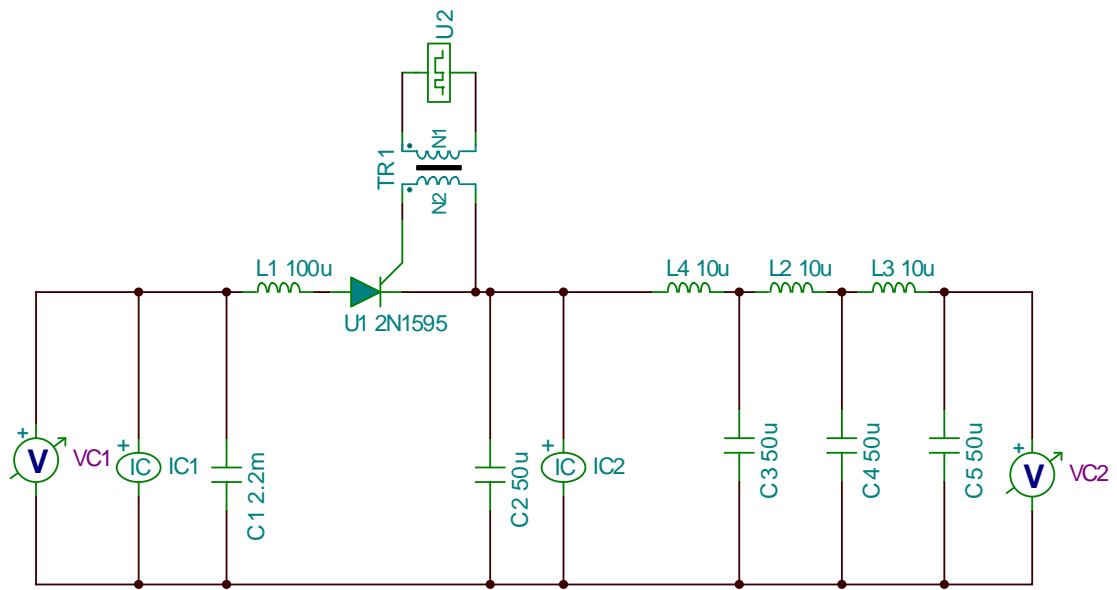
要提昇脈衝電漿源的工作頻率，就必須加快放電後的再充電速度，減低充電花費的時間；這包括考慮到充電電路的型式和充電電源的種類，兼顧脈衝電源的穩定安全動作及充電電源的能源效率。圖九顯示上述圖四中的脈衝電流產生器電路之放電後，VC4 回收電能與再充電之模擬波形圖；其中 VC4 回收電能的時間，可以用電感 L5 的數值來調節改變。本例中 L5 為 2.5mH，回收電能的時間約為 2ms，適用於 500 Hz 以下的重複率，若要再提昇重複率，得將 L5 數值降低。



