

核能安全委員會
委託研究計畫期末報告

**114-116 年度中小功率極紫外光/超極紫外光光源設
計、試作與應用研究**

**Study of Design, Prototyping, and Applications of
Low-to-Medium Power EUV/BEUV Light Sources**

契約編號：NSC11401003L

受委託機關(構)：國立臺灣大學

計畫主持人：蔡坤諭

共同主持人：李佳翰、李昭德、林長華

研究期程：中華民國 114 年 4 月 02 日 至 116 年 12 月 31 日

中華民國 114 年 11 月 17 日

目 錄

中文摘要	1
壹、計畫緣起與目的	4
一、計畫緣起	4
二、計畫目的	6
貳、研究方法與過程	10
1. 極紫外光光源收集鏡系統設計、模擬與製作.....	10
2. 放電電漿產生極紫外光光源之電極結構優化設計.....	14
3. 極紫外光光源腔體及溫度與壓力控制系統優化.....	28
4. 高壓脈衝電源電路優化	40
參、主要發現與結論	54
肆、參考文獻	74
伍、論著產出及研討會發表	79
陸、跨機關團隊合作	80
柒、技術創新	80
捌、人才培育	81

圖目錄

圖 1 兩種收集鏡系統示意圖:(a)掠角入射(grazing-incidence)收集鏡；(b)正入射(normal-incidence)收集鏡[2]	13
圖 2 四組鏡片組成之收光鏡[2].....	13
圖 3 Ru, Au, Pt, Ni 於極紫外光波段下之反射率與掠射角關係圖[27]	13
圖 4 收集鏡架構示意圖 (a) 橢圓面鏡；(b) 拋物面鏡；(c) Wolter-type 收集鏡[2]	14
圖 5 濃密電漿聚焦(Dense plasma focus)架構(左上)[2]；中空陰極觸發(Hollow-cathode-triggered)架構(右上)[4]；無電極(Electrodeless Z-pinch)架構(左下)[5]；毛細管 Z 軸壓縮(capillary Z-pinch)架構(右下)[6]	17
圖 6 DPF 電漿放電流程示意圖：(a)氣體崩潰階段；(b)軸向加速階段；(c)徑向壓縮階段[7].....	19
圖 7 偽火花放電模擬示意圖；虛擬陽極產生過程之電位變化(左)；中空陰極電漿產生階段之電位(右)[8]	21
圖 8 透過調整觸發電極電位達到可控放電	21
圖 9 無電極架構核心與運作機制示意圖[9].....	22
圖 10 毛細管 Z 軸壓縮示意圖[10]	23
圖 11 DPF 電極結構 COMSOL 建模及模擬示意圖.....	26
圖 12 FLYCHK 模擬不同電漿溫度之電漿態分布比較圖(上)；輻射頻譜比較圖(下).....	27
圖 13 放電電漿產生極紫外光模擬流程	27
圖 14 Cymer DPF 光源模組架構圖[16].....	30
圖 15 布拉格捷克理工大學 Capillary Z-pinch 光源模組(a)架構圖；(b)實體照片[10]	31
圖 16 台大-國儀中心極紫外光製程腔體示意圖	32

圖 17 光源模組開發平台架構示意圖	33
圖 18 可用於極紫外光光源測試之真空腔體	33
圖 19 中空電極水冷散熱系統示意圖[2].....	34
圖 20 Flying Circus 架構概念圖及三維設計示意圖(a)能量測量模式;(b)光源成像 模式[1].....	36
圖 21 (a)氙氣穿透率;(b)Photodiode 響應;(c) Si ₃ N ₄ /Nb 過濾片穿透率;(d)Mo/Si 多層膜反射率[17].....	37
圖 22 AXUV100G 光感測器實體照片(上);光波長響應(下).....	38
圖 23 AXUV100G 白光 LED 照光測試	38
圖 24 PI-MTE:2048B X-ray CCD(上);光能量響應(下)	39
圖 25 磁脈衝壓縮電路架構示意圖(左);電壓波形示意圖(右)[18]	40
圖 26 磁脈衝壓縮電源模組架構	41
圖 27 磁脈衝壓縮高電路之模式 1	42
圖 28 磁脈衝壓縮高電路之模式 2	43
圖 29 磁脈衝壓縮高電路之模式 3	43
圖 30 磁脈衝壓縮高電路之模式 4	44
圖 31 可飽和鐵芯相關規格	47
圖 32 更高導磁係數之可飽和鐵芯相關規格	48
圖 33 DCPS-001 高壓直流電源實體照片及規格	49
圖 34 導體與導體間之空間直線距離示意圖	51
圖 35 導體與導體間利用挖槽、增加絕緣體延長爬電距離之示意圖	52
圖 36 絕緣矽油(左);灌膠用之環氧樹脂(右).....	53
圖 37 實驗人員安全防護措施	54
圖 38 參考之 Capillary Z-pinch 電極結構及 pinch 電漿之 CCD 影像(上)[6];	

COMSOL 電極結構幾何模型(下).....	57
圖 39 Capillary Z-pinch COMSOL 電漿放電模擬結果：電位分布(左)；密度分布(右).....	57
圖 40 基於碰撞-輻射模型計算之電漿轉換效率(單位： $\% \text{ sr}^{-1}$ 於 2% 頻寬內)於不同電子密度和電漿溫度中的等高線圖，最大轉換效率大約在 $1018 < n_e < 1019 \text{ cm}^{-3}$ [23].....	58
圖 41 DPF 電極結構 COMSOL 模擬結果：電壓電流波形(左)；磁場分布(右).....	58
圖 42 DPF 電極結構 COMSOL 模擬結果：壓力分佈(左)；溫度分布(右).....	59
圖 43 不同氣體於室溫之帕邢曲線[28].....	60
圖 44 DPF 架構電極設計 CAD 圖.....	61
圖 45 真空腔體系統架構圖及實體照片.....	63
圖 46 磁脈衝壓縮電路模擬之系統架構圖.....	65
圖 47 輸出正脈衝電壓($V_o=9.95\text{kV}$)模擬結果.....	65
圖 48 開關 v_{gs}, v_{DS} 之模擬結果.....	66
圖 49 變壓器一次側,二次側電壓模擬結果.....	66
圖 50 可飽和電感電壓之模擬結果.....	66
圖 51 變壓器電壓波形.....	68
圖 52 變壓器電壓波形放大圖.....	68
圖 53 輸出電壓 V_o 之波形圖.....	69
圖 54 輸出電壓 V_o 之波形放大圖及脈寬.....	69
圖 55 可飽和電感電壓波形圖(紅色圈為飽和點).....	69
圖 56 磁脈衝電路實體照片(紅色框：電源供應器輸出 200V；黃色框：磁脈衝壓縮電路；綠色框：輸出負載 $2\text{k}\Omega$	70
圖 57 實驗人員安全措施示意圖.....	70

圖 58 台大竹北校區碧禎館實驗室電路移地測試	71
圖 59 台大竹北校區碧禎館實驗室放電電漿整合測實體照片	72
圖 60 輸入電壓 140 V 之電極放電照片(上)及量測電壓電流波形(下)	73
圖 61 輸入電壓 155 V 之電極放電照片(上)及量測電壓電流波形(下)	74

表目錄

表 1 目標脈衝電源系統規格	8
表 2 114 年度工作項目預定進度及查核點.....	9
表 3 掠角入射收集鏡設計考量	11
表 4 各種 DPP 光源架構優劣表	16
表 5 四種 DPP 光源架構發光功率整理表	16
表 6 模擬需考量之物理模型整理表	24
表 7 不同電極材料特性[5].....	28
表 8 現有真空設備及儀器盤點表	33
表 9 可飽和變壓器之參數	45
表 10 可飽和電感之參數	46
表 11 其他電路元件之參數.....	46
表 12 安規 IEC60951-1 所列之最低空間直線距離.....	51
表 13 掠角入射收集鏡設計規格	55
表 14 COMSOL DPF 模擬參數.....	59
表 15 DPF 電極設計參數	61
表 16 真空腔體系統設備列表	64
表 17 系統主電路之各項實測數據	67
表 18 放電電漿發光實驗參數	71

中文摘要

半導體產業為全球重要產業之一，且我國於全球半導體晶片製造生產佔比最高。然而我國半導體晶片製造所需之關鍵光源設備大多仰賴國外進口，且國內產業缺乏相應人才，然而其中先進製程量產製造所需之雷射電漿(Laser-produced plasma, LPP) EUV 光源，由於其複雜程度及鉅額投資成本非單一企業或研發團隊能負擔，加上其終端應用也侷限於少數高單價產品，但除了量產光源，周邊配合之應用如檢測等仍需要 EUV 光源。因此本計畫旨在建構國內以放電電漿(Discharge-produced plasma, DPP)機制發光為主之半導體光源模組開發所需之關鍵技術，其複雜度及成本需求相較量產光源簡易、低廉，適合自主研發，並進一步探討 DPP 光源對於未來極具潛力之尖端應用領域(如國防、航太、車用、生醫等)的小批量晶片生產製造、EUV 光源及其應用相關技術研發平台、EUV 檢測設備開發以及次世代超極紫外光(Beyond-EUV, BEUV)光源研發等應用，提升我國半導體設備技術之競爭力。

Abstract

The semiconductor industry is one of the most important industries in the world, and Taiwan has the highest share of semiconductor wafer production globally. However, most of the critical light source equipment required for semiconductor wafer manufacturing in Taiwan relies on imports, and there is also a lack of corresponding experts in this field. However, the laser-produced plasma (LPP) EUV light source, which is required for the mass production of advanced processes, is not affordable to a single enterprise or R&D team due to its complexity and enormous investment costs, and its end-use applications are limited to a few high-priced products. Moreover, EUV light sources are still needed for applications such as inspection. Therefore, this project aims to construct the key technologies required for the development of semiconductor light source modules in Taiwan, mainly based on the discharge-produced plasma (DPP) mechanism, whose complexity and cost requirements are simpler and cheaper than those of light sources for mass production, which is suitable for independent research and development, and to further explore the DPP light source for the future of the cutting-edge applications with great potential (e.g., defense, aerospace, automotive, biomedical and medical applications), We will

further explore the application of DPP light source to the future highly potential cutting-edge applications (e.g. national defense, aerospace, automotive, biomedical, etc.) such as small-lot wafer production and manufacturing, EUV light source and its application-related technology research and development platforms, the development of EUV inspection equipment, and the investigation of next generation beyond-EUV light source, so as to enhance the competitiveness of semiconductor equipment technology in Taiwan.

壹、計畫緣起與目的

一、計畫緣起

隨著摩爾定律的推進，目前最先進的高產能 (High-volume manufacturing, HVM) 半導體製造已進入 5 奈米級以下等級，其中最關鍵的突破是極紫外光 (EUV, extreme ultraviolet, 波長約 13.5 奈米) 微影製程設備與相關技術。而為了滿足 HVM 至少 100 至 200 瓦以上的中間焦點 (Intermediate Focus, IF) 光源輸出功率需求，最後自多種發光機制中選擇較容易逐步研發提高功率的雷射電漿 (LPP) 機制產生 EUV 光並成功導入量產。LPP EUV 光源設計非常複雜，且整體能量轉換效率非常低，造成 EUV 微影設備購置與電費等等維運成本攀升至絕大多數半導體製造公司無法負擔，且目前也有僅有一家 ASML 能成功生產並出貨 EUV 微影設備，導致 5 奈米級以下先進製程成本高昂，僅有相當少數的積體電路產品設計具有足夠高的單價與總銷售量可以符合其經濟效益。而總體 EUV 微影產線大量的電力需求，也造成製造工廠所在地的額外電網與環境負擔。

放電電漿 (DPP) 產生 EUV 光為另一種廣為使用的電漿發光機制，其主要藉由電能產生電漿並利用磁場壓縮方式加熱電漿 (此機制稱為 pinch effect)，使其達到足以輻射出 EUV 波段光的能量，以常見的氣體源 Xe 或 Sn 為例，需要將其電漿加熱至約 25-50 eV。相較於 LPP，DPP 整體能量轉換效率較高，因為 LPP 使用之雷射系統通

常其電轉光之效率不足 10%。然而過去 DPP EUV 光源的研發主要因電極散熱的困難度以及高能電漿接近電極表面，使得光源輸出功率及運轉時間不被看好容易提升至 HVM 所需[1]，近 20 年來商用光源輸出功率大致停留於數十瓦(2π sr)以下等級，長期主要應用於包含先進製程之 EUV 光阻研發、光罩檢測、製程檢測等對產能或光源功率需求較低，對 EUV 光源可取得性需求較高之 EUV 相關技術研發，而近年興起之尖端應用(衛星晶片、國防、車用、生醫等小量高單價產品)，因其特殊應用客製化需求較高，若須採用先進製程提高其性能，成本上較不適合採用大量生產型曝光機，因此 DPP EUV 光源設備精簡、體積小、造價相較於 LPP 光源低廉的特性適合應用於上述領域(目前 20 W 商用等級之 DPP EUV 光源售價約為 3000 萬台幣)。

綜觀現今 EUV 半導體光源技術發展，不管是量產、檢測或其他產業、研究應用，擁有適當之 EUV 光源設備至關重要，然我國 EUV 半導體光源設備多仰賴國外進口，產業亦欠缺相對應人才。因此，本計畫旨在研發適用於 EUV 相關技術研發所需之 EUV 光源系統並規畫分年建構以 DPP 為主之半導體光源模組自主開發所需之關鍵技術，以期未來能夠提升我國半導體產業韌性，並扮演促進國內 EUV 相關技術領域發展的重要角色。

二、計畫目的

為執行核安會委託計畫的「114-116 年度中小功率極紫外光/超極紫外光光源設計、試作與應用研究」研究項目，本年度項目分為「極紫外光光源收集鏡系統設計、模擬與製作」、「放電電漿產生極紫外光光源之電極結構優化」、「極紫外光光源腔體及溫度與壓力控制系統優化」、「高壓脈衝電源電路優化」及「放電電漿產生極紫外光光源測試」五個工作項目，各工作項目之預期進度及查核點列於表 2，各分項之目的及階段成果則分別簡述如下並於後面章節詳述。

工作項目一：

本工作項目之目的為透過光學模擬極紫外光光源之光路來設計可濾出並收集極紫外光波段光源之掠角入射收集鏡，以利後續製程應用如曝光或檢測所需；設計方面將參考文獻上之方法及數值模擬軟體進行模擬，製作方面已尋求國外產學研單位(如 Rigaku、蔡司、Fraunhofer IWS 及 NTT AT 等)討論設計及委託製作之可行性，惟此類客製鏡片價格昂貴，因此預計也將與國儀中心就其光學鏡片製作經驗嘗試共同研發自主收光鏡製程。

工作項目二：

本工作項目之目的為透過嚴謹電磁、電漿模擬技術結合放電電路模型，以研究和建立可靠之放電電漿模型，並進一步以放電電漿模型所產生之電漿參數再透過碰撞-輻射之原子模型模擬產生電漿

輻射頻譜，完成放電電漿產生極紫外光模擬模型，以利優化電極結構設計；製作方面目前已與旭鼎奈米科技完成加工所需之細部調整及製作。

工作項目三：

本工作項目之目的為建置極紫外光光源模組所需之腔體及其周邊模組，包含穩定電漿氣體之真空系統和電漿氣體源監控系統，具體為可安裝電極之機構、真空幫浦孔位、工作氣體通入孔位、電訊號 feedthrough 所需之孔位(包含 CCD 相機訊號、光感測器訊號及電源訊號等)，以及其他必要孔位。其中未通工作氣體時可抽至 10^{-7} Torr 以下真空度，通入工作氣體可穩定維持在 10-100 mTorr 範圍，並透過光感測器、CCD 監控發光效率及電漿狀態，以協助調整整體系統參數，達到可控放電電漿發光之目的，而散熱部分由於目前尚屬於原型測試階段，因此將於後續年度視實際可達之穩定運作功率再行建置電極風冷散熱系統。

真空腔體及周邊設備將以沿用現有設備為主，包含真空腔體一台、真空幫浦(乾式幫浦、渦輪幫浦及離子幫浦各一)、真空計一組、CCD 相機一組及真空閥門數個。模組建置部分目前完成光感測器及配套擷取卡之採購、工作氣體輸入管線及氣壓控制設備安裝、電訊號 feedthrough 之安裝，其餘設備將視後續年度計畫執行需求另行規劃採購或尋求可合作之單位。

工作項目四:

本工作項目之目的為建置可穩定產生高壓脈衝輸出之電源系統，透過嚴謹電路模擬及電路元件選用使電源電路能穩定充放電且能量可有效傳輸至電漿氣體，並使電漿氣體產生足以輻射出極紫外光波段頻譜之高能電漿，具體設計目標詳列於表 1。目前已完成初版優化之磁脈衝電路架構設計、模擬以及製作，並先進行較低功率之測試驗證架構可行性，後續年度待光源模組可穩定運行後再逐步提高至目標規格，以完成符合需求規格之優化電源模組。

工作項目五:

本工作項目之目的為整合電源、腔體及電極等模組，以產生極紫外光並就光源特性進行分析討論，以利探討後續優化方向。目前已完成 DPF 電極之放電電漿發光整合測試，初步測試結果放電電壓可達 DPF 設計架構所需之最低電壓 4~5kV 以上，亦可觀察到放電期間於陽極前端產生特別明亮之電漿壓縮區域，後續將以此為基礎逐步提升光源功率。

表 1 目標脈衝電源系統規格

參數	設計目標
輸入電壓	最大 1.2 kV _{DC} (可變)
輸出瞬間電流最大值	10 kA
輸出電壓	最大 16 kV _{pulse} (可變)
脈寬	最大 500 ns (可變)

工作頻率	1 kHz (可變)
------	------------

表 2 114 年度工作項目預定進度及查核點

工作項目	年月												備註
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
極紫外光光源收集鏡系統設計、模擬與製作				10	20	30	40	50	60	70	80	100	
放電電漿產生極紫外光光源之電極結構優化				10	20	30	50	70	90	100	100	100	
極紫外光光源腔體及溫度與壓力控制系統優化				10	20	30	50	70	90	100	100	100	
高壓脈衝電源電路優化				10	20	30	50	70	90	100	100	100	
放電電漿產生極紫外光光源測試										50	100	100	
工作進度估計百分比 (累 積 數)	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
預 定 查 核 點	114 年 7 月 1 日前完成極紫外光光源收集鏡系統設計、放電電漿產生極紫外光之電極結構優化設計、極紫外光光源腔體及溫度與壓力控制系統優化及高壓脈衝電源電路優化，並繳交期中報告 1 份及 word 電子檔。												
	114 年 11 月 17 日前完成極紫外光光源收集鏡系統製作、放電電漿產生極紫外光之電極結構製作、極紫外光光源腔體及溫度與壓力控制系統製作、高壓脈衝電源電路製作及放電電漿產生極紫外光光源測試，並繳交「114 年度中小功率極紫外光/超極紫外光光源設計、試作與應用研究」期末報告 1 份及 word 電子檔。												

貳、研究方法與過程

1. 極紫外光光源收集鏡系統設計、模擬與製作

有別於傳統光源，多數材料對於極紫外光光源所使用的 13.5 奈米波段吸收率都相當大，因此為提高效率，極紫外光光源需要在低真空環境下運作並且所有光學元件均須採用反射式設計取代傳統穿透式系統，以盡可能收集來自電漿源的光線，並傳輸至應用腔體。

1.1 極紫外光光源收集鏡的類型與設計原則

目前極紫外光光源收集鏡系統主要分為正入射多層膜反射鏡和掠角入射全反射鏡兩種類型(如圖 1)[2]。

1.1.1 正入射光學系統

正入射反射鏡的表面通常採用多層薄膜結構，透過交替堆疊高折射率與低折射率材料（例如 Mo/Si）形成一種布拉格反射器。當膜層的厚度約為入射光波長的一半時，反射波之間會產生建設性干涉，從而獲得高反射率。[1]

極紫外光用多層膜光學元件薄膜材料選擇主要為 Mo 與 Si，其於 13.5 nm (4% 頻寬)之反射率可達 70% 以上，但由於極紫外光微影設備之光學路徑通常包含 10 個以上的多層膜鏡面，因此總系統的有效能量傳輸僅約 2%。

正入射收集鏡因多層膜其本身對於波長選擇性較佳可更好濾出頻內(in-band)波段光，但 DPP 光源其發光立體角受電極影響最大僅

有 2π sr，使用正入射將會進一步減少可收集之光源，因此本架構通常僅用於可在近乎自由空間產生電漿之 LPP 光源。

1.1.2 掠角入射光學系統

掠角入射光學系統顧名思義則是利用入射角大於臨界角度(即小掠射角)時發生的全反射來收集光線，其鏡片通常成橢球或拋物面，並可透過多組共心鏡片提高收光效率(如圖 2)，鏡片材料則通常會將金或鉑等鍍在基底殼上作為反射層，常用材料於極紫外光波段之反射率與掠射角之關係如圖 3，其中以 Ru 效果最佳，在掠射角於 20 度時，反射率仍可達 60% 以上。