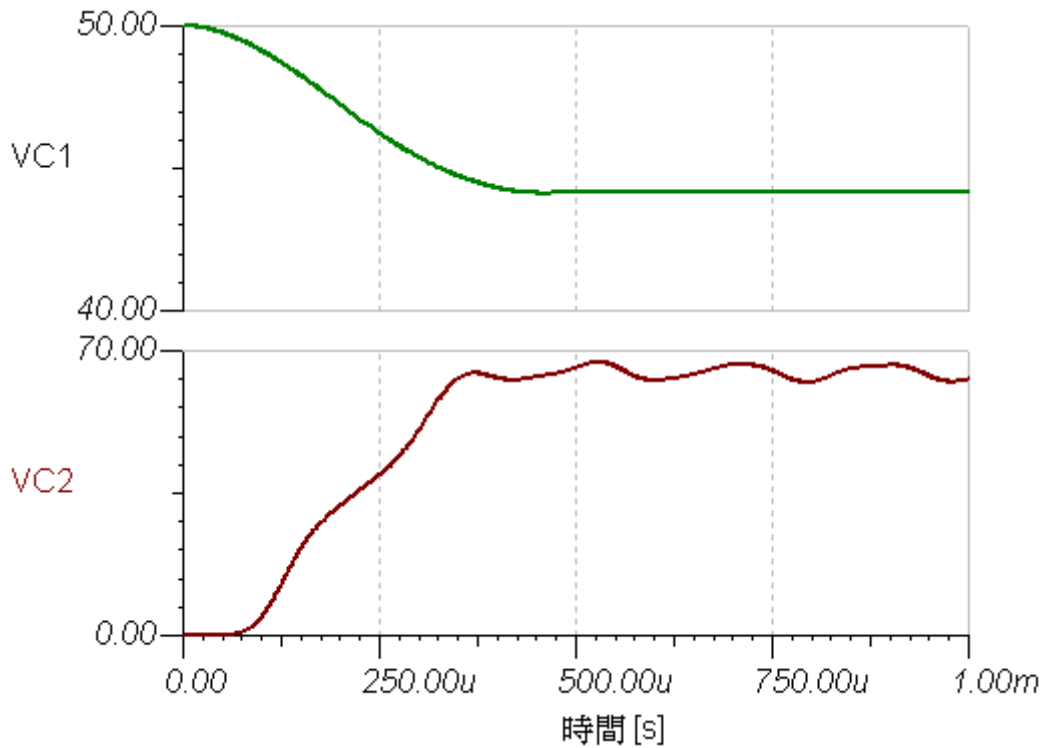
圖九、脈衝電流產生器電路之放電後回收充電模擬波形圖

若對於 PFN 前段充電方式採用 LC 諧振充電，與 RC 充電比較起來，其電源使用效率較高，更適用於高功率場合；圖十(A)顯示的 LC 諧振充電電路，其模擬結果見圖十(B)，每次放電後約需  $400\mu\text{s}$ ，不但能回收電能，也能同時對於 PFN 進行充電。