1.2 掠角入射收集鏡的關鍵特性與設計要求

本計畫預計採用之收集鏡架構考量到收光效率以及實驗性質(類干涉微影及非成像偵測實驗)對於光源頻內波段限制較不嚴苛的需求，將採用掠角入射架構。掠角入射極紫外光光源收集鏡所需之特性大致可整理如表 3。

表 3 掠角入射收集鏡設計考量

收光效率	為了提高收集效率，必須將收光立體角最大化，並減少其他組件遮蔽(如安裝用機構等)
反射率	表面必須在極紫外光波長下具有最大反射率，因此選擇如金、鈹、鈦等高反射率材料，並維持小掠射角
散熱需求	電漿光源輻射範圍寬廣，涵蓋極紫外光、深紫外光、可見光和紅外光。這些頻外輻射會被吸

	收，導致光學元件發熱。因此視運作功率，收集鏡可能需要能承受高溫或具備有效散熱機制。
使用壽命	電漿光源會噴射高能離子、中性原子和碎片等污染物，對光學元件造成濺射破壞、污染或結構性損害，從而降低反射率。因此電漿產生區域與收集鏡之間的距離必須足夠大，以便設置有效的碎片排除機構

1.3 掠角入射收集鏡的幾何類型

常見的掠角入射收集鏡幾何設計包含(如圖 4)

- 拋物面鏡：用於將點光源發出的光線轉化為平行光束，或反之
- 橢圓面鏡：旨在使光線在兩個焦點之間傳播
- Wolter-type 反射鏡：結合了雙曲面和橢圓面兩種表面輪廓的設計。光線經過兩次反射，且兩次反射均以小掠射角進行，能有效減少光學像差並提升聚焦品質，常以多組同心鏡殼的形式以提高收光效率

計畫預設計之收集鏡幾何形狀將考量上述所需特性，並以文獻所探討之設計方法[26]，透過光學模擬軟體，探討適合之鏡面材料及結構並設計符合應用需求之光路及可兼容不同電極結構之收光鏡系統，如嘗試加入可動機構因應不同電極結構 pinch 於 Z 軸方向位置變化，或加大收光立體角等。

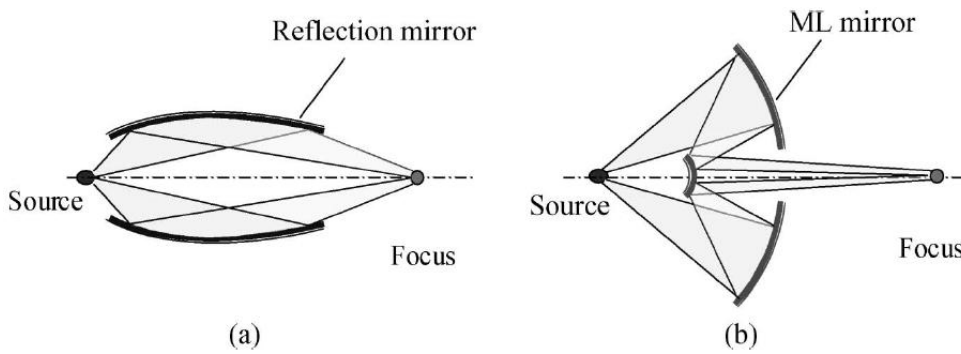


圖 1 兩種收集鏡系統示意圖:(a)掠角入射(grazing-incidence)收集鏡；(b)正入射(normal-incidence)收集鏡[2]

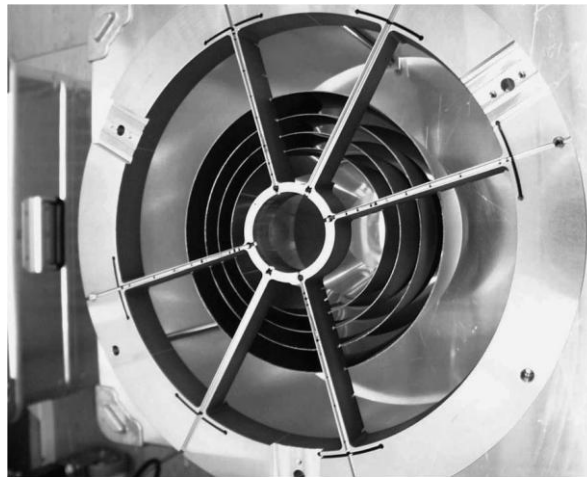


圖 2 四組鏡片組成之收光鏡[2]

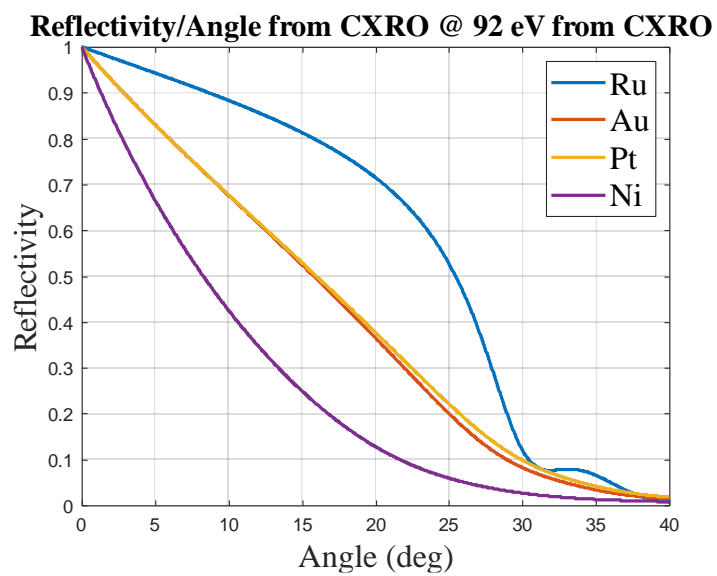


圖 3 Ru, Au, Pt, Ni 於極紫外光波段下之反射率與掠射角關係圖[27]

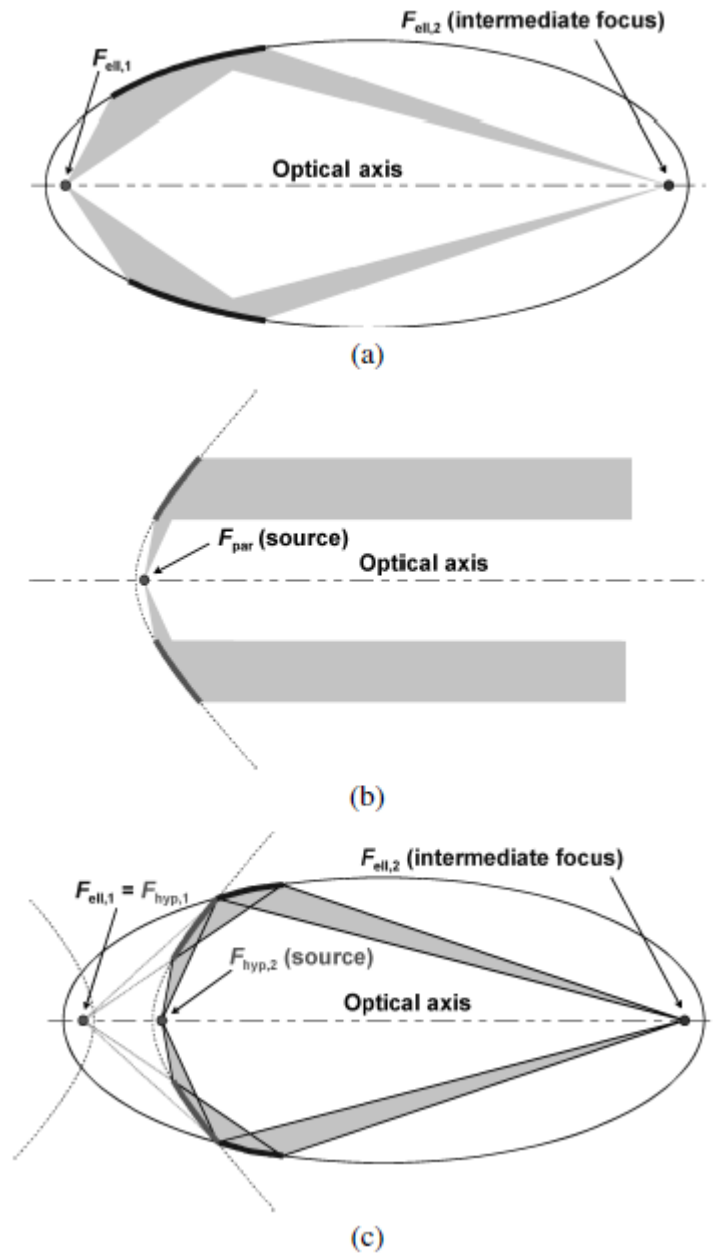


圖 4 收集鏡架構示意圖 (a) 橢圓面鏡;(b) 拋物面鏡;(c) Wolter-type 收集鏡[2]

2. 放電電漿產生極紫外光光源之電極結構優化設計

本研究計畫之光源模組開發平台採用 DPP 光源，此類光源相較於 LPP 具有體積較小、成本效益較高的優勢。DPP 光源的 EUV 產

生機制主要仰賴 Z 軸壓縮 (Z-pinch) 效應，此機制利用電流的磁性壓縮來產生高溫、高密度的電漿，從而發射極紫外光光子。放電電漿產生極紫外光機制及電極結構方面，就計畫團隊所知範圍羅列於表 4，並選擇四種常見結構進行研究，如圖 5 所示，包含文獻探討較完整之濃密電漿聚焦(Dense plasma focus, DPF)架構[2]、驅動電路較簡單之中空陰極觸發(Hollow-cathode-triggered, HCT)架構[4]、運作壽命較長之無電極(Electrodeless Z-pinch)架構[5]及毛細管 Z 軸壓縮(capillary Z-pinch)[6]，前述架構基本運作原理將分別陳述於本節。惟 Star Pinch 架構因文獻數量較少(僅數篇文獻於 2005 年前後)對於其詳細設計規格較難以確立，因此考量計畫可行性暫時不對此架構進行深入探討。這四種架構目前國際上已發表之光源發光功率整理如表 5，而以檢測或客製應用為主之光源功率大致在 1-40W 之間(Fraunhofer ILT、Research Instruments、Energetiq 等)，若以本計畫現階段採購之 1kW 電源供應器及轉換效率 0.5% 估算，發光效率大約在 0.5W，後續待電源之功率提升後應可達到 10W 前後之國際水準。

Z-pinch 機制中，大電流(I)會在電漿周圍產生環向磁場(B)。磁場壓力($B^2/2\mu_0$)若超過電漿粒子壓力(p)，則電漿開始自我收縮。兩者之間的平衡關係可簡單用 Bennett relation 表示(如下式)

$$\mu_0 I^2 / 4\pi = (Z_{eff} + 1) N_i k T_e$$

其中 Z_{eff} 為離子平均帶電量、 T_e 為電子溫度、 N_i 為離子密度。而為有效發射 13.5 nm 的極紫外光，電漿溫度必須達到約 20 至 30 eV 的範圍。此溫度有助於產生高價態離子，例如 Sn 的 Sn^{8+} 至 Sn^{13+} 離子，或 Xe 的 Xe^{10+} 離子[1]。

表 4 各種 DPP 光源架構優劣表

架構	優點	缺點
DPF	電極結構簡單 發光功率高	電極壽命較低 電漿位置控制問題
HCT	驅動電路較簡單 能量效率較佳	收光範圍較小
Electrodeless Z-pinch	穩定性高 磁芯壽命長	磁芯結構較複雜 發光功率較低
Capillary Z-pinch	電極結構簡單 放電電漿穩定度較高	絕緣層壽命較低 收光範圍較小
Star Pinch	電極壽命較長	電極結構複雜

表 5 四種 DPP 光源架構發光功率整理表

架構	發光功率(2% 頻寬, $2\pi sr$)
DPF	76 W [Cymer] [29]
HCT	40 W [Fraunhofer ILT] [30] 750 mW [Research Instruments] [31]
Electrodeless Z-pinch	40 W [Energetiq] [32]
Capillary Z-pinch	189 W [Ushio/EUVA] [33] 1.4 W [Harbin Institute of Technology] [34]

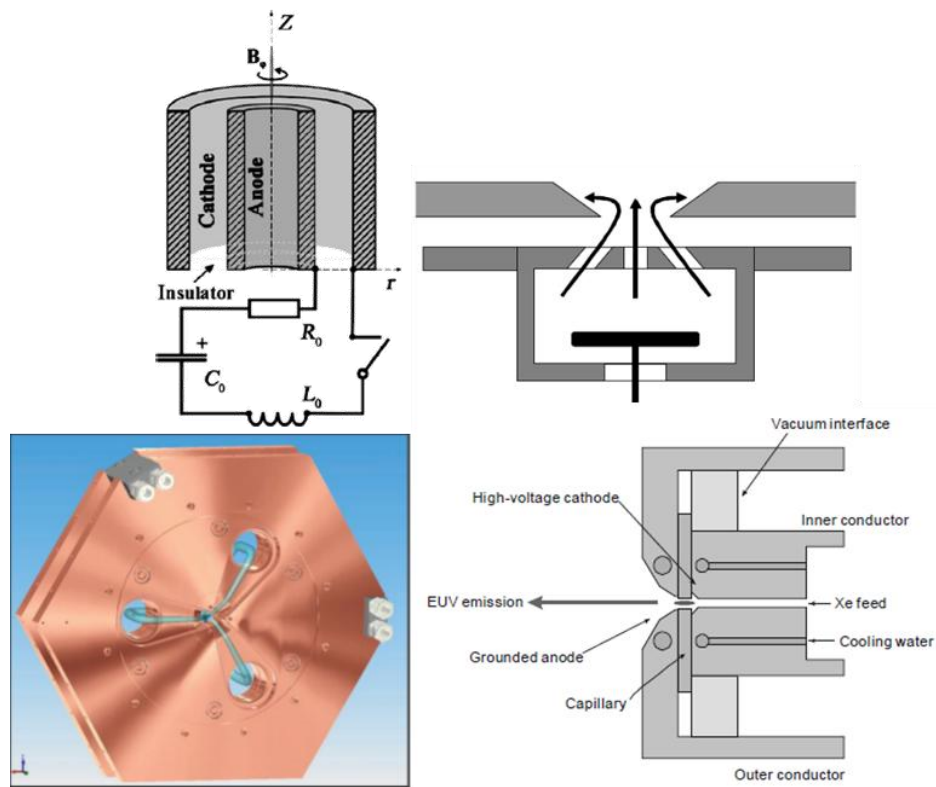


圖 5 濃密電漿聚焦(Dense plasma focus)架構(左上)[2]；中空陰極觸發(Hollow-cathode-triggered)架構(右上)[4]；無電極(Electrodeless Z-pinch)架構(左下)[5]；毛細管 Z 軸壓縮(capillary Z-pinch)架構(右下)[6]

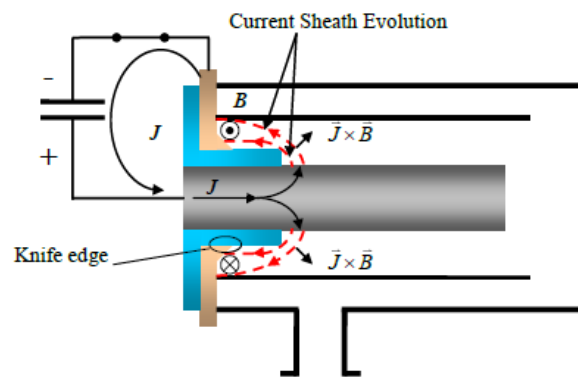
2.1 濃密電漿聚焦(Dense plasma focus)架構

DPF 是一種非圓柱形 Z-pinch 架構，其核心運作基於電磁壓縮與電漿體動態不穩定性。DPF 裝置通常採用 Mather 或 Filippov 型的同軸電極配置，最終被壓縮的高能電漿依照輸入脈衝電源、電極結構及氣體源等條件變化可以產生高能粒子、X-ray、EUV 甚至中子輻射。DPF 放電過程大致上可以分成以下關鍵階段如圖 6 所示[7]

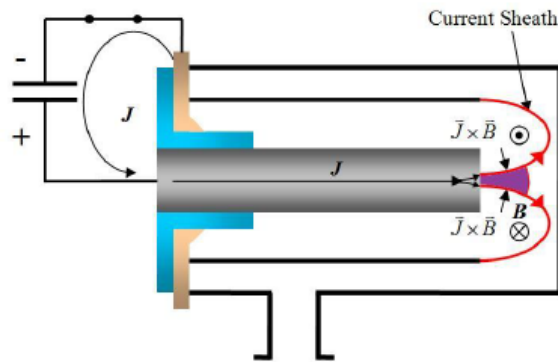
- a. 氣體崩潰階段(Breakdown phase)：根據帕邢定律(Paschen's Law)，當同軸電極間的脈衝電壓達到擊穿電壓時，此時工作氣體被擊穿，並沿著絕緣層表面形成電漿鞘層(Plasma

sheath)，並形成圖 4(a)之放電迴路。此階段的特性強烈依賴於氣體壓力、電極和絕緣體尺寸。

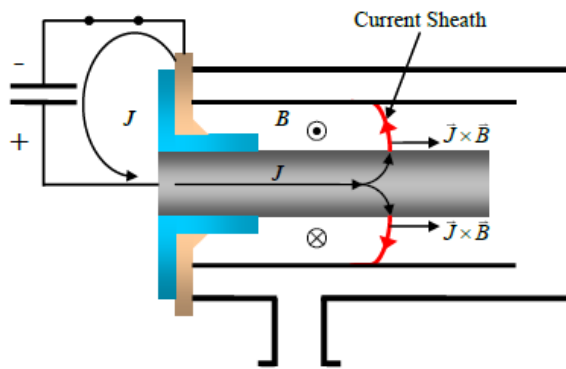
- b. 軸向加速階段(Axial acceleration phase)：電漿鞘層內徑向流動的電流(J)與其產生的環向磁場(B)相互作用，產生勞倫茲力($J \times B$)，推動電漿鞘層沿著同軸電極軸線向開口方向加速移動。
- c. 徑向壓縮階段(Radial collapse phase)：當電漿鞘層抵達同軸電極尾端，靠近內側電極的部分將開始往徑向移動，並與外側電極形成弧狀電漿電流，此時所受到的勞倫茲力轉向強烈徑向內縮，在電極前端之軸線上形成一個高溫高密度的電漿壓縮區域(Pinch)，並視 DPF 設計參數及工作氣體產生高能離子、電子、soft/hard x-ray 輻射甚至中子等等。若 Pinch 現象發生在放電電流峰值附近可獲得最佳效率



(a)



(b)



(c)

圖 6 DPF 電漿放電流程示意圖：(a)氣體崩潰階段；(b)軸向加速階段；(c)徑向壓縮階段[7]

2.2 中空陰極觸發(Hollow-cathode-triggered)架構

HCT 架構基於擬火花放電(Pseudospark Discharge)原理。此設計旨在改善傳統 Z-pinch 的點火效率和壽命問題。HCT 的運作原理及特性大致整理如下

- a. 電極架構與放電機制：HCT 架構由兩塊中心帶有孔洞的平行板構成，通常在 10-100 Pa 低壓環境下運行，使操作於帕邢曲線的左側分支。施加脈衝高壓後，電離過程首先在空心陰極(Hollow Cathode)區域發生。電子被陽極吸引，而移動較慢

的離子在空心陰極內形成虛擬陽極(Virtual Anode)，引發電子在空心陰極中的擺動效應(Pendulum Effect)，增強電漿生成效率如圖 7 所示[8]。

- b. 放電電流與電漿壓縮：當陰極附近電場足夠高時，便會觸發自我崩潰(self-breakdown)，電容開始放電並產生數十 kA 至 MA 級別的脈衝電流，電流通常集中在孔洞和板間隙流動，產生 Z-pinch 效應，並依依孔洞幾何形狀形成直徑數百微米、軸向長度數毫米的高溫高密度電漿柱。
- c. HCT 架構特性：因為不需要使用大電流開關，電容與電極系統和電漿耦合電感較低，降低驅動電路複雜度及提高能量利用效率，亦可於陰極加入觸發電極使帕邢曲線偏移(如圖 8)，並透過非功率開關控制觸發電極達到可控放電或增加操作空間，此外電漿壓縮產生位置附近無絕緣材料，可提高冷卻效率並減少材料濺射損傷。

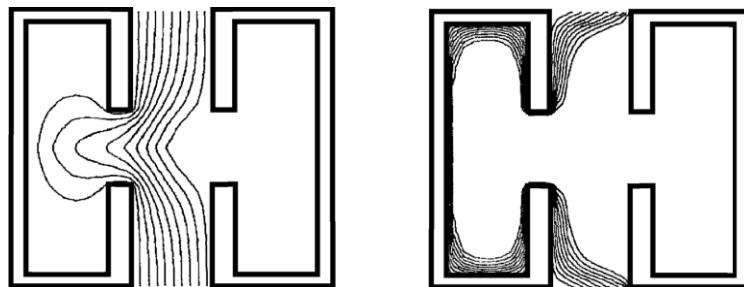


圖 7 偽火花放電模擬示意圖；虛擬陽極產生過程之電位變化(左)；
中空陰極電漿產生階段之電位(右)[8]

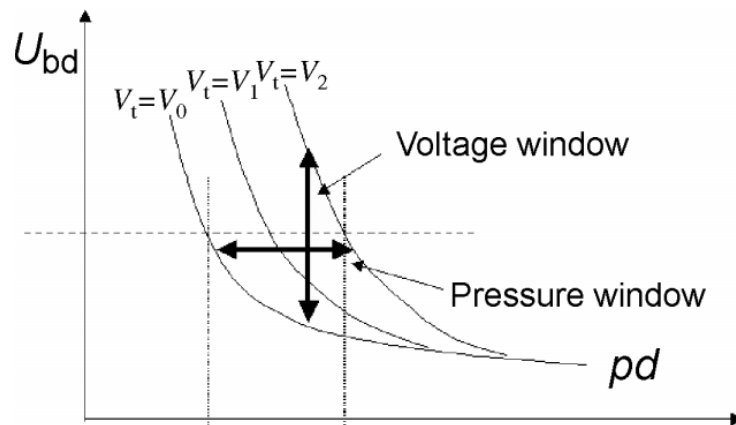


圖 8 透過調整觸發電極電位達到可控放電

2.3 無電極(Electrodeless Z-pinch)架構

無電極架構特點為其運作基本原理類似變壓器，該概念主要為 Energetiq 所提出之專利並於 2005 年前後推出第一套 10 W(2π sr)功率之商用機台並持續研發至今。其運作主要是透過電感耦合的方式而非電極放電使能量轉移至電漿產生電漿電流，避免了電極與電漿的直接接觸

- a. 運作原理：變壓器的初級電路由兩片平行銅板組成，電流在其中徑向流入和流出，並通過中心的導電管進行軸向連接。次級電流通過電磁感應在電漿中產生，沿三個並聯的迴路流動（等效於三個電漿回流孔）並在中央孔洞匯合(如圖 9 所示)。當初級電路中的電流增強時，感應的次級電流在中央孔洞產生足夠強大的磁場，對電漿進行壓縮，從而產生極紫外光。
- b. 無電極架構設計優勢：電漿電流自行形成閉合迴路，無需電

極介入，因此無電極殘骸產生，加上電漿迴路受到磁場約束遠離銅板，提供了優異的空間穩定性並進一步減少對材料的損害，這些特性大幅提高運作壽命，使其成為極紫外光檢測應用中，對於長壽命、低污染要求的理想選擇。

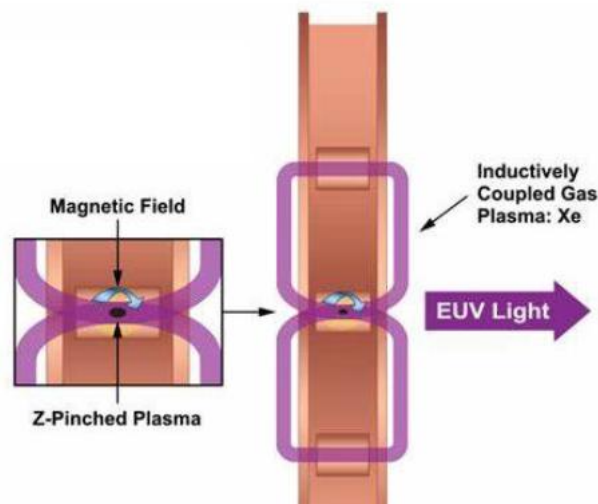


圖 9 無電極架構核心與運作機制示意圖[9]

2.4 毛細管 Z 軸壓縮(capillary Z-pinch)架構

毛細管放電是通過固體內的狹窄通道進行電放電而形成的電漿。Capillary Z-pinch 是 Z-pinch 的一種特殊形式，它利用小管徑絕緣層的幾何約束來實現特定的電漿特性。

- a. 運作機制：Capillary Z-pinch 基本運作原理類似其他 Z-pinch 架構，透過大電流放電使電漿電流由陰極經過毛細管流動至陽極時(如圖 10)，受其自身磁場往軸心壓縮，形成高溫電漿。其獨特之處在於其小管徑之絕緣層結構，使電漿尺寸（毛細管直徑）小於電漿的 skin depth 產生體積式磁壓縮 (volumetric magnetic compression)，使 Capillary Z-pinch 具有較高的穩定性、均勻性和軸向一致性，並且更接近局部熱力

學平衡。

- b. Capillary Z-pinch 架構優勢與設計考量：Capillary Z-pinch 因其特殊絕緣層結構對電漿形狀有較佳的控制效果能夠在相對較長的時間內保持高溫電漿，但由於放電電漿接近絕緣管，其絕緣層管壁較容易受到損傷，影響其使用壽命，其電漿射流(plasma ejection)也可能從毛細管開口噴出，使汙染緩解系統成為需要考量的設計因素，並且其毛細管結構也會減少後續可接收 EUV 光源之立體角。

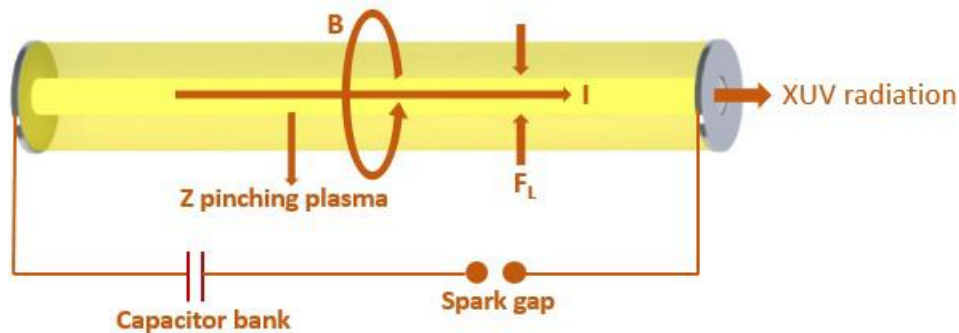


圖 10 毛細管 Z 軸壓縮示意圖[10]

2.5 放電電漿產生極紫外光機制模擬

本計畫之核心目標在於透過計算物理模型理解和預測 DPP 光源中產生極紫外光的電漿行為，以最終優化光源效能和設計。電漿模擬涉及複雜且高度耦合的多物理場問題。常見的電漿模型主要可分為以下兩種類型：

- a. 磁流體動力學(Magnetohydrodynamics, MHD)方法：將電漿視為連續、準中性 (quasi-neutral) 的導電流體，並將流體力學與電磁學方程式耦合求解。理想 MHD 模型假設電漿是強烈碰撞的，即碰撞時間尺度遠短於其他特徵時間。MHD 方法由於計算效率相對較高，且適用於較大時間和空間尺度，因

此適合用於模擬 DPP 裝置（如 Z-pinch、DPF、Capillary）在磁性壓縮過程中的整體電漿狀態和宏觀動力學。

- b. 粒子單元法 (Particle-in-Cell, PIC) 方法：將帶電粒子視為離散實體，透過自洽 (self-consistent) 的方式求解電磁場與微觀粒子動力學。雖然 PIC 對於描述電漿粒子動力學模型的精確度更高，但由於其計算成本高於 MHD 方法，通常用於描述 breakdown 等涉及較小空間尺度的微觀機制，或用於模擬快速離子的傳輸等。

2.5.1 模擬模型架構與耦合物理

為建立一套可靠的 DPP-EUV 產生模型，模擬須考量電漿動力學模型與多個物理模組(如表 6)並進行適當整合。

表 6 模擬需考量之物理模型整理表

物理模型	關鍵功能
MHD	包含質量、動量和能量守恆定律，需要考慮電漿體熱傳導、以及電極與電漿之間的能量交換
外部電路模型	電漿是電路中的一個動態元件，模擬須與外部電路模型耦合，以準確描述電壓、電流和電感等參數隨時間的變化，例如確保電流峰值與最大電漿壓縮時間一致
原子物理模型	需整合原子數據（如電子波函數、能階、躍遷機率）和碰撞-輻射 (Collisional-Radiative, CR) 模型。這些模型用於計算電漿的平均電荷態、離子能階分布、以及決定極紫外光發光效率的輻射損失率等

以 DPP 而言，由於涉及較大時間、空間尺度，較適合使用 MHD 方法模擬電漿整體之狀態[11][12]，後續需要進一步提升精度以優化

光源設計例如模擬放電產生 breakdown 時的機制可再使用 PIC 模擬更精準的粒子狀態[13]，或採用混合式方法於 MHD 模擬變化較大的區域(如 pinch 附近)再引入 PIC 方法以兼顧計算效能及關鍵區域的粒子狀態。除了電漿動力模型，尚須整合原子物理(包含電子波函數、能階、躍遷機率等)及輻射傳輸等物理模型方能建立完整的放電電漿產生極紫外光模型。本研究採用耦合 MHD 與電路模型的方法，並將原子物理和輻射計算作為後處理 (Post-processing) 步驟，以實現計算效率與物理精度的平衡。

2.5.2 MHD 與電路模型建構

使用 COMSOL 建構 MHD 模型結合其內建之電路模型模擬放電電漿之參數(溫度、密度等，如圖 11)，並參考 Energetiq 研發超極紫外光光源之模擬方法[12]，將前述參數輸入美國國家標準技術研究所(NIST)所提供之碰撞-輻射原子模型模擬軟體 FLYCHK[14]或其他商用軟體(SPECT3D[15]等)計算電漿離子能階分布(charge state distribution)及特徵線譜(line radiation)，如圖 12，以求得不同工作參數下之輻射頻譜。最後透過實際實驗系統的回饋，以建立可靠放電電漿產生極紫外光機制之模擬模型，模擬流程如圖 13 所示。

放電電漿模擬將先參考相關文獻資料建立各電極架構之模擬參數，並整理文獻上可產生 EUV 波段輻射之電漿放電實驗量測結果作為初步對照資料，以優化模擬模型使其更加精準。具體驗證方法除了透過量測之放電電流波型變化，也將透過 CCD 或光感測器所收集之電漿狀態及輻射能量做為模擬模型之可信度驗證。

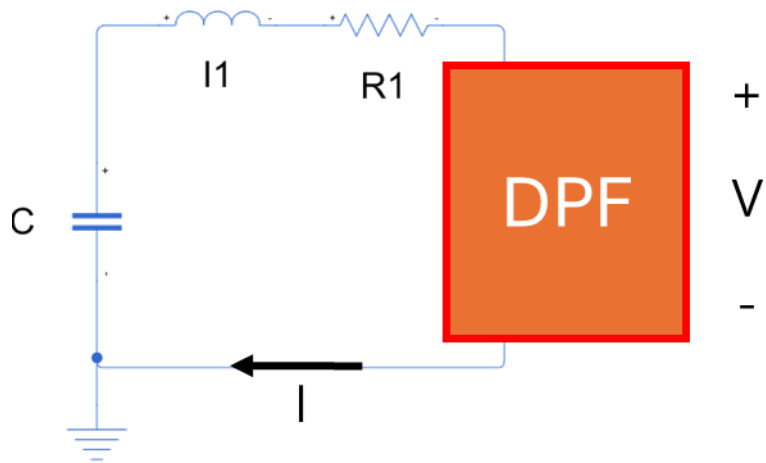
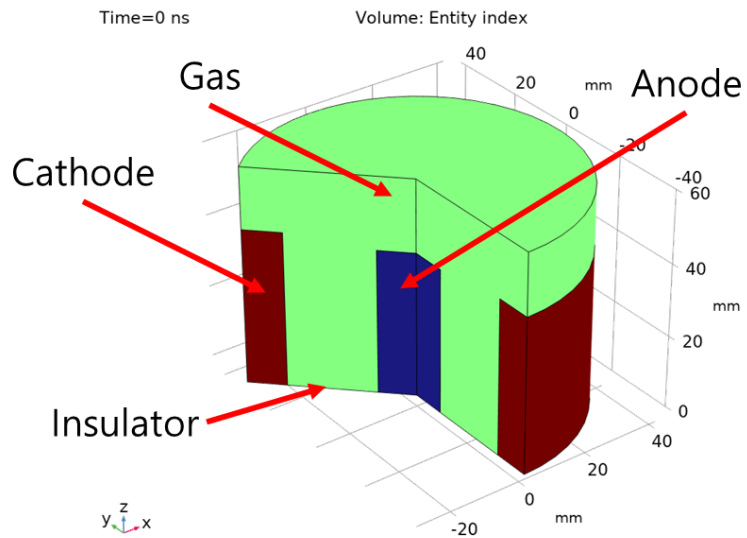
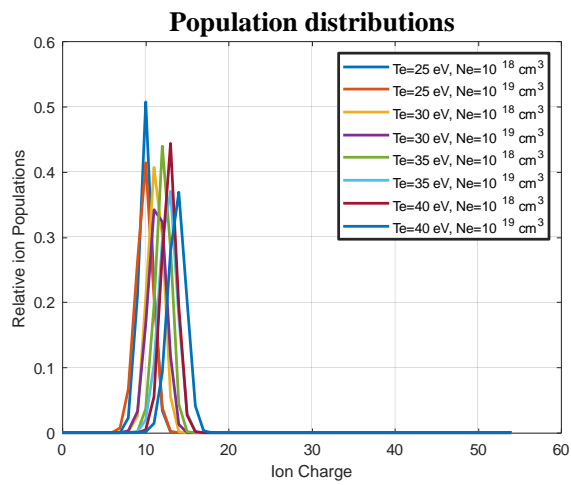


圖 11 DPF 電極結構 COMSOL 建模及模擬示意圖



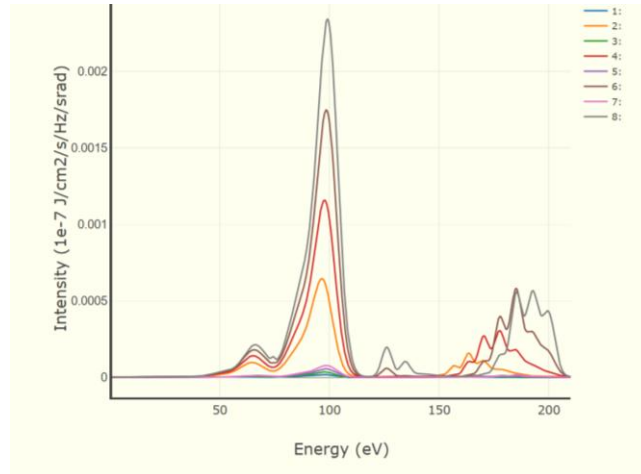


圖 12 FLYCHK 模擬不同電漿溫度之電漿能態分布比較圖(上); 輻射頻譜比較圖(下)

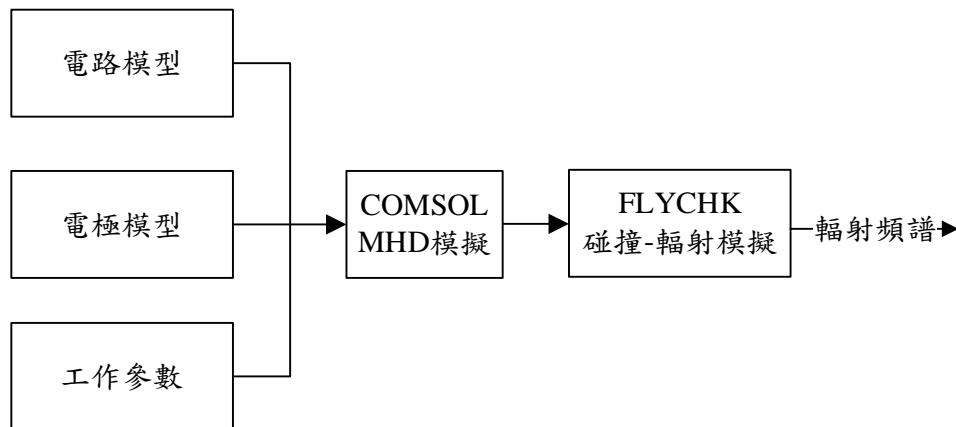


圖 13 放電電漿產生極紫外光模擬流程

2.6 放電電漿產生極紫外光之電極結構製作

DPP 光源的關鍵挑戰之一，在於電極壽命與由此產生的碎片污染問題。當電漿放電時，會在極短時間內產生高密度、高溫電漿，導致電極材料遭受嚴重的侵蝕，進而污染光學系統組件（如收集鏡），並降低整體光源性能，因此，電極結構設計和材料選用必須考量以下需求：

- a. 高能粒子濺射和極端熱負荷
- b. 有效處理脈衝放電產生的巨大瞬間熱量和平均熱量

c. 具備低電阻與低電感，以最大化電能至極紫外光的轉換效率

因此電極材料選用考量依據主要為耐熱性及抗侵蝕能力，此外為了提升整體轉換效率，較低的電極阻抗亦為電極材料選擇的重要因素。對於各種不同電極材料特性，根據文獻上比較與整理[1]，可確立主要候選材料及其特性，如表 7。結構設計方面，目前以較具可行性與成熟度之結構(如 DPF 或 Capillary Z-pinch)優先進行設計與製作，並結合 2.5 節之模擬方法，以確保階段性成果達成。而零組件耐受方面，除了直接面臨電漿的電極以外，其他部份零組件應不會受到影響，後續也將嘗試對電極表面以抗蝕材料進行鍍膜以提高電極本身耐受性。

表 7 不同電極材料特性[5]

			Cu	Mo	W	Ti	Si	C	SiC	stainless steel
Binding energy	E_0	[eV]	3.5	6.8	8.9	4.9	4.6	7.4	6	
Mass	M	[u]	63.5	96	183	48	28	12	20	
Atomic number	Z	[1]	29	42	74	22	14	7	10	
Temperature of fusion	θ_m	[°K]	1356	2893	3683	1941	1956	2773	3103	1773
Thermal conductivity	λ_T	[W/m°C]	384	120	150	22	150		150	47
Density	ρ_{mat}	[g/cm ³]	8.9	10.3	19.3	4.5	2.3	2.1	3.2	7.8
Specific heat	c_m	[J/g°C]	0.39	0.25	0.13	0.52	0.70		0.80	0.48
Latent heat	L_f	[J/g]	205	375	192	394	1786		360	272
Rate of erosion	Y	[1]	3.7	3.0	3.4	2.5	2.0	1.2	1.4	
Sputter erosion		[10 ⁻²³ cm ³ /ion]	4.4	4.7	5.4	4.4	4.0	1.2	1.5	
Critical energy density	e_{crit}	[J/cm ²]	1.2	2.0	2.8	0.4	1.5		2.0	0.7

3. 極紫外光光源腔體及溫度與壓力控制系統優化

極紫外光光源腔體及溫度與壓力控制系統方面，由於極紫外光容易被多數材料吸收，且放電過程之電漿處於不穩定的狀態，電漿

壓縮位置、電漿溫度及電漿密度分布等參數皆有可能因氣壓不穩定受影響，必須仰賴精密控制的腔體與環境子系統。

DPP 腔體設計主要需考量的因素包含以下

- a. 極紫外光吸收與氣流控制：極紫外光會被工作氣體吸收，這會降低輸出功率。因此，必須精確控制氣流，以確保工作氣體分佈均勻，維持電漿壓縮位置穩定，並避免 EUV 輻射被過多工作氣體重新吸收。
- b. 熱負荷與熱管理：在脈衝放電過程中，電極會承受極高的能量負荷，例如脈寬約 200 ns 的脈衝能量密度可達 $>1 \text{ J/cm}^2$ 或 $\sim \text{MW/cm}^2$ 。這種瞬間高熱負荷可能使電極溫度升高，若廢熱無法及時排除，將導致電極變形，影響系統穩定運作。
- c. 碎屑污染與收集鏡壽命：放電產生的高能離子和中性粒子會濺射出污染物，並沉積在關鍵光學元件上。此類污染會降低收集鏡的反射性能和使用壽命，因此碎屑去除系統的考量對於極紫外光源模組長期穩定運作相當重要。
- d. 電漿量測系統：為確保 DPP 光源的性能與穩定性，必須建立精確的光源檢測系統，以量化極紫外光能量、功率、光譜和空間特性等參數。