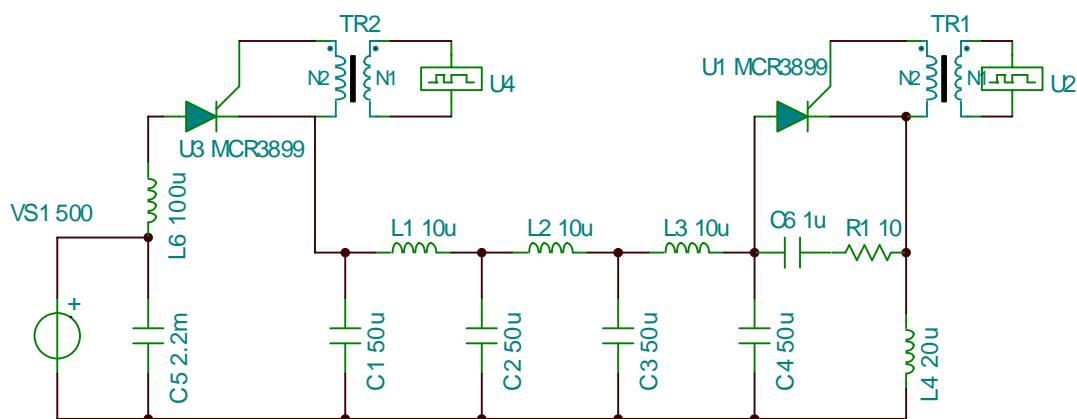


圖十(A) LC 諧振充電之電路圖

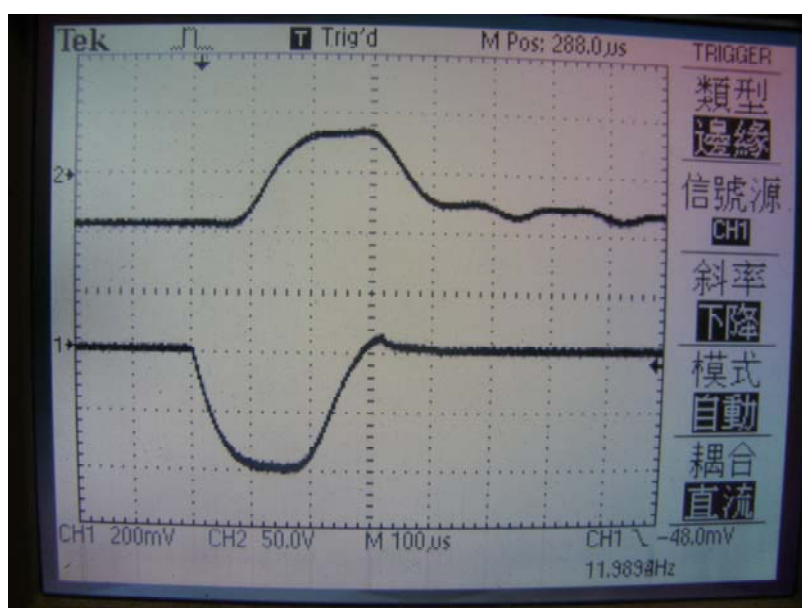


圖十(B) LC 諧振充電之模擬結果圖

圖十中 PFN 每次放電與充電後，初級儲能電容 C1 都會降低電壓，須要立即補充回來。就充電效率而言，對大電容器的充電不宜採用定電壓電源，最好是選用定電流或定電功率電源。總結以上探討，圖十一的電路為適用於本專案之脈衝電源系統，能以 1KHz 之重複率在螺線管 L4 內產生 1KG 的脈衝磁通密度，脈寬 160 $\mu$ s。至於充電、放電與注入控制的時相圖顯示於圖八中。圖十二及圖十三分別顯示放電時刻和相鄰兩次放電間的磁場線圈電流，以及儲能電容器上充電電壓的變化情形。