3.1 真空腔體系統

真空腔體系統綜合參考文獻之極紫外光光源腔體設計 [16][10](如圖 14、圖 15)，確立所需孔位之尺寸和數量以及周邊模組

等，包含工作氣體氣流控制及輸入孔位、電極及電源 feedthrough 孔位、真空幫浦孔位、壓力監控孔位、光感測器、CCD 及出光孔位等。

腔體結構以過去本團隊與國儀中心合作設計製造之極紫外光製程腔體為基礎(如圖 16)，修改設計使其符合極紫外光光源腔體需求，如圖 17 架構，並完成製作。同時也將盤點使用現有設備及真空腔體零組件如表 8 和圖 18，以進行原型測試及減少需採購之設備。

與國儀中心合作之具體設計及製作流程主要為本計畫團隊先行完成初版腔體各模組的設計及需求規格，再透過國儀中心設計真空設備及機構的經驗完善設計圖並製作或建議適合的供應商，以完成腔體模組零件之採購與製作。

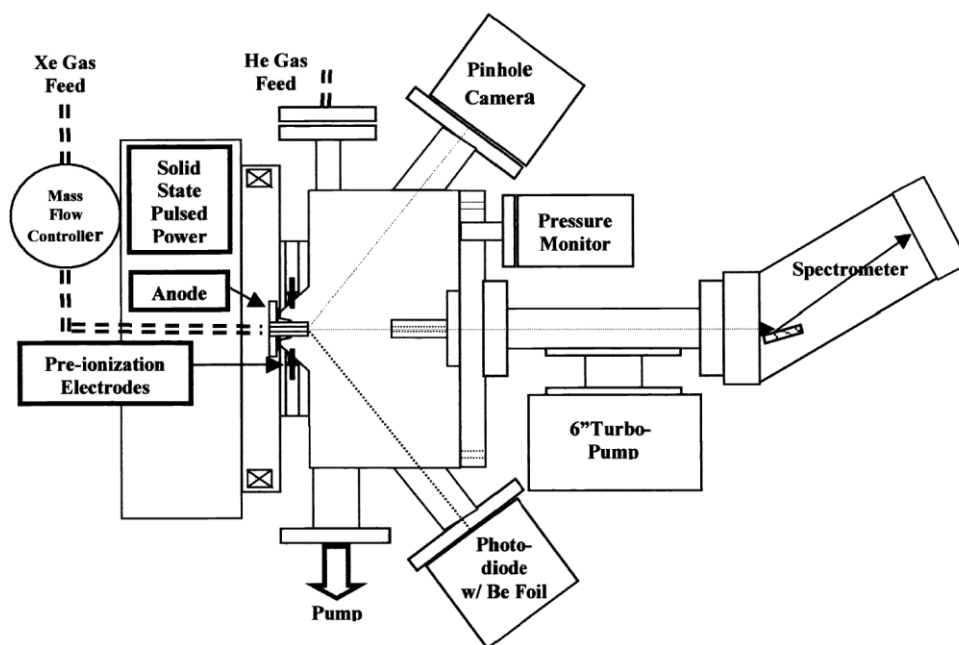


圖 14 Cymer DPF 光源模組架構圖[16]

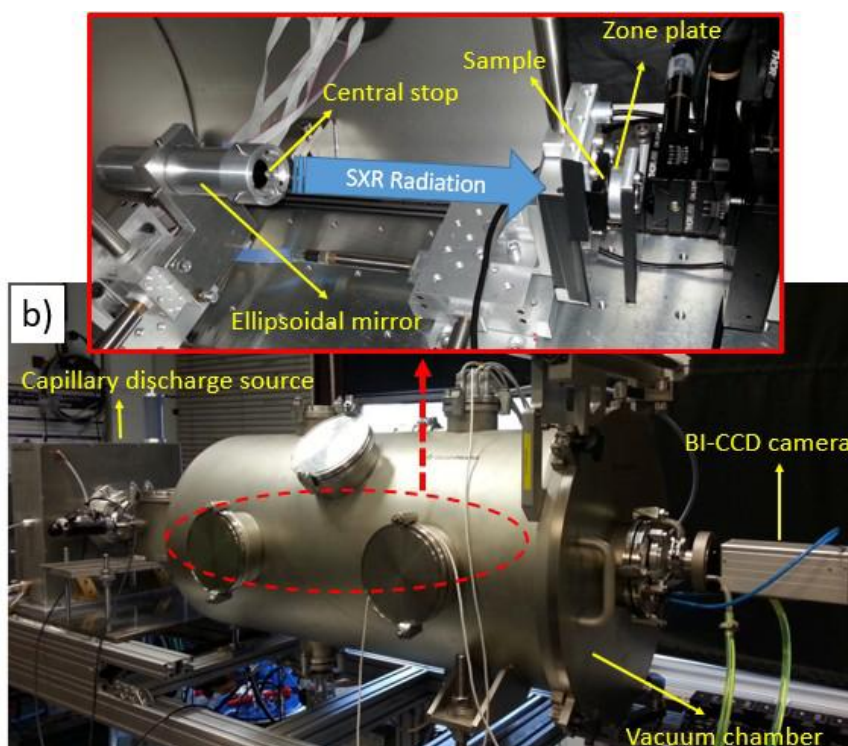
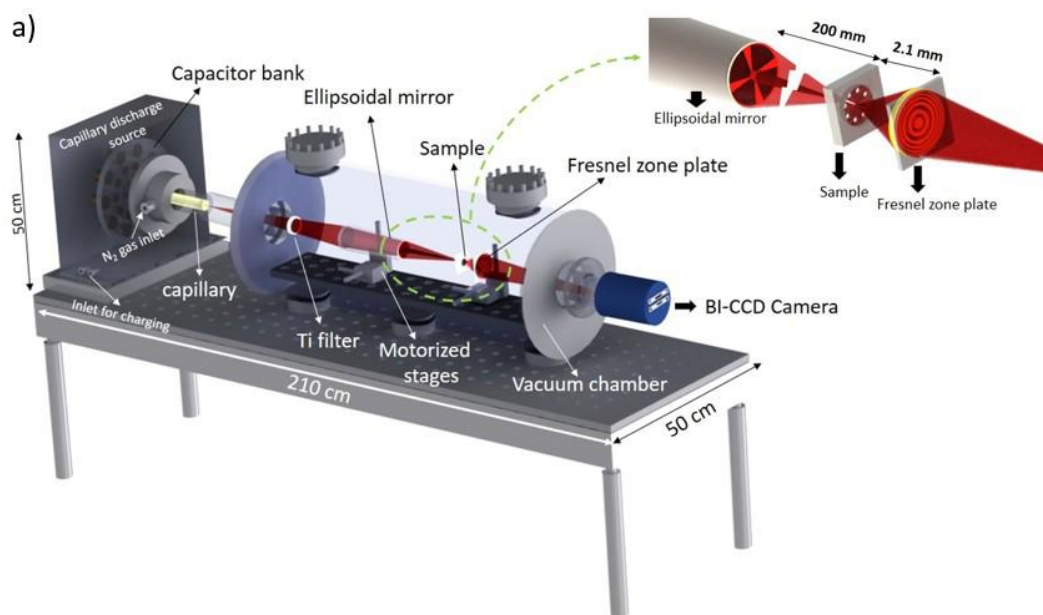


圖 15 布拉格捷克理工大學 Capillary Z-pinch 光源模組(a)架構圖；
(b)實體照片[10]



圖 16 台大-國儀中心極紫外光製程腔體示意圖

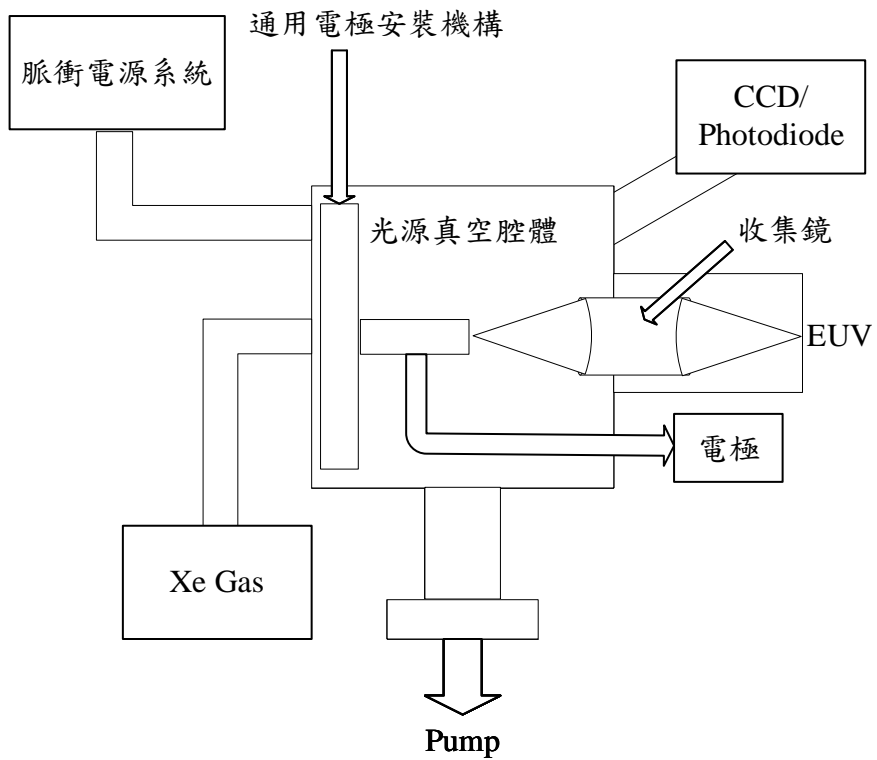


圖 17 光源模組開發平台架構示意圖



圖 18 可用於極紫外光光源測試之真空腔體

表 8 現有真空設備及儀器盤點表

設備名稱	廠牌型號	型號
渦輪幫浦	Purge	V81M Turbo Pump
離子幫浦	Varian	Valcon 150 StarCell Ion Pump
乾式幫浦	Agilent	SH-110 Scroll Pump
乾式幫浦	Agilent	IDP-15 Scroll Pump
離子幫浦	Agilent	Valcon Plus 75 StarCell Ion Pump
真空計	Edwards	APG100-XM
真空計	Agilent	UHV-24 Ion Gauge

3.2 電極散熱考量

電極的有效熱管理是提升 DPP 光源功率和維持穩定性的核心技術。電極在高能電漿中會承受極高的熱負荷，文獻指出，以鎢電極為例，在 DPP 系統中，大約 70% 的總輸入能量會保留在電極表面 [2]。因此，若在高工作頻率下不能及時散熱，可能導致電極熔化。

目前以本計畫已採購之高壓直流電源，其功率為 1kW，以 70% 估算散熱能力至少需 700W，至多 1kW，一般水冷散熱設備加裝於電極基座應足以使用，後續可穩定運作並逐步提升功率後再參考文獻提到之中空電極設計增加散熱接觸面積以提高散熱能力，如圖 19。

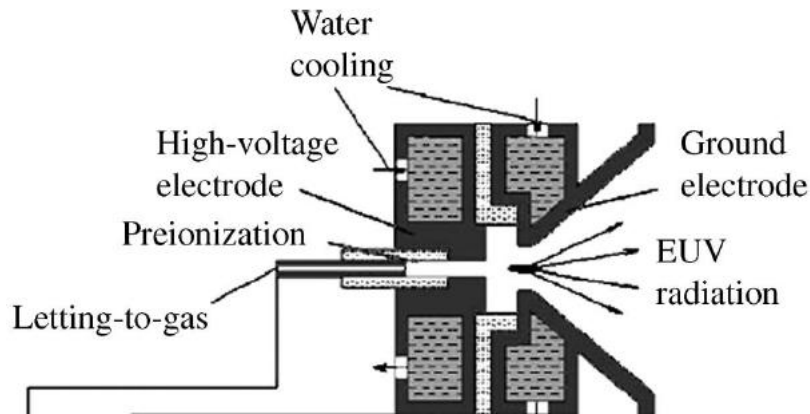
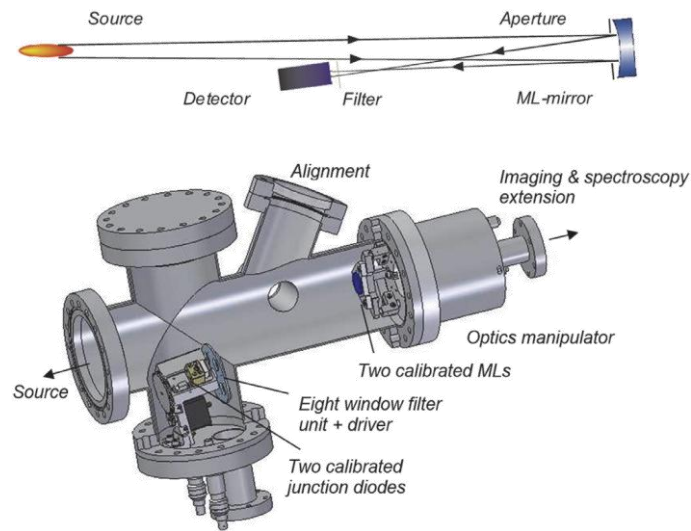


圖 19 中空電極水冷散熱系統示意圖[2]

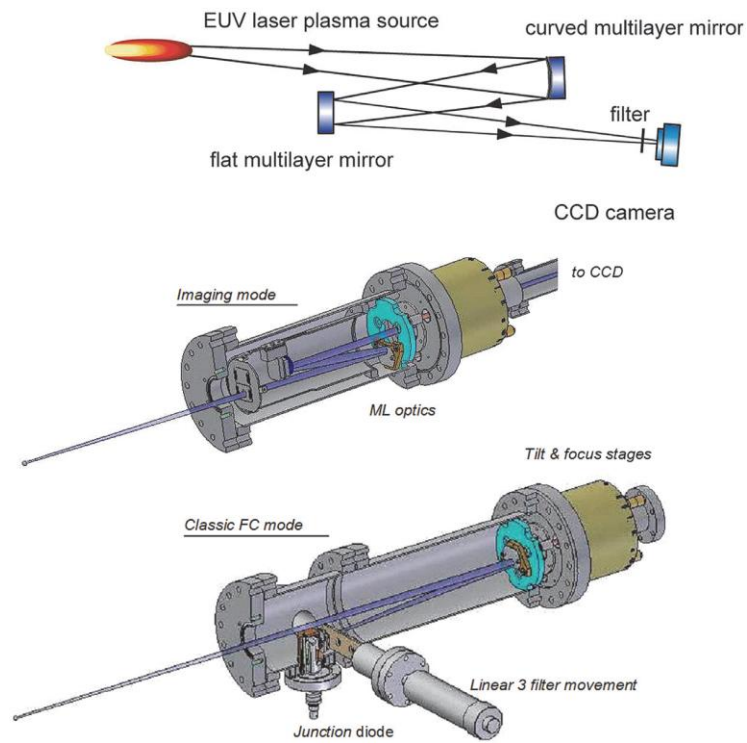
3.3 光源檢測(Source Metrology)系統

極紫外光光源檢測主要目標是量化光源的關鍵參數，包括其能量、功率和光譜特性。國際上主要由 ASML 與 SEMATECH 先後於 2000 及 2006 年發起 Flying Circus 專案建置標準的極紫外光光源測量工具(如圖 20)，以對不同單位研發之光源做絕對校準並確立測量的程序。Flying Circus 主要透過曲面多層膜反射鏡搭配薄膜濾光片(Foil filter, 材料為 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Nb}$ 或 Zr 等，作為主要的頻寬選擇和光線準直元件，再使用光感測器(Photodiode)量測能量(如圖 20(a))，其中各元件頻譜特性如圖 21 所示，而再多加一組平面多層膜反射鏡搭配 CCD 即可對光源進行成像觀察(如圖 20(b))。

電漿光源檢測系統將參考圖 20 設計，採用 Photodiode 並安裝於所設計之光源腔體孔位，以量測 EUV 能量並由此定義 EUV 發光功率(2π sr)以及後續進行收光後之功率，光感測器目前已採購 AXUV100G，其響應規格如圖 22，並以白光 LED 進行初步測試(如圖 23)，而另外一組 X-Ray CCD Camera(現有型號 PI-MTE:2048B，如圖 24)將用於量測電漿光源尺寸、收光品質及監控其穩定性，以便後續調控電漿及工作環境參數。此外，為防止光源能量強度過高造成光感測器及 CCD 飽和影響量測準確性甚至損壞昂貴儀器，將於兩組感測器前端加入適當材料、厚度之濾波、衰減片如 Zr 或 Si_3N_4 薄膜等進行保護。



(a)



(b)

圖 20 Flying Circus 架構概念圖及三維設計示意圖(a)能量測量模式；(b)光源成像模式[1]

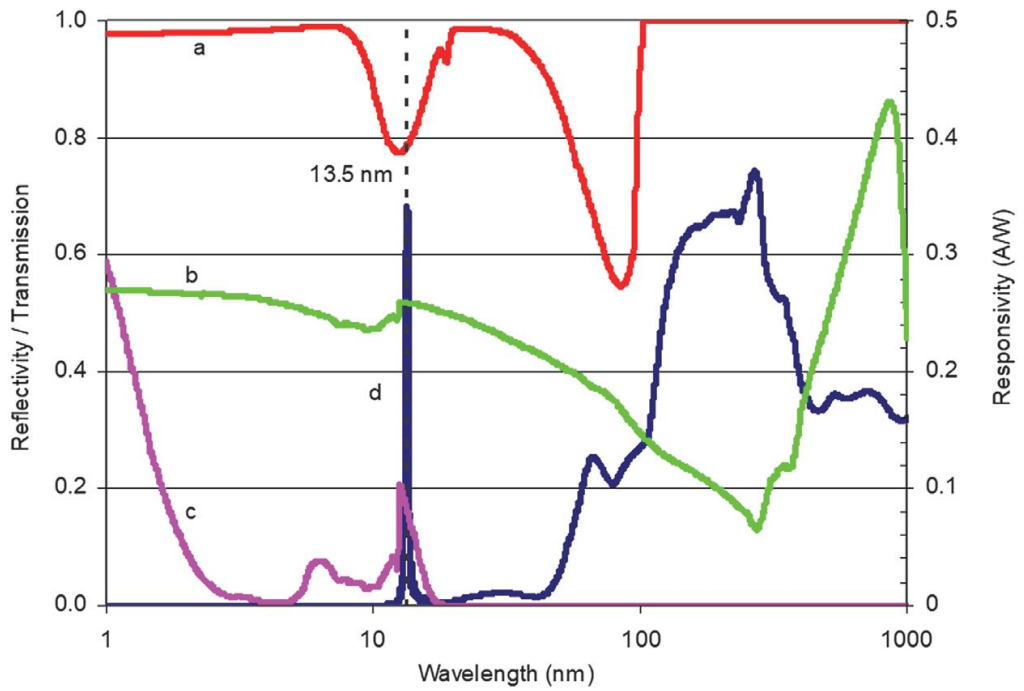
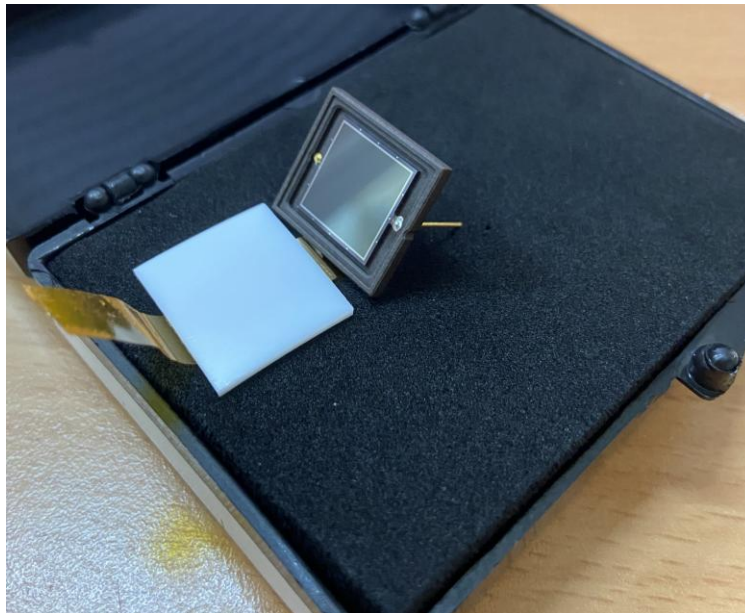


圖 21 (a)氫氣穿透率；(b)Photodiode 響應；(c) $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Nb}$ 過濾片穿透率；(d)Mo/Si 多層膜反射率[17]



Typical EUV-UV Photon Response

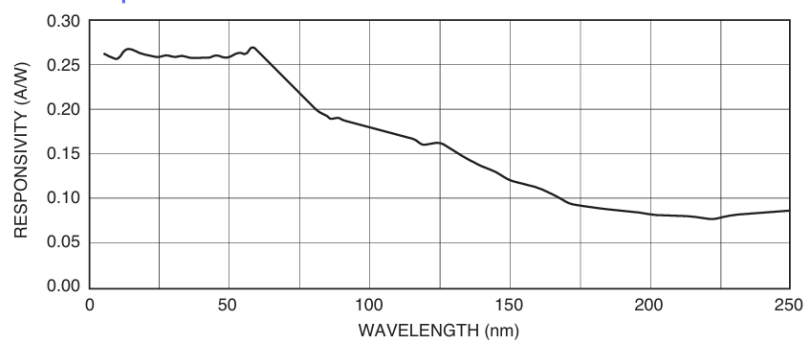


圖 22 AXUV100G 光感測器實體照片(上)；光波長響應(下)

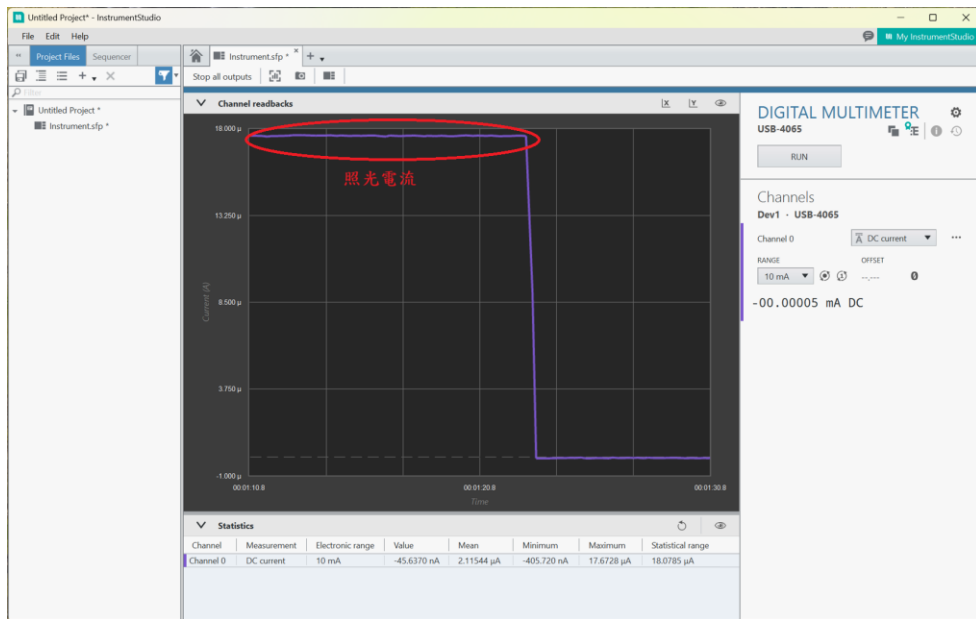
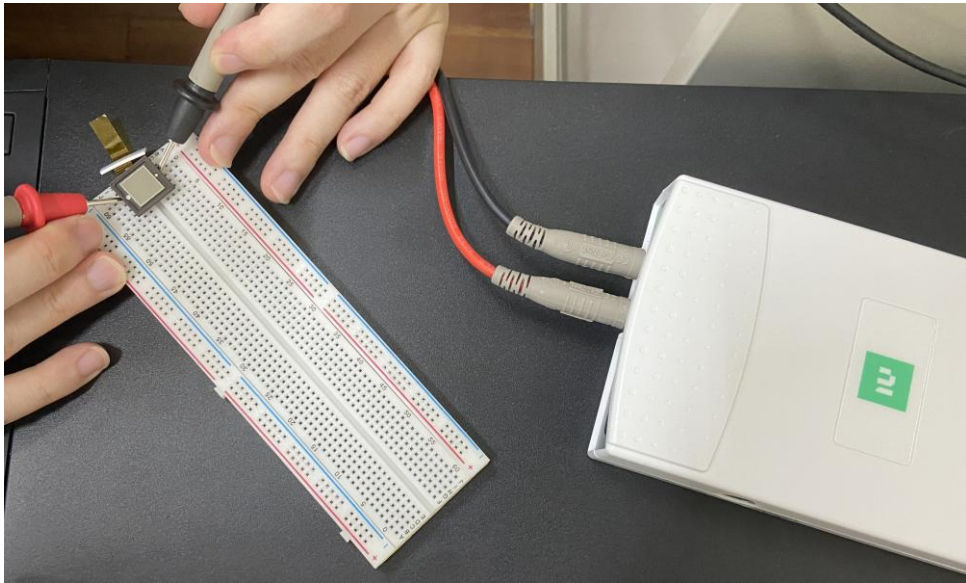


圖 23 AXUV100G 白光 LED 照光測試



Quantum Efficiency Curve

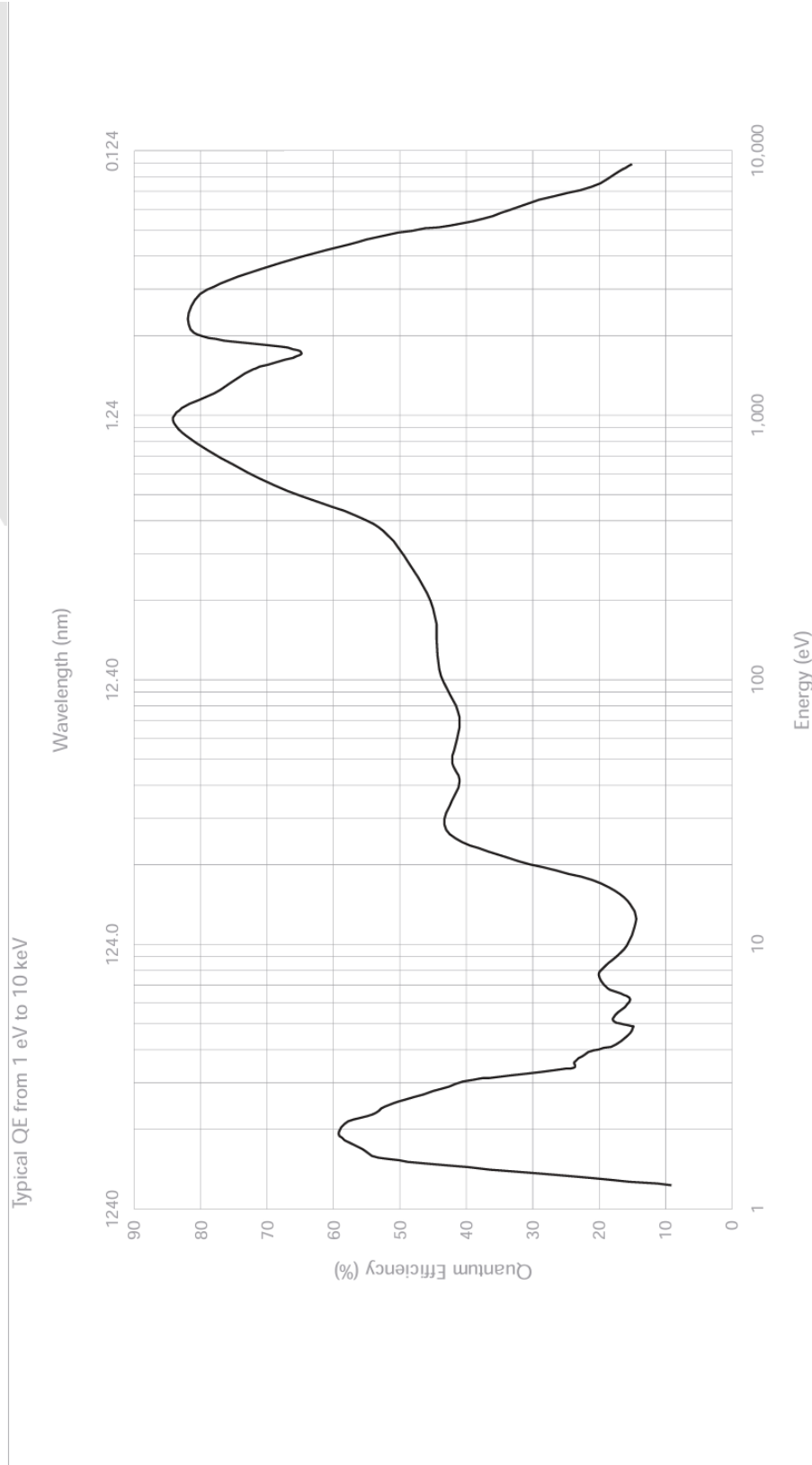


圖 24 PI-MTE:2048B X-ray CCD(上)；光能量響應(下)

4. 高壓脈衝電源電路優化

放電電漿產生光源所需之電源，需能瞬間(通常小於微秒)提供大電流(~kA)，使得產生之磁場足以將電漿氣體壓縮至能夠產生 EUV 波段之輻射，所以其電源系統通常為一大電容庫搭配開關以提供脈衝電源。為了輸出脈衝電源至電極，電源系統必須要能穩定進行充放電，由於工作電壓相當高(~kV)，若電路設計不佳，容易導致充電過程中電容因其他途徑放電，使得電容無法儲存足夠能量，或是使得能量傳輸至電漿的效率不佳，影響光源設備運作及發光效率。

本計畫之脈衝電源電路以文獻上常見之磁脈衝壓縮(Magnetic Pulse Compressor, MPC)[18]電路為主(如圖 25)，並輔以電路設計模擬，以達成穩定產生可輻射出 EUV 光源之放電電漿。初期測試階段先以較低功率之高壓電路模擬及測試，以驗證架構可行性，後續再逐步提高至目標規格。

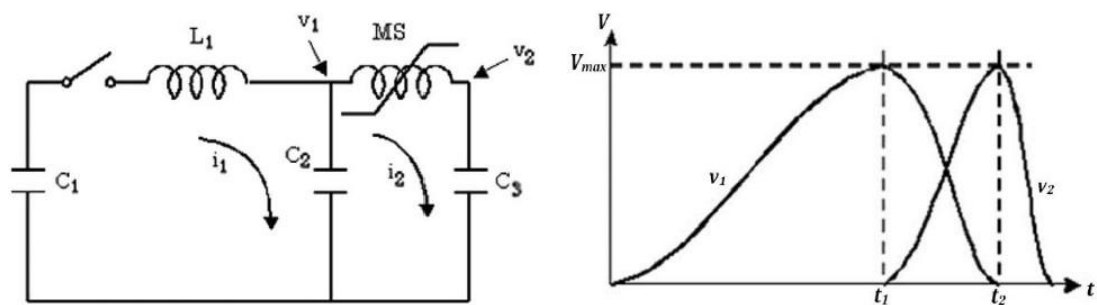


圖 25 磁脈衝壓縮電路架構示意圖(左)；電壓波形示意圖(右)[18]

4.1 磁脈衝壓縮電路(Magnetic Pulse Compressor)設計架構

磁脈衝壓縮電路是一種常用於脈衝電源中的技術，目的是將較

長脈寬、較低瞬間功率的脈衝壓縮成較短且高瞬間功率的脈衝。這類電路通常利用可飽和電感或可飽和變壓器的非線性磁性特性來實現能量的積累與迅速釋放。

本計畫擬產出高壓大電流之脈衝電源，為考慮其系統之可行性，先提出單一電源模組架構，如圖 26 所示，輸入電源經過穩定電壓之電容後，送至磁脈衝壓縮器產生高頻交流輸出，藉由主電路中的磁性元件具可飽和之電氣特性，首先讓可飽和變壓器在操作過程中達到飽和狀態，使變壓器一次側與二次側解耦，可防止二次側能量回灌一次側，導致主電路損壞的現象[19][20][21][22]。當可飽和電感達到飽和時，形成迴路讓二次側電容得以儲能與釋能，輸出高壓正脈衝(現階段最大 9kVpulse)。

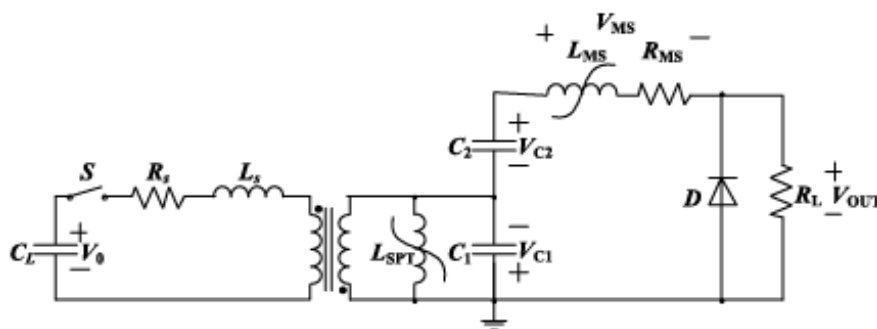


圖 26 磁脈衝壓縮電源模組架構

4.2 設計之磁脈衝壓縮電路模式分析

由圖 26 之系統架構圖中可知，本計畫擬採輸出電容串接設計，以實現高壓電流壓縮之特性。其中高壓變壓器(SPT)需考量其鐵芯特性及飽和時間，若採 3:30 之匝數比有較高之可行性。主電路中的可

飽和電感(MS)數值與飽和時間亦須一併考量，圖 26 的工作模式可分作四項，大致說明如下：

4.2.1 儲能(模式 1)：開關 S 開路，輸入電壓源 $200V$ ，經電感 L 對輸入側電容 C 充電，當 C 被充電至 $400V$ 時，進入模式 2，如圖 27。

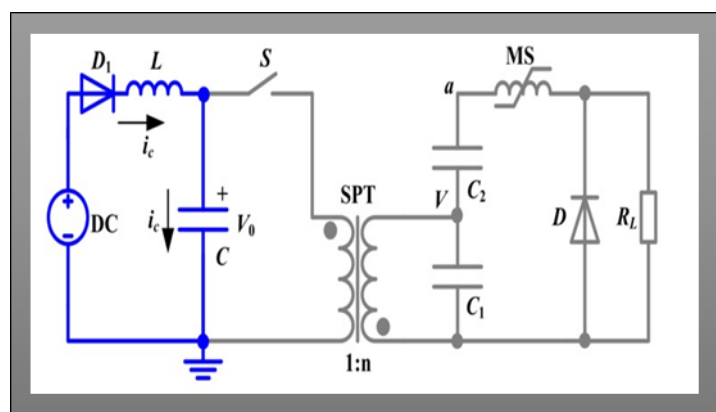


圖 27 磁脈衝壓縮高電路之模式 1

4.2.2 能量耦合(模式 2)：此時開關 S 閉合，電容 C 將儲能經可飽和變壓器 SPT 耦合至二次側，經由變壓器先對 C_1 充電，同時經由二極體 D 對電容 C_2 充電。在充電過程中，可飽和電感 MS 會逐漸飽和。當 $V_{C2} > V_{C1}$ ，電容 C_2 對可飽和電感 MS 反向充電，使其洩磁。當變壓器 SPT 飽和時，進入模式 3。，如圖 28。

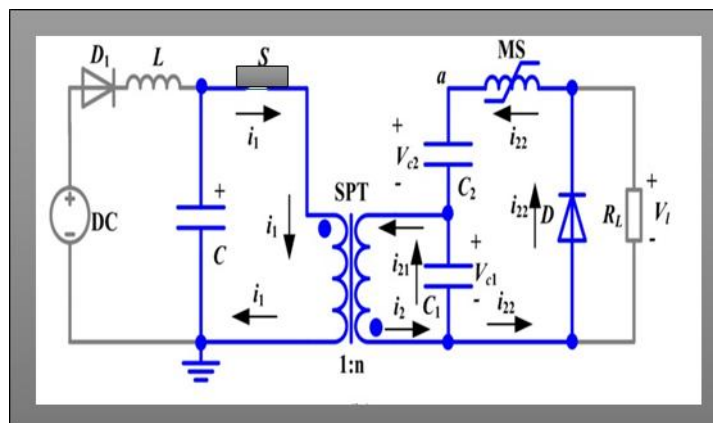


圖 28 磁脈衝壓縮高電路之模式 2

4.2.3 解耦及釋能(模式 3)：由於變壓器 SPT 進入飽和狀態，一次側與二次側解耦，電容 C_1 、 C_2 、可飽和電感 MS 及負載 R_L 形成放電迴路。其中電容 C_1 之電壓極性因諧振造成反轉，與電容 C_2 電壓極性相同。此時電容 C_1 及 C_2 為串聯狀態，同時對可飽和電感 MS 儲能，並且對輸出負載 R_L 放電，直到放完電後， $V_L=0$ 時，進入模式 4，如圖 29。

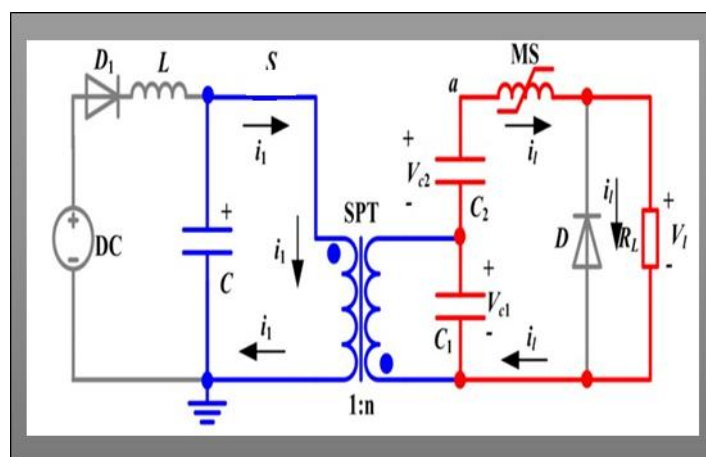


圖 29 磁脈衝壓縮高電路之模式 3

4.2.4 洩磁(模式 4)：當輸出電壓 $V_L=0$ ，二極體 D 導通。電容 C_1

及 C_2 ，可飽和電感 MS，二極體 D，形成洩磁迴路。讓儲存在 MS 裡的剩餘磁能得以釋放。當可飽和電感 MS 釋放完剩餘磁能後，再回到模式 1，如圖 30。

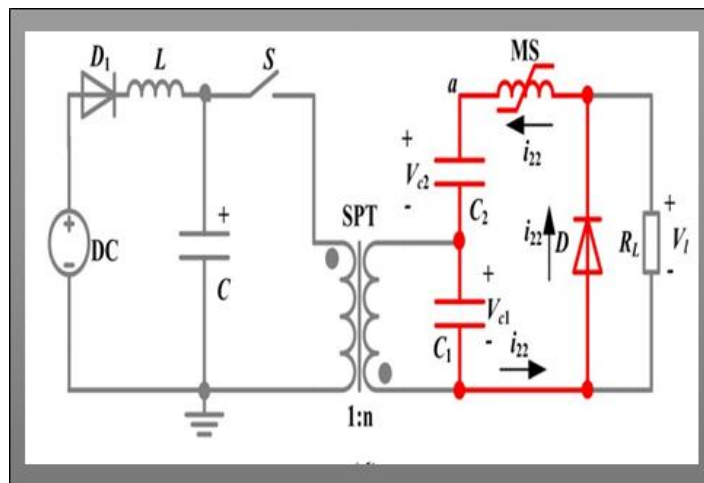


圖 30 磁脈衝壓縮高電路之模式 4

4.3 元件設計考量與採購

4.3.1 可飽和變壓器 (Saturable Pulse Transformer, SPT) 與可飽和電感 (Magnetic Switch, MS) 之設計考量

A. 可飽和變壓器 (SPT):

可飽和變壓器的設計重點在於鐵心材料的選擇與磁性特性，為使變壓器在特定操作條件下能夠迅速進入飽和狀態，常選用具有高導磁率 (μ) 且飽和磁通密度 (B_s) 大於 1.0 T (特斯拉) 以上的磁性材料作為鐵心，例如鐵氧體或非晶合金等。當鐵心進入飽和區域後，其磁阻顯著上升，使得磁通不易再變化，進而達到電感急劇下

降的目的。在此狀態下，低壓側與高壓側之間的磁耦合大幅降低，有效實現解耦，以防止高壓側的能量回灌至低壓側電路，提升整體電路的操作安全性與穩定性。此外，適當控制鐵心的初始磁化狀態與匝數比，可進一步優化飽和時間與耦合特性，以符合脈衝功率電路中高頻、高壓操作的需求，目前所採用之可飽和變壓器參數如表 9 所示。

表 9 可飽和變壓器之參數

匝數比	1:30
漏感	2.565 μ H
激磁電感	320.4 μ H

b. 可飽和電感 (MS)：

可飽和電感，又稱為磁開關，其主要作用為在高壓脈衝電路中提供能量傳遞與波形整形功能。在電路設計上，選用高導磁率且飽和磁通密度 B_s 超過 1.0 T 的鐵心材料，有助於確保其能在預定時間點達成快速飽和。在電路啟動初期，磁開關處於非飽和狀態，具有高電感，限制電流上升速率，並隔離高壓側與低壓側。在高壓電容充電完成後，電感進入飽和區域，電感值急劇降低，使電流得以快速通過，形成脈衝能量傳遞通道，並與負載端的電容進行諧振，進一步壓縮輸出波形，產生高幅值、窄寬度的脈衝電壓。此特性廣泛應用於脈衝功率系統中，如雷射驅動電路、脈衝電子束、電漿放電等高功率、高重複頻率應用領域，目前所採用之可飽和電感參數

如表 10 所示。

表 10 可飽和電感之參數

匝數	34
電感值	2.565mH

4.3.2 開關選用

採用可承受電壓應力 1200V，耐流 40A 之 IGBT 即可正常操作。

操作頻率為 $f_s = 5\text{kHz}$ 。其他電路元件如表 11 所示

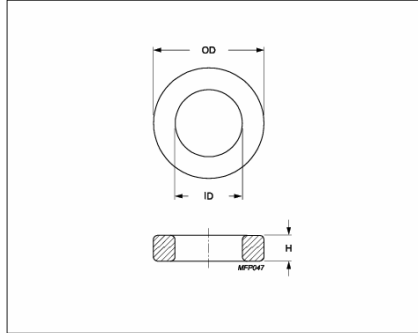
表 11 其他電路元件之參數

輸入電容	1.5 μF
輸出電容	500 pF
基本功能測試之電阻負載	2k Ω

4.3.3 高壓直流電源及元件採購

脈衝電路所需之可飽和鐵芯，為從 ferroxcube 公司所購買之商品。其型號為 TX74/39/13/3E10，為了符合快速飽和之特性，選用高導磁係數之鐵芯材質。圖 31 所示為其規格與 B-H curve。後續年度也評估向國外廠商採購更高導磁係數及高功率應用之鐵芯材料，其規格及 B-H curve 如圖 32 所示。高壓直流電源部分，目前採購燧鼎奈米科技之直流高壓電源，型號 DCPS-001，可提供最大 1.2kV/1kW 之可調直流電壓，如圖 33，後續待電路架構測試穩定再行採購更高功率之電源。

Core **Toroid 74/39/13**



Effective parameters			
	Parameter	Value	Unit
$\Sigma(I/A)$	core factor (C1)	0.8	mm ⁻¹
Ve	effective volume	34300	mm ³
Le	effective length	165	mm
Ae	effective area	208	mm ²
m	mass of core	≈ 170	g/pcs

Epoxy coating DC isolation voltage 2000.
Maximum operating temperature of the coating is 200°C.