圖十一、適用於 1KHz 之脈衝電源系統充放電電路圖

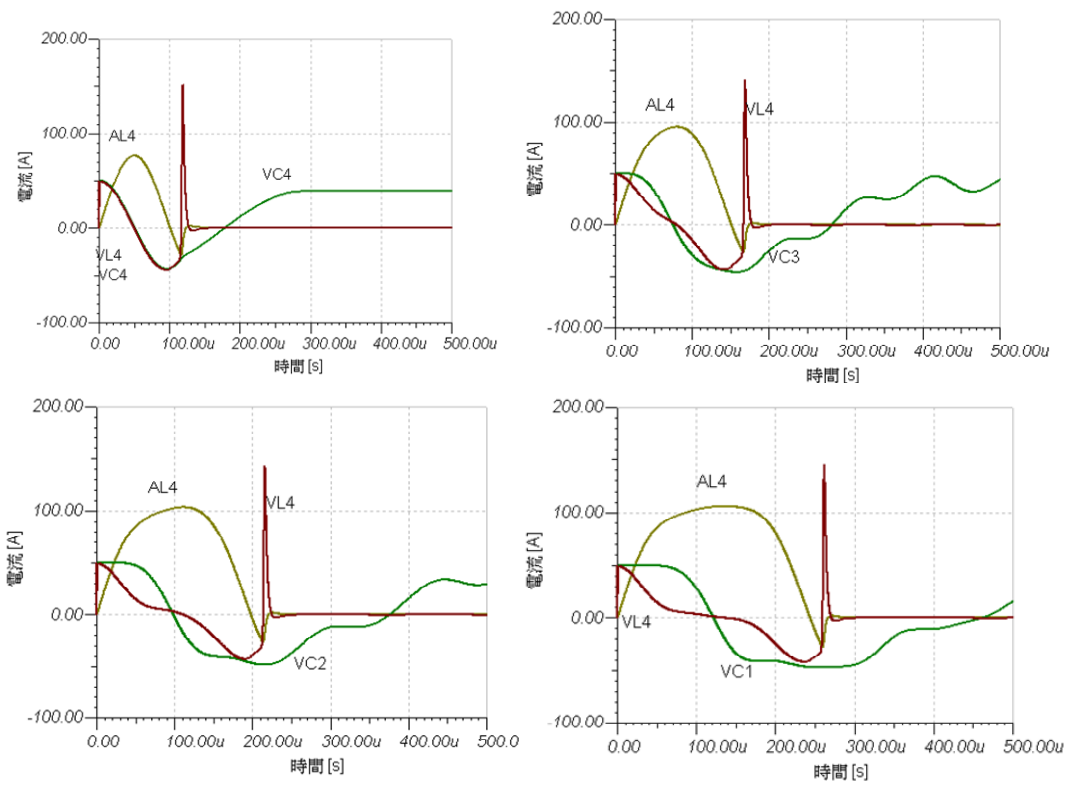


圖十二 放電時刻磁場線圈電流，對儲能電容器上充電電壓的變化



圖十三 相鄰放電間的磁場線圈電流，對儲能電容器上充電電壓的變化

若要求減低電流產生器的脈衝寬度，以便與注入高壓脈衝在時相上緊密配合，可以由減少 PFN 級數達成。從圖十四所顯示電路模擬的結果可以看到，電流脈衝寬度可以改變，但波形上升及下降的斜度不變。最窄的波形只有一個電容器放電的  $50\mu\text{s}$  半寬度正弦波而已，但是已足以配合  $25\mu\text{s}$  的注入脈寬，且充電速度更快，最高可容許工作到 3KHz 的重複頻率。



圖十四、 1 , 2 , 3 , 4 級 LC 的 PFN 電路之模擬放電波形

### 參、主要發現與結論

經過上述過濾式脈衝陰極電弧電漿源系統的組裝與測試，發現到三組子系統間的最佳配合組態，包含陰極電弧電漿源與偏轉螺線管入口端的機電安排，脈衝磁場電流源的極性與電路接法的正確選擇，以及兩組脈衝電源間的延遲時間控制，使引出的電漿源能配合達成離子注入的需要。

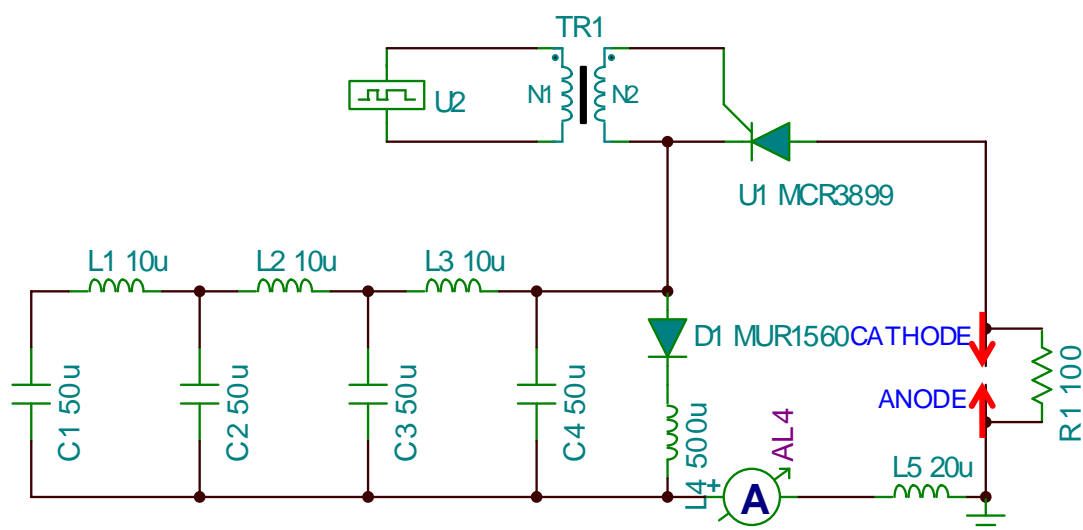
為了配合注入高壓脈衝電源，脈衝電流產生器之單極性脈衝電流輸出，可以調整其脈衝寬度為 40~160 us，峰值電流約 1.2kA，提供螺線管式引導磁場線圈產生脈衝磁場強度約 1KG，可以引出純淨金屬電漿。這套設備能結合核能研究所 PIII 系統同步動作，用來研究金屬離子注入的應用效果。