Core data				
Cores	Material	Al (nH/turns ²)	Al tolerance	μ e
T74/39/13	3C11	7010	± 25%	≈ 4300
T74/39/13	3C94	3750	± 25%	≈ 2300
T74/39/13	3E10	15500	± 20%	≈ 9500
T74/39/13	3E27	8970	± 25%	≈ 5500
T74/39/13	3E6 (3E10-M)	15500	± 30%	≈ 9500

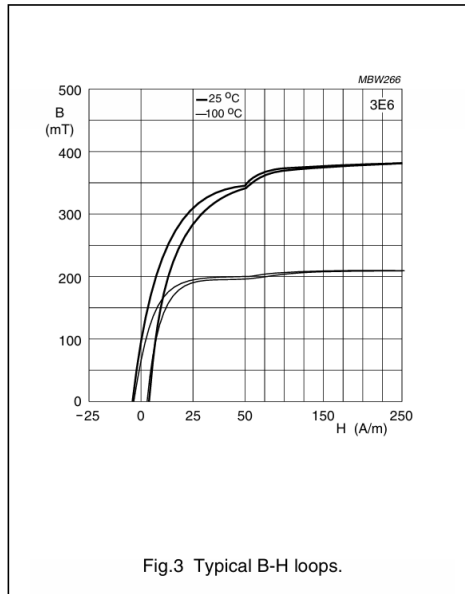


Fig.3 Typical B-H loops.

圖 31 可飽和鐵芯相關規格

Metglas Alloy		2605CO
B_s (T)		1.8
ΔB (T)		3.4
H_s (A/m)		3
PF (%)	4 μm insulation	70
	6 μm insulation	67
Alloy Density (g/cm^3)		7.56
Thermal Conductivity ($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$)		9
Magnetostriction (ppm)		35
Electrical Resistivity ($\mu\text{-ohm-cm}$)		123
Continuous Operating Temperature ($^\circ\text{C}$)		125

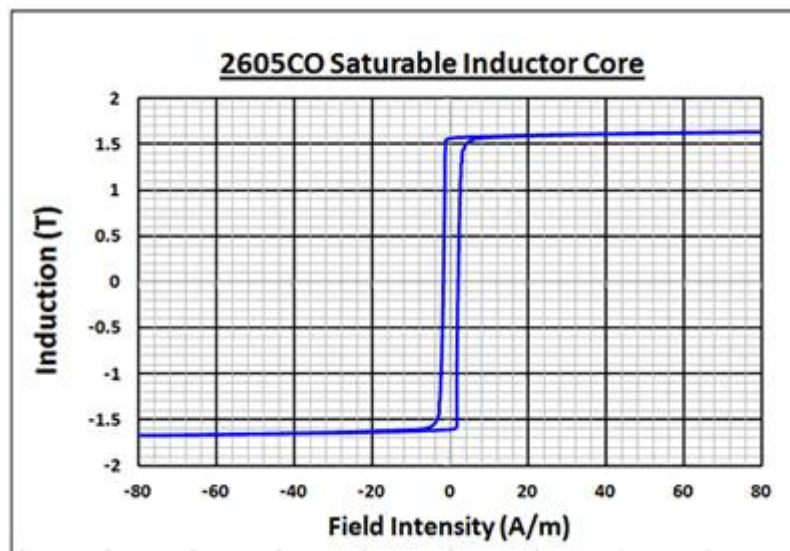


圖 32 更高導磁係數之可飽和鐵芯相關規格

規格	DCPS001	DCPS002	DCPSX	DCPSX2
輸入需求				
電壓	單相 AC220V		三相 AC220V	三相 AC380V
電流	10A	15A	42A	35A
頻率	50-60Hz			
輸出特性				
功率	1kW	2kW	10kW	20kW
電壓	1200V		800V	1200V
電流	2A	4A	25A	40A
通訊介面				
PLC Port	25Pin (類比控制)			
尺寸				
H*W*D(mm)	(3U)133*483*630		(4U)179*500*737	
冷卻方式				
模式	氣冷		兼具氣冷與水冷方式	



圖 33 DCPS-001 高壓直流電源實體照片及規格

4.4 系統絕緣距離考量

一般電子產品出產時，通常會有各種安全規範測試，其目的在確保產品使用時，遭受外部因素影響之安全性，例如：雷擊測試 (Impulse/Surge Test) 為模擬產品受到因雷擊所產生之高電壓電擊時，其產品內部之線路、電子元件，是否能抵禦電磁干擾，而不至於損害元件或電路。然而，高壓電源產品本身即為較特殊之產品，由於其功能即是產生高電壓之應用。因此，在電路元件或銅線之間即可能會產生高電壓差，如果沒有作好相應之絕緣保護，使用者在

使用時，產品內部元件可能在高電場情況下，由於對空氣絕緣不夠，使得空氣被電離，容易造成元件引腳發生尖端放電，或元件之引腳與引腳會由空氣中形成迴路，進而產生電弧(Arc)，造成跳火或稱閃絡(Flash Over)之現象發生。

因此，在設計電路時，還需要考慮空間直線距離或稱電氣間隙距離(Clearance)、爬電距離或稱沿面距離(Creepage)等絕緣保護。由於本計畫擬研製的高壓電源在測試過程極可能由於元件位置、安全間距不足或 PCB layout 不佳等原因，而造成絕緣不足的問題，此部分將會蒐集相關絕緣資料，並依相關規範設計爬電距離、元件與元件之間間隙距離，並直接以灌膠或泡油方式強化絕緣效果。本計畫需考量變壓器與整流電路的絕緣，在此階段會同時將進行小型化的考量與設計，以提高本計畫成果的可行性。

以下簡述本計畫擬進行之高壓電路絕緣考量：

a. 空間直線距離安全考量

定義：一般指兩個導體材料引腳間或導體引腳與設備介面之間所測得之最短空間距離，如圖 34 所示，當導體與導體或導體與絕緣介面相互之間絕緣不夠時，仍會藉由空氣形成迴路。安規 IEC60951-1 於不同絕緣程度與操作在不同工作電壓時所需之最低空間直線距離，相關規格如表 12 所示。由此安規可根據不同工作電壓預估其所需之最短空間直線距離，並取適當之距離，以確保電路以及人身安

全。

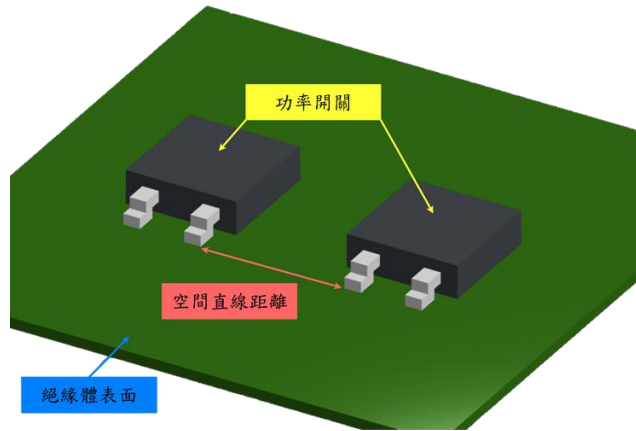


圖 34 導體與導體間之空間直線距離示意圖

表 12 安規 IEC60951-1 所列之最低空間直線距離

Peak working voltage (V)	Nominal AC mains supply voltage (Mains transient voltage 1500 V)	Nominal AC mains supply voltage (Mains transient voltage 2500 V)	Nominal AC mains supply voltage (Mains transient voltage 4000 V)
	Class I	Class II	Class III
71	1.0	2.0	3.2
210	1.0	2.0	3.2
420	2.0	2.0	3.2
840	3.2	3.2	3.2
1400	4.2	4.2	4.2
2800	8.4	8.4	8.4
7000	17.5	17.5	17.5
9800	25	25	25
14000	37	37	37
28000	80	80	80

b. 爬電直線距離安全考量

定義:沿絕緣體表面所測得的兩個導電元件引腳與引腳之間，或導電元件與設備防護介面之間的最短距離，意即當電壓超過絕緣承

受範圍時，導體周圍的絕緣材料將會呈現帶電之現象，造成元件短路使得元件損壞，進而造成電路不正常動作。通常可利用挖槽或增加絕緣體以延長爬電距離，示意圖如圖 35。因此，在設計上還需考量電路元件引腳與引腳之間的爬電距離，才不會導致電路不正常操作，安全規範 IEC60951 依據不同電壓類別在基本絕緣(B/I)或補充絕緣(S/I)條件下，明訂其操作電壓所需要之最短爬電距離。

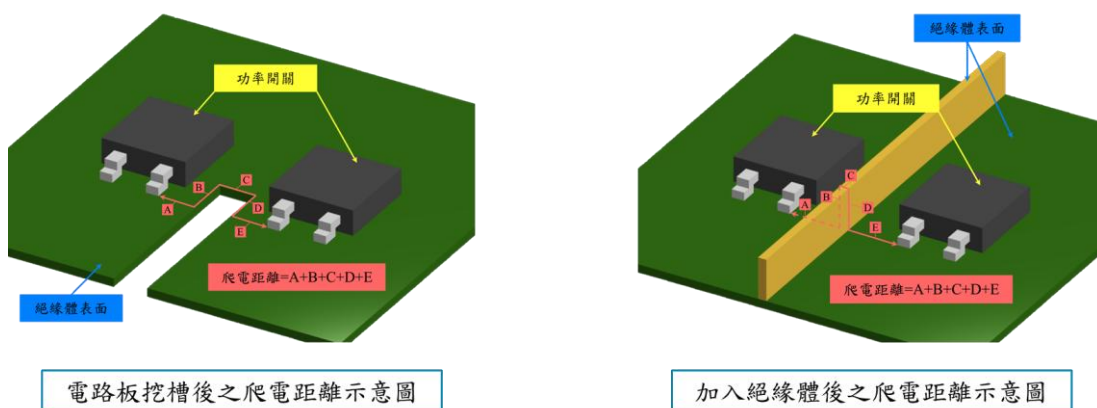


圖 35 導體與導體間利用挖槽、增加絕緣體延長爬電距離之示意圖

c. 以下列出系統高壓部分與鄰近電路之絕緣具體處理方式

- 高壓變壓器一、二次側間之高電壓，屆時將根據 IEC 60951-1 安規所訂定之絕緣考量，確定所需之最短空間直線距離，並在選用鐵芯後，確認初、次級側線圈間的距離(40mm)足以符合電氣絕緣之要求，並且將採用如圖 36 之浸泡絕緣矽油(測試階段)，亦或是環氧樹脂進行灌膠來處理來防止跳火現象發生。



圖 36 絕緣矽油(左)；灌膠用之環氧樹脂(右)

- 高壓端與微控制器之間的爬電距離也將根據 IEC 60951-1 安規所訂定之絕緣考量，使兩者間 PCB Layout 的爬電距離大於規定值。
- 整流電路需考量各個高壓二極體與高壓電容之耐壓規格，並且在不影響 PCB 板結構強度的前提下，使用上述之挖槽方式來延長爬電距離，並且可以採用浸泡絕緣油(測試階段)亦或是灌膠方式來防止跳火現象發生。
- 測試環境安全考量：實驗測試時將再以壓克力板保護 PCB 板，並以絕緣墊及絕緣手套保護操作人員之安全，如圖 37。

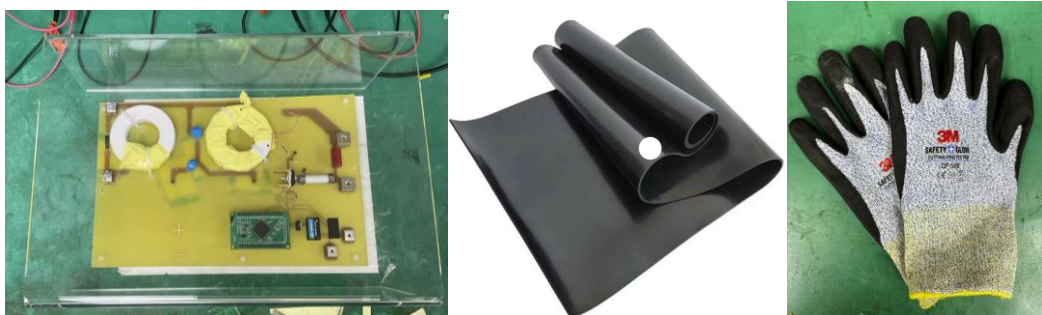


圖 37 實驗人員安全防護措施

參、主要發現與結論

一、 極紫外光光源收集鏡系統設計、模擬與製作

光源收集鏡的設計目標是透過光學模擬軟體，設計出符合聚光點性質需求的光路，並能兼容不同電極結構的收光鏡系統。本計畫預計採用掠角入射(grazing-incidence) 光學系統，以實現最大化的收光立體角，並選擇如金或鉑等貴金屬作為鏡面鍍膜材料，以確保在極紫外光波長下具備高反射率。

目前考量複雜度及初步應用將以橢圓面鏡設計為主，並透過光學模擬軟體，探討適合之鏡面材料、尺寸等，未來可再依應用製作合適類型之收集鏡。製作方面，初期測試預計採用之材料、收光效率及尺寸規格如表 13，並已尋求國外產學研單位(如 Rigaku、蔡司、Fraunhofer IWS 及 NTT AT 等)討論設計及委託製作之可行性，惟此類客製鏡片價格昂貴，因此預計也將與國儀中心就其光學鏡片製作經驗共同逐步研發自主收光鏡製程。由於鏡面設計預期會隨最終光源參數調整，因此現階段將以建立設計模擬方法為主，後續待光源架構穩定後再行套用設計方法，往擴大鏡面尺寸以增加收光角度及收光效率之方向進行。而散熱需求後續年度將根據本計畫逐步提升之發光功率及收集鏡規格估算所需的散熱需求，再決定是否需

要採用散熱以及採用的方法

表 13 掠角入射收集鏡設計規格

收集鏡幾何類型	拋物面鏡
鏡面材料	Ru 或 Au
入射面直徑	20 mm
射出面直徑	21.9 mm
收集鏡長度	100 mm
入射面光源距離	500 mm
收光掠角角度	0.5~0.6°
收光效率	0.0067%

二、放電電漿產生極紫外光光源之電極結構優化

本計畫的光源模組開發平台採用發光效率較高的 Z 軸壓縮 (Z-pinch) 機制。放電電漿模擬流程已完成設計，主要流程為在 COMSOL 上建立電極模型，完成放電電漿的磁流體動力學 (MHD) 模擬，獲得電漿參數（如溫度、密度）。隨後已團隊建立之自動化程式將這些參數輸入美國國家標準技術研究所 (NIST) 提供的 FLYCHK 碰撞-輻射原子模型模擬軟體，以計算電漿離子能階分佈及特徵線譜，從而得出輻射頻譜。電極架構選擇上，則先已文獻較完整之 DPF 及架構較單純之 Capillary Z-pinch 先進行模擬，本年度則以驅動電壓需求相對較低的 DPF 電極先行製作測試。

模擬部分，為定性驗證 MHD 模型模擬 Z-pinch 架構，初步先將

保留關鍵結構(如毛細管長度等)之簡化 Capillary Z-pinch 幾何架構於 COMSOL 上進行建模，如圖 38。模擬結果如圖 39 所示，從電漿密度分布來看確實有成功產生 Pinch 區域之分布趨勢。此外，也將圖 11 之 DPF 簡化架構根據實際製作之 DPF 電極參數(如表 15)進行 COMSOL 建模及模擬，其他相關參數如表 14 所示，模擬結果如圖 41 及圖 42 所示，從電漿之溫度及密度分布也可看出電漿有往陽極開口端聚集的趨勢。雖然目前模擬之電漿密度分布數值與文獻上之較高發光效率之電漿密度模擬數值($\sim 10^{24-25} \text{ m}^{-3}$)[23][24]有所差距(如圖 40)，但其原因主要為考量 MHD 模型建模耦合牽涉到電磁場、流體力學以及熱傳輸等方程式的複雜性[25]，初始模擬條件不夠完善所致，後續將藉由調整相關參數嘗試優化電漿密度分布(Pinch 位置、大小等)，以尋找較適合之模擬參數。後續年度將評估使用基於 PIC 方法(如 Vsim 等)的電漿模擬軟體建立較精準之氣體崩潰初始條件，以進一步提升精度並優化光源設計，逐步提升發光功率。

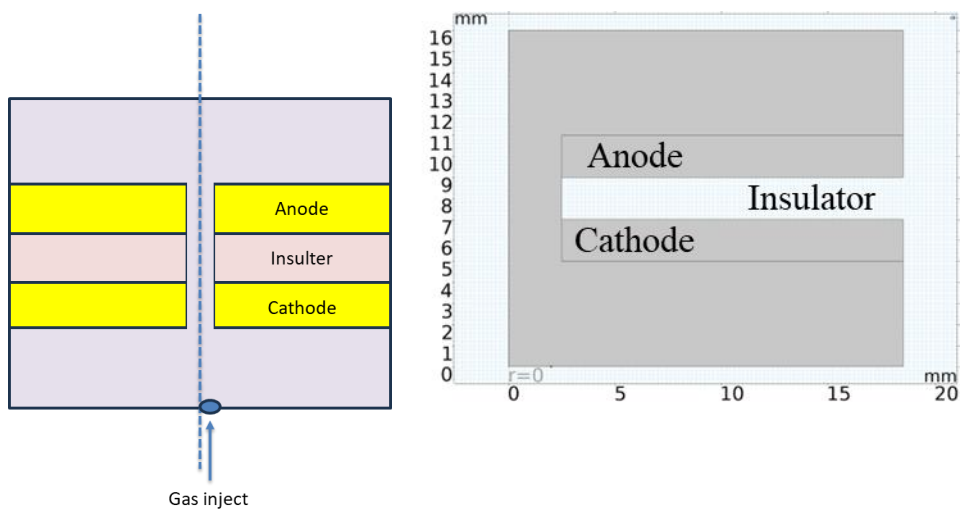
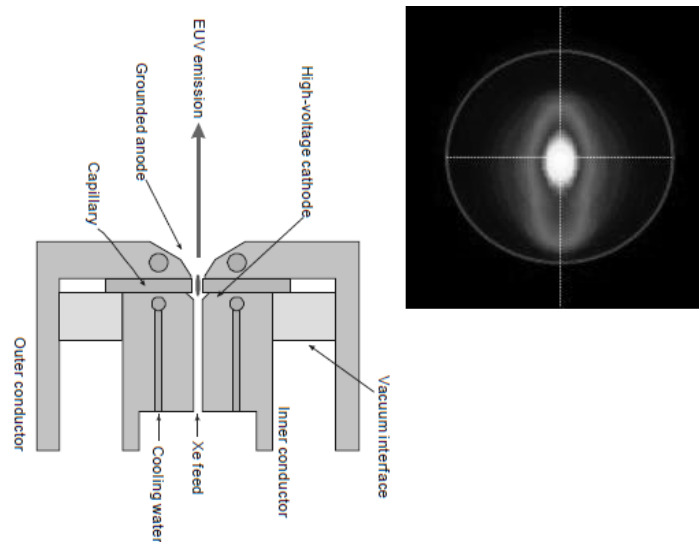