在研究過程中也發現一些困難和問題，以下逐一提出來。

磁場線圈原來是以方形漆包銅線繞製，表面是絕緣膜，在陰極電弧電漿源環境中，會累積大量電荷造成放電，擊穿絕緣膜，污染電漿源；也造成短路過載現象，影響到脈衝電路的正常工作。改為裸銅板繞製線圈應能消除這種現象，只是需要注意解決相鄰銅圈碰觸短路的問題。另外，直流陰極電弧連續工作產出大量電漿源，即使在 400Hz 頻率工作時，其注入高壓脈衝只能有百分之一左右的工作週期，造成金屬靶材大量浪費，很不經濟；而且，大量的金屬電漿都要攔截下來，很快就使磁場線圈鍍滿金屬膜，造成異常放電，無法長時間穩定的進行注入工作。增加注入頻率到 4KHz 時，工作週期可以改善到百分之十，這時脈衝電源及磁場線圈及的冷卻設計都須要加強，充電電源的設計規格也需要提昇。

若要徹底改善此工作週期太小，以致浪費金屬靶材及其衍生的飽和

污染的問題，陰極電弧電漿源可能改為脈衝工作，且如圖十五，將陰極電弧與脈衝磁場線圈串聯起來，共用同一個脈衝電源來同時驅動，如此一來，不但省去一組陰極電弧電源，還使陰極電弧靶的工作電流大增，引出的電漿源濃度就更高；這種作法能同時解決上述兩個問題，但是仍須先克服用電壓脈衝去點燃陰極電弧靶的技術瓶頸，才能實現這個理想。以上研究完成後，本所電漿離子佈植設備擁有的氣體電漿源與金屬電漿源雙重功能將可望實用化，實現工業應用領域之擴大。



圖十五 脈衝陰極電弧靶及脈衝過濾磁場共用電源電路示意圖

#### 肆、参考文献

- [1] O.R. Monteiro, A. Anders, Vacuum-arc generated macroparticles in the nanometer range, in: XVIIIth Int. Symp. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Eindhoven, The Netherlands(1998)593-596.
- [2] R.L. Boxman, S. Goldsmith, Surf. Coat. Technol. 52 (1992)39-50.
- [3] R. L. Boxman, S. Goldsmith, Surf. Coat. Technol. 87-88 (1996)263-270.
- [4] I. G. Brown, Cathodic arc deposition of films, in: Annual Review of Material Science Vol. 28 , Annual Reviews Inc., Palo Alto, CA, 1998, pp.243-269.
- [5] B. Juttner, Beitr. Plasmaphys. 19(1979) 25-48.
- [6] I.I. Aksenov, V. A. Belous, V. G. Padalka, V. M. Khoroshikh, Sov. J. Plasma Phys. 4(1978)425-428.
- [7] A. Anders, S. Anders, I.G. Brown, Plasma Sources Sci. Technol. 4(1995)1-12.
- [8] J. R. Treglio, Magnetically filtered cathodic arc plasma apparatus, Patent US 5317235, 31, May 1994.
- [9] I. I. Aksenov, V. A. Belous, V. G. Padalka, V. M. Khoroshikh, Instrum. Exp. Tech. 21 (1978)1416-1418.
- [10] J. Vyskocil, J. Musil, J. Vac. Sci. Technol. A 10 (1992)1740-1748.