圖 38 參考之 Capillary Z-pinch 電極結構及 pinch 電漿之 CCD 影像
(上)[6]；COMSOL 電極結構幾何模型(下)

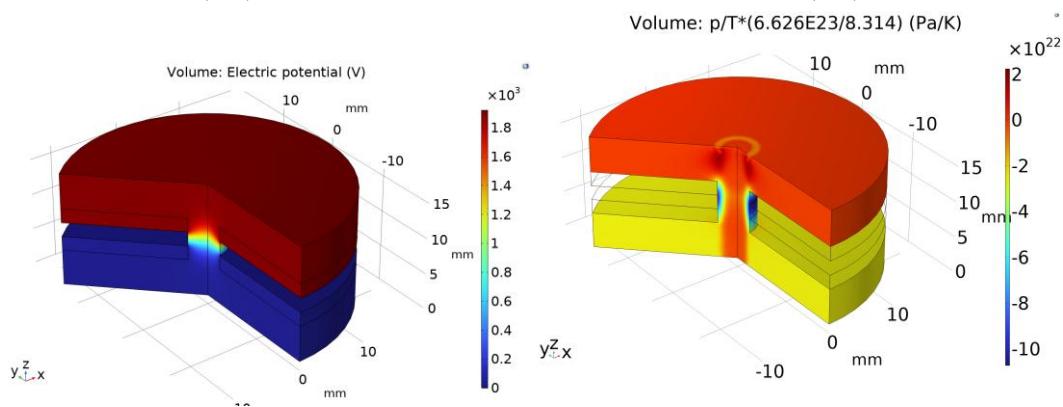


圖 39 Capillary Z-pinch COMSOL 電漿放電模擬結果：電位分布
(左)；密度分布(右)

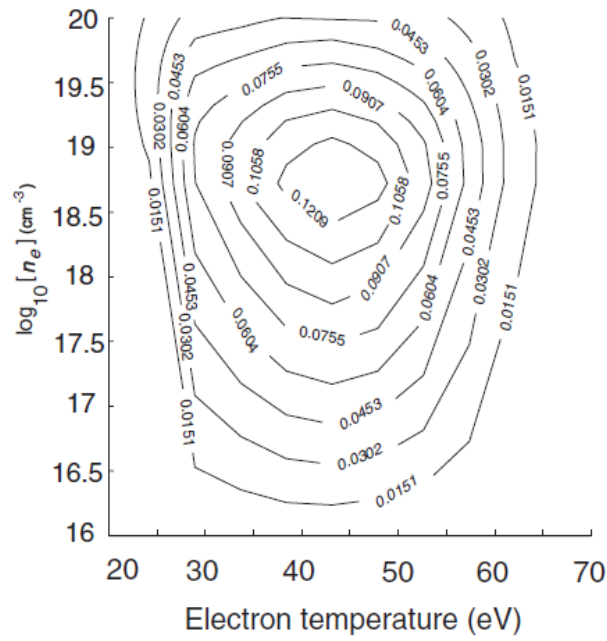


圖 40 基於碰撞-輻射模型計算之電漿轉換效率(單位:% sr⁻¹於 2% 頻寬內)於不同電子密度和電漿溫度中的等高線圖,最大轉換效率大約在 $10^{18} < n_e < 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ [23]

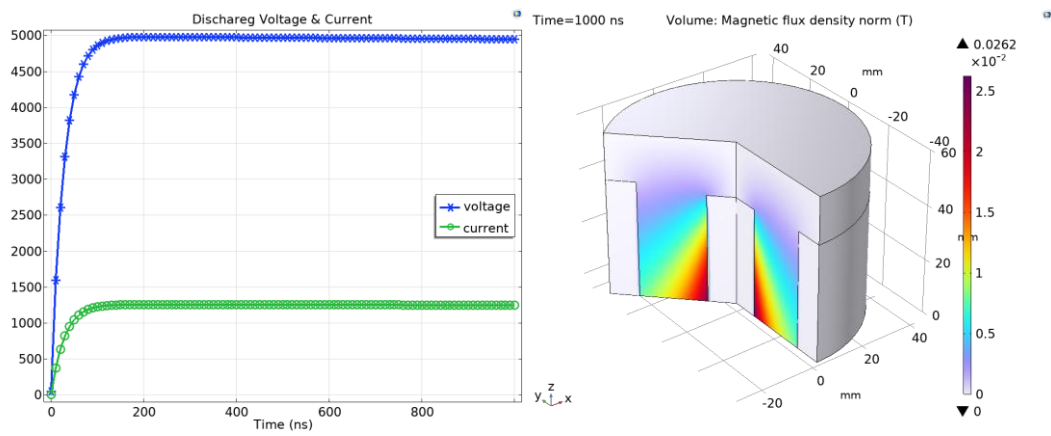


圖 41 DPF 電極結構 COMSOL 模擬結果：電壓電流波形(左)；磁場分布(右)

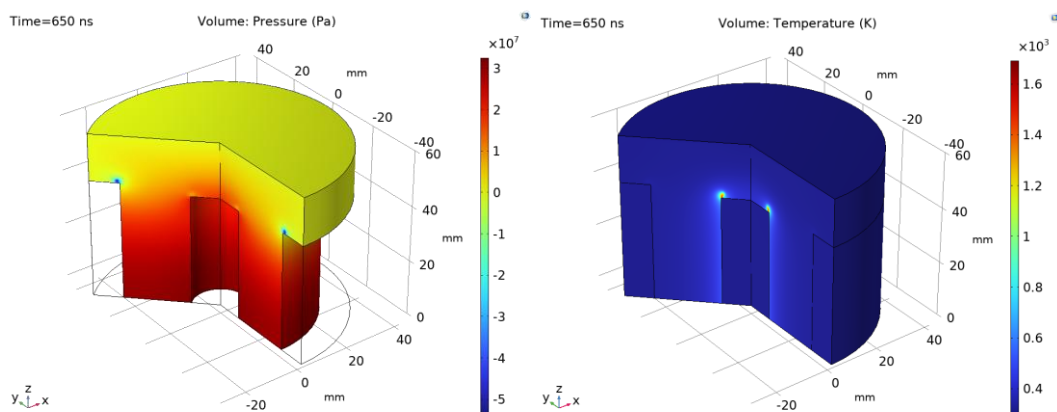


圖 42 DPF 電極結構 COMSOL 模擬結果：壓力分佈(左)；溫度分布(右)

表 14 COMSOL DPF 模擬參數

參數	數值
電容值	30 μF
電容初始電壓	5 kV
電感值	110 nH
電阻值	12 m Ω
初始溫度	300 K
初始壓力	0.01 Torr

電極設計製作方面，主要考量 Xenon 氣體之帕邢曲線(如圖 43)以及放電參數進行設計，目前也與合作廠商(旭鼎奈米科技)完成 DPF 架構電極之細部設計並預計於 11/27 前後完成製作，電極 CAD 圖、關鍵尺寸及使用材料如圖 44 及表 15 所示。後續將以此作為光源模組之原型測試架構，未來將視技術成熟度與資源配置，再逐步擴展至其他結構之設計優化與驗證，並將參考表 7 之材料特性選用耐熱性、導熱性、抗侵蝕及電阻較低的幾種材料組合進行製作及測試，

以進一步提升電極壽命及發光功率，建立更完整的技術基礎。

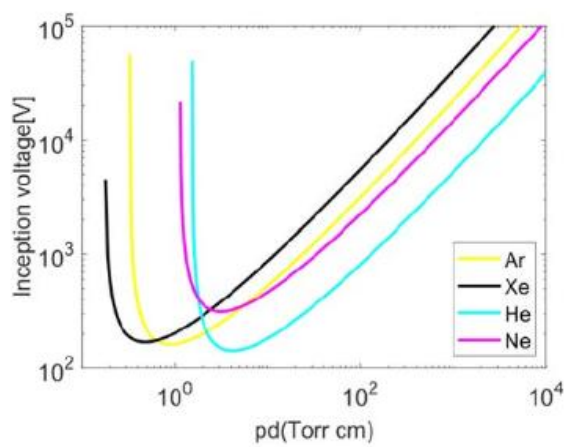
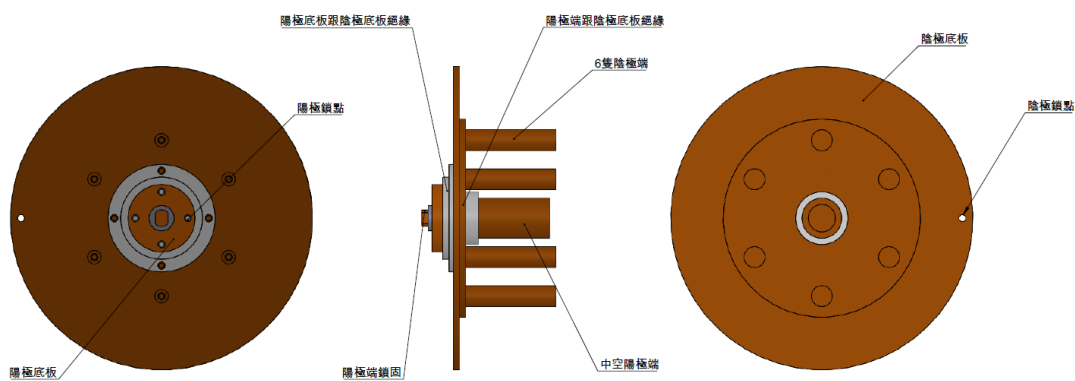


圖 43 不同氣體於室溫之帕邢曲線[28]



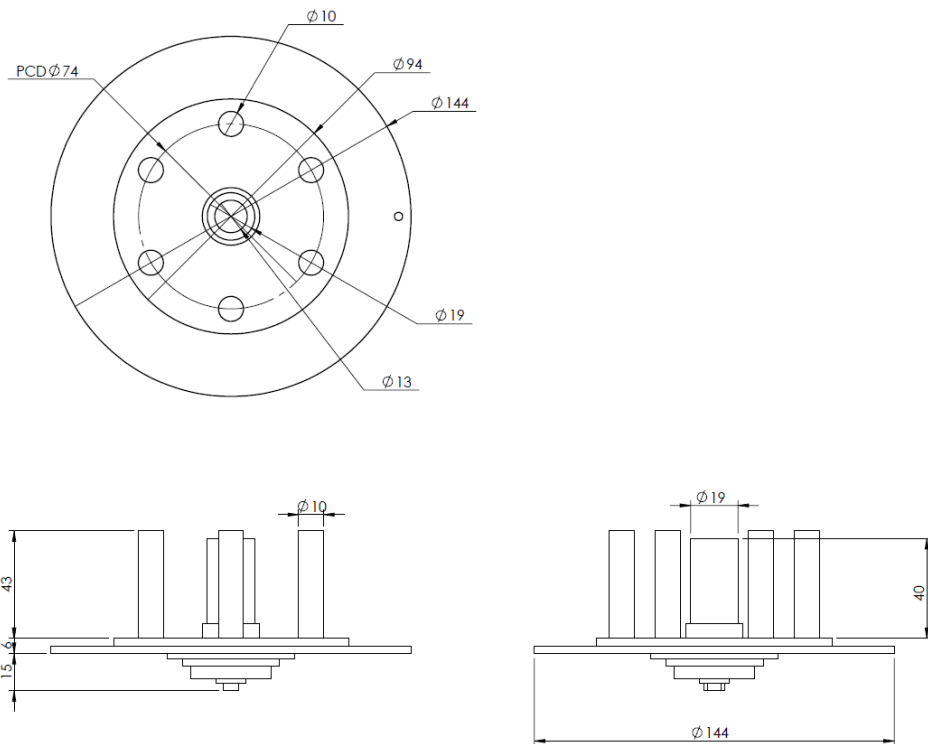


圖 44 DPF 架構電極設計 CAD 圖

表 15 DPF 電極設計參數

參數	設計值
金屬材料	銅
絕緣材料	氧化鋁
陰極內徑	3.2 cm
陰極柱直徑	1 cm
陰極長度	4.3 cm
陽極內徑	0.65 cm
陽極厚度	0.3 cm
陽極長度	4 cm

三、 極紫外光光源腔體及溫度與壓力控制系統設計製作

腔體結構及以過去本團隊與國儀中心合作設計製造的極紫外光

製程腔體為基礎並參考文獻中的極紫外光光源腔體設計（如 Cymer DPF 與布拉格捷克理工大學 Capillary Z-pinch 光源模組）進行修改。目前真空腔體系統已建置工作氣體氣流控制及輸入模組、真空幫浦模組、壓力監控模組及光感測器、CCD、出光孔位以及電極和電源 feedthrough 孔位，架構圖、實體設備照片及設備列表如圖 45 和表 16 所示。待近期電極製作完成後即可進行系統原型整合測試。

真空系統方面，腔體未通工作氣體時可抽至 10^{-6} Torr 以下真空度，符合運作需求。散熱部分，以本計畫現階段採購的 1kW 高壓直流電源，其散熱能力至多需 700W 至 1kW，待光源模組可穩定運作後，導入一般水冷散熱設備於電極基座應足以應付，後續逐步提升功率後再參考文獻提到之中空電極設計增加散熱接觸面積以提高散熱能力。

電漿量測系統部分，目前已採購 AXUV100G 光感測器，用於量測 EUV 能量及定義發光功率，CCD 部分現有的 X-Ray CCD Camera (PI-MTE:2048B) 也將用於量測電漿光源尺寸、收光品質及監控其穩定性，後續將再自製或採購 Zr 薄膜濾波片，以吸收非目標頻段光。

後續年度真空腔體相關模組之優化將借重國儀中心於腔體設計製作方面之經驗，規劃陸續建置其他必要之設備及模組。

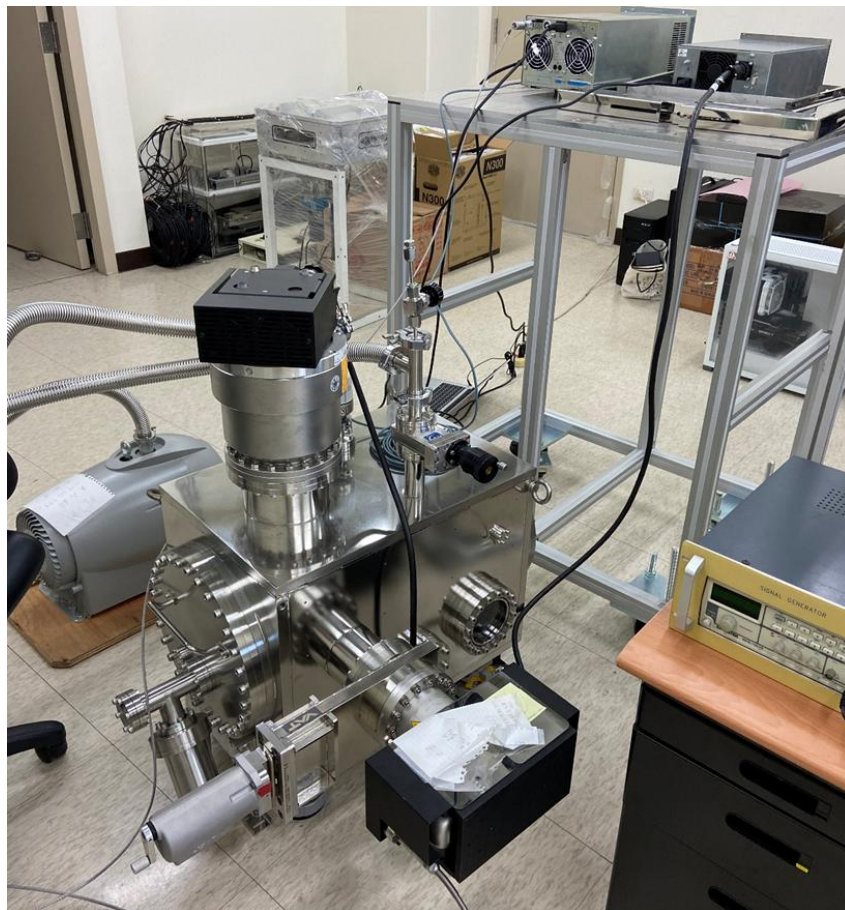
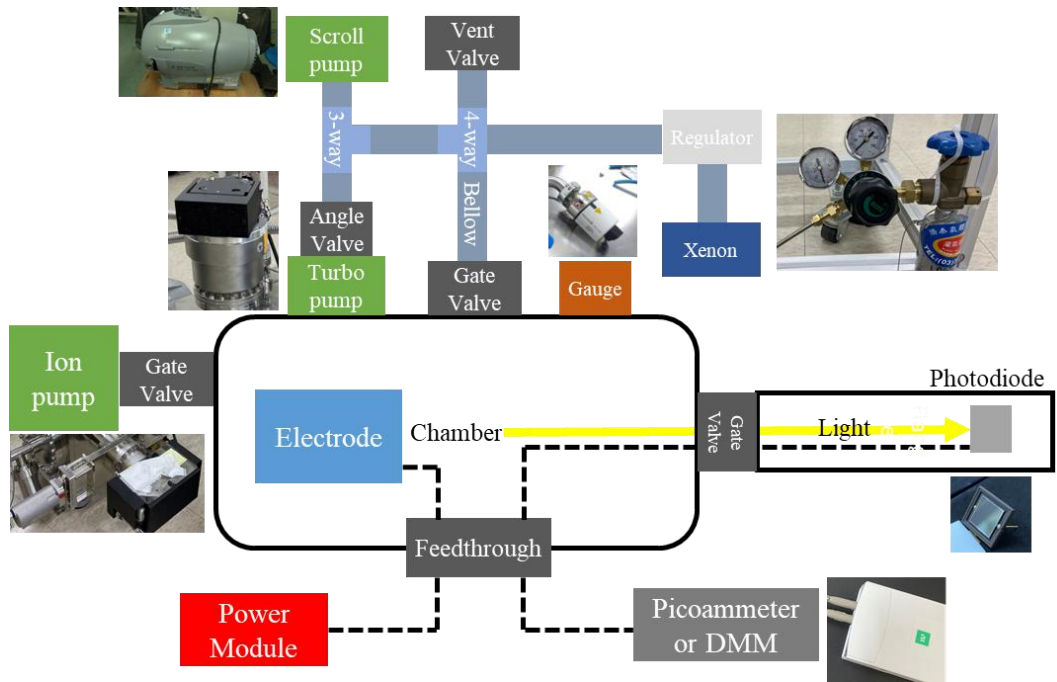


圖 45 真空腔體系統架構圖及實體照片

表 16 真空腔體系統設備列表

設備名稱	廠牌型號	型號
渦輪幫浦	PURGE	訂製品
乾式幫浦	Agilent	IDP-15 Scroll Pump
離子幫浦	Agilent	Valcon Plus 75 StarCell Ion Pump
真空計	Pfeiffer Vacuum	PKR 251
光感測器	Opto Diode Corp	AXUV100G
CCD 相機	Princeton Instruments	PI-MTE:2048B

四、 高壓脈衝電源電路設計製作

電源電路部分目前本團隊已完成初版優化之磁脈衝壓縮電路架構設計以及電容充放電模擬，並先進行低功率之測試驗證架構可行性，後續待設備及元件完備後再逐步提高至目標規格，以完成符合需求規格之優化電源模組。

目前藉由 SIMPLIS 8.4 版進行高壓脈衝電路之模擬。其中輸入電壓 $V_{in} = 200V$ ，輸出電壓 $V_o = 9kV_{pulse}$ ，脈衝重複頻率 $f_s = 5kHz$ ，升壓變壓器匝數比 $N_1:N_2=3:90$ ，負載電阻 $R_L=2k\Omega$ 。圖 46 所示為擬實現磁脈衝壓縮電路之系統架構圖，其模擬之輸出電壓 V_o 可達 9kV 之正脈衝特性，如圖 47 所示。圖 48 所示為系統主電路中之功率開關之 v_{gs} 及 v_{DS} 模擬波形。另外，圖 49 所示為升壓變壓器一次側及二次側之電壓波形，如圖所示藉由可飽和鐵芯的特性使得變壓器兩側

大部分時間解耦而產生脈衝電壓的輸出，圖 50 為可飽和電感電壓之模擬結果。

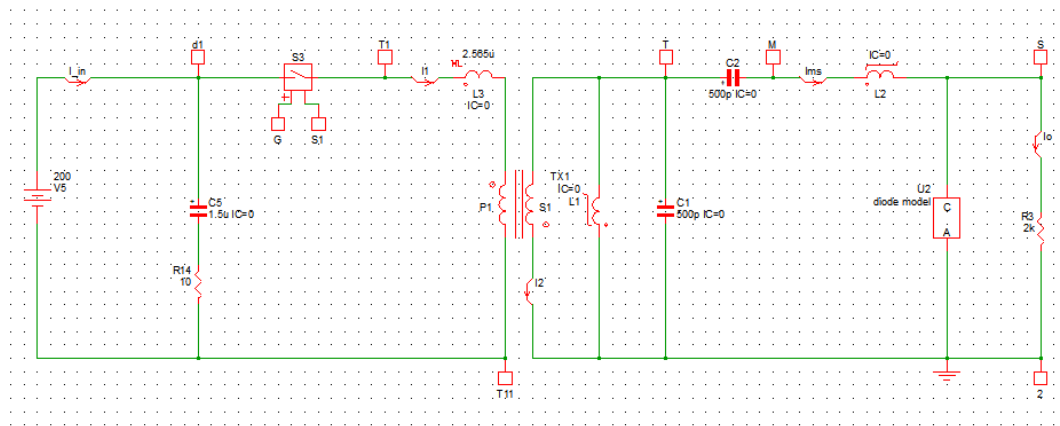


圖 46 磁脈衝壓縮電路模擬之系統架構圖

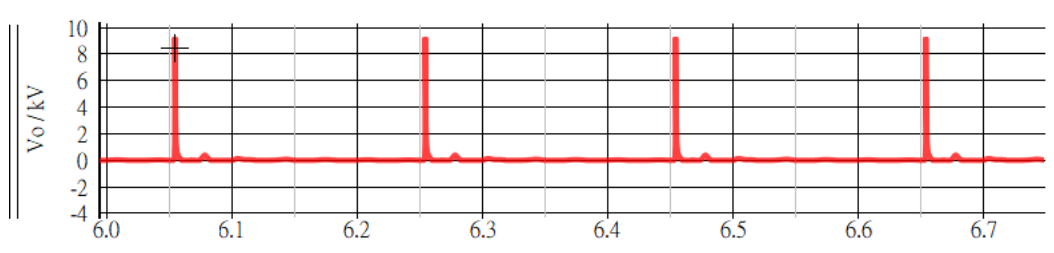


圖 47 輸出正脈衝電壓($V_o=9.95\text{kV}$)模擬結果

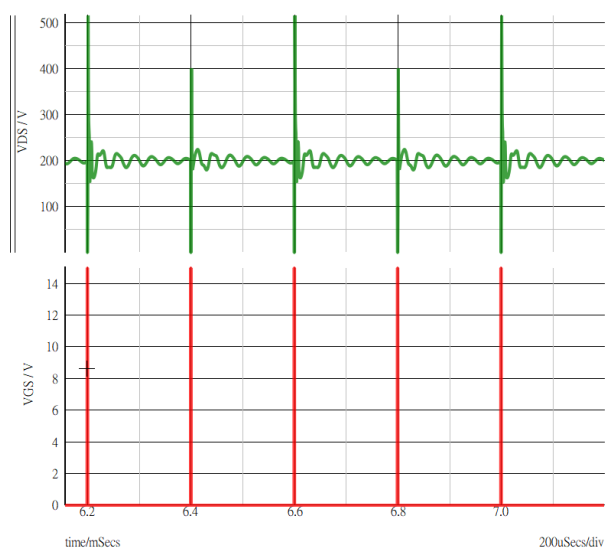


圖 48 開關 v_{gs}, v_{DS} 之模擬結果

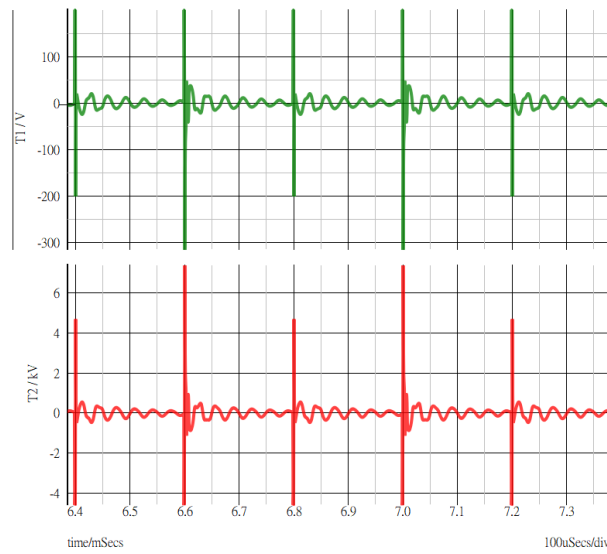


圖 49 變壓器一次側,二次側電壓模擬結果

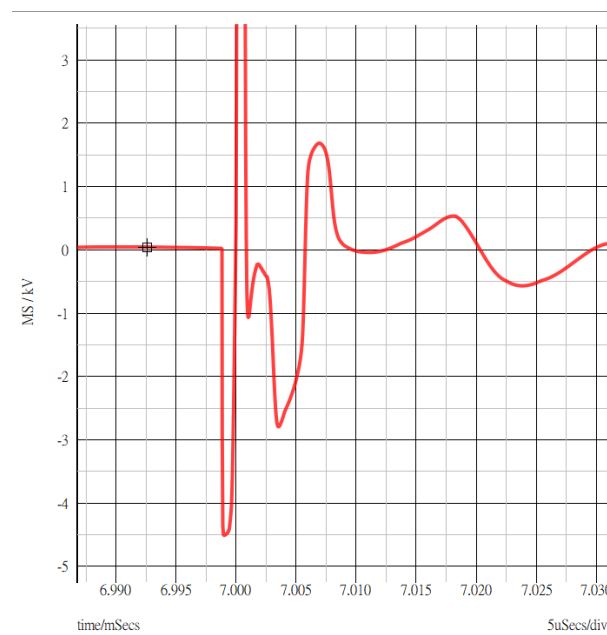


圖 50 可飽和電感電壓之模擬結果

電路測試部分，本計畫主電路之各項基本功能實測數據如表 17 所示，包括系統之輸入、輸出電壓、變壓器一、二次側電壓、可飽和電感電壓、輸入、輸出電流及功率開關的各項參數。

表 17 系統主電路之各項實測數據

負載 $R_L=2k\Omega$ ，條件下	
V_{in}	200V
$V_{o-pulse}$	10kV
變壓器一次側 V_{pri}	184V
變壓器二次側 V_{sec}	5.92kV
變壓器匝數比 n	23
可飽和電感 MS	$V_{ms,max} = 5.6kV$ $V_{ms,min} = -4kV$
I_{in}	1A
I_o	$I_{o,max} = 0.18A$ $I_{o,min} = -0.432A$
I_{MS}	$I_{MS,max} = 0.4A$ $I_{MS,min} = -0.128A$
f_s	5kHz
v_{gs}	18.4V
v_{DS}	880V
Duty cycle	1%

測試波形部分，圖 51 所示為變壓器一次側、二次側的電壓，將其操作週期展開後可觀察到可飽和變壓器發生飽和的位置(如圖 52)。圖 53 所示為輸出電壓的實測波形，最高電壓約達 10kV，由圖 54 可觀察其脈寬約為 8.2 μ s。圖 55 為可飽和電壓之電壓波形。圖 56 為系統測試之實體照片，測試環境已盡可能做好絕緣措施，操作人員亦已戴護目鏡及絕緣手套等裝備後才進行相關測試，如圖 57 所

示。先前亦已至台大竹北校區進行移地測試，如圖 58 所示，以減少後續電極製作完成進行整合測試可能遭遇之問題。

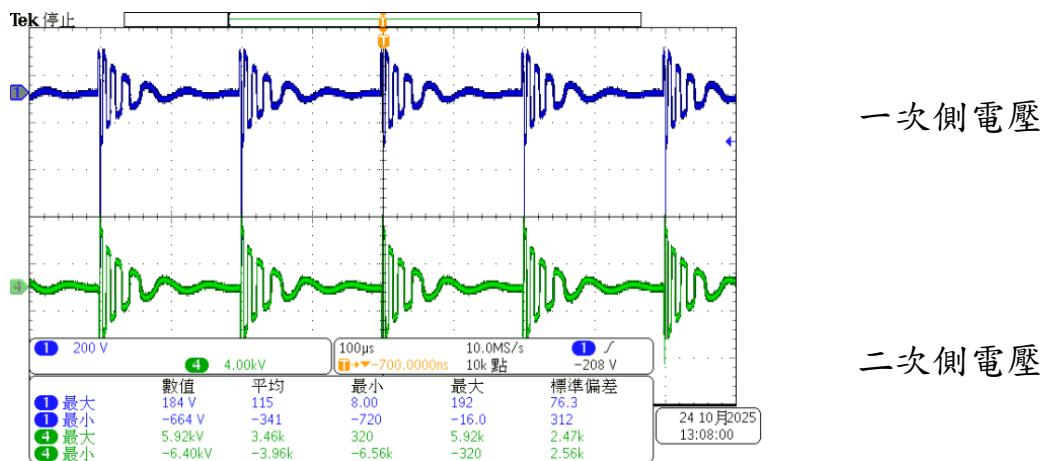


圖 51 變壓器電壓波形

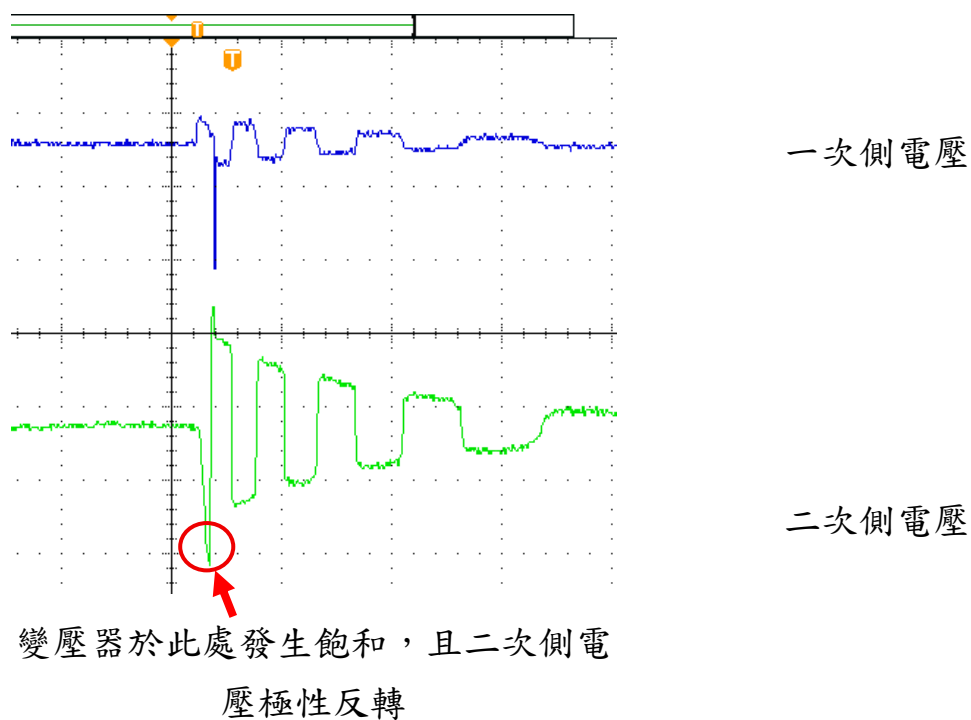


圖 52 變壓器電壓波形放大圖

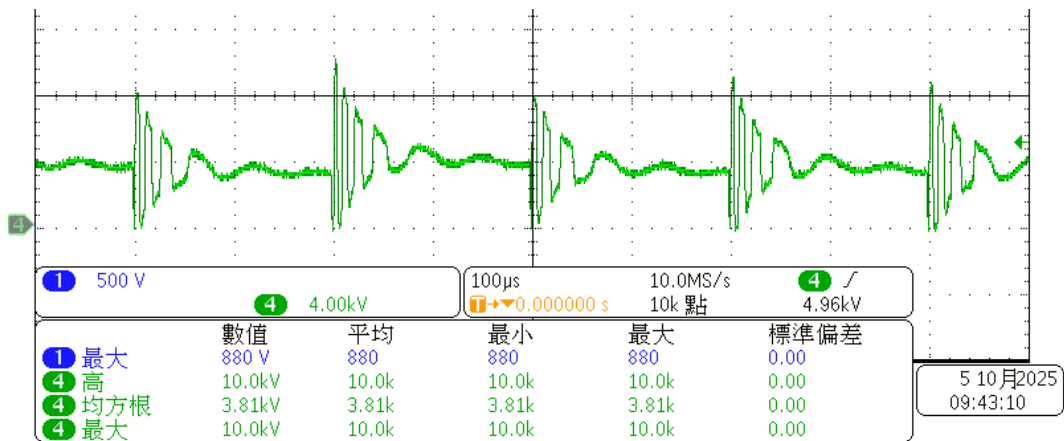


圖 53 輸出電壓 V_o 之波形圖

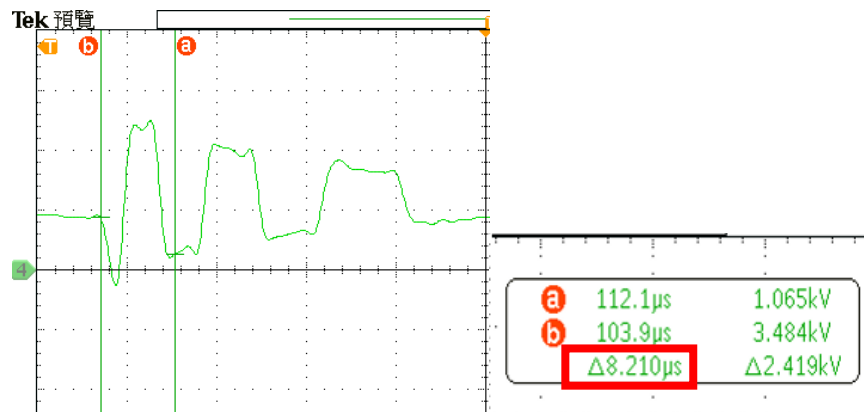


圖 54 輸出電壓 V_o 之波形放大圖及脈寬

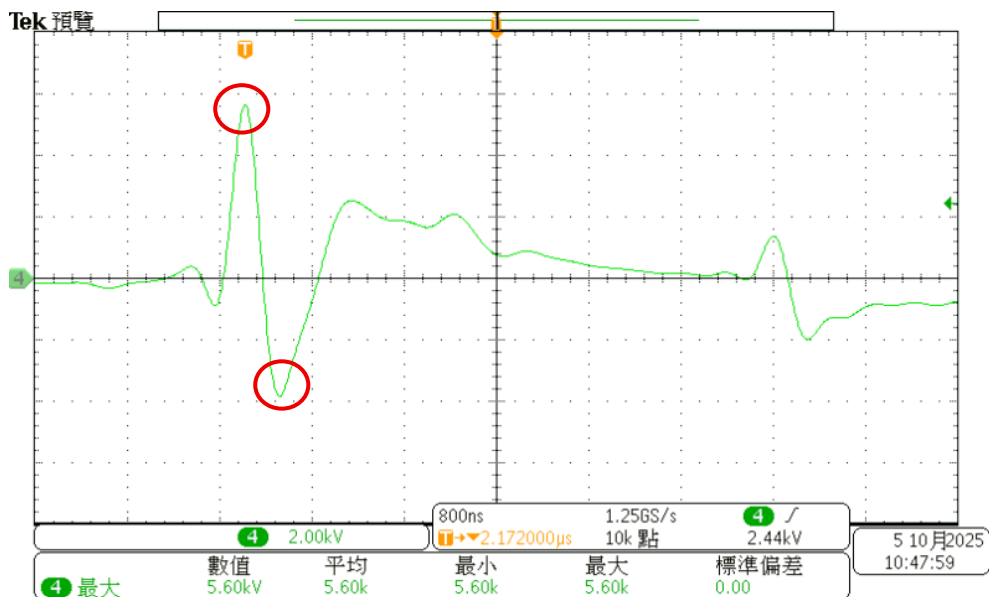


圖 55 可飽和電感電壓波形圖(紅色圈為飽和點)

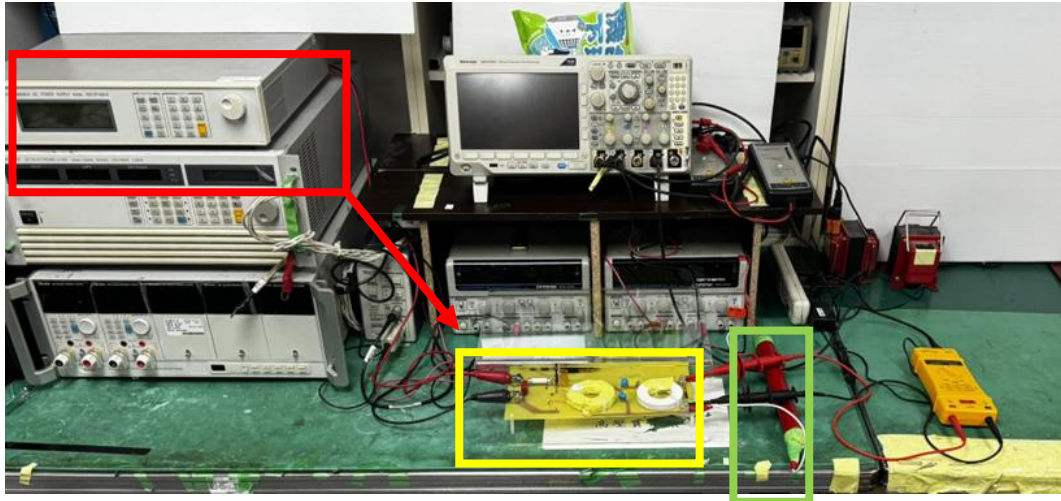


圖 56 磁脈衝電路實體照片(紅色框：電源供應器輸出 200V；黃色框：磁脈衝壓縮電路；綠色框：輸出負載 2kΩ)



圖 57 實驗人員安全措施示意圖

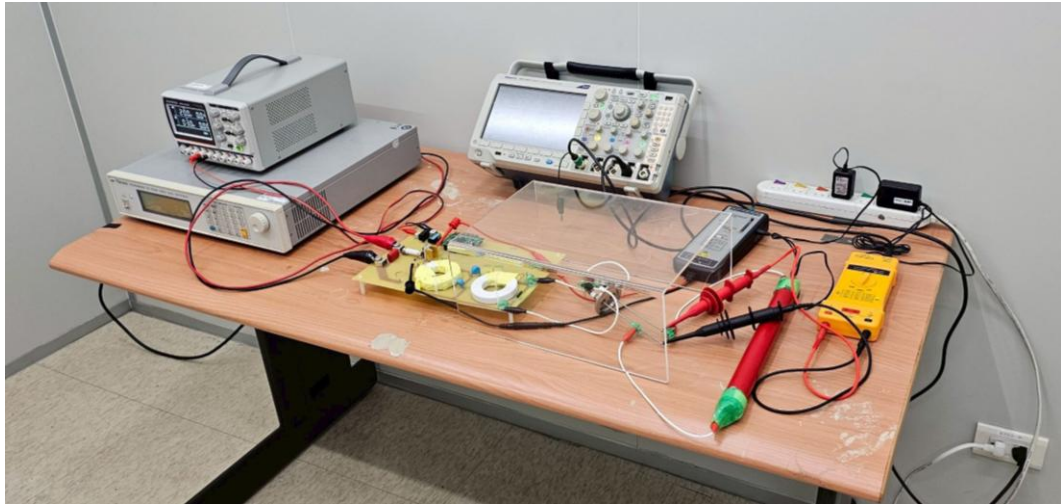


圖 58 台大竹北校區碧禎館實驗室電路移地測試

五、 放電電漿產生極紫外光光源整合測試

放電電漿發光整合測試部分，目前本團隊已完成初步整合真空腔體、電源電路模組及 DPF 電極進行測試，測試架構如圖 59。

初步測試結果可產生放電電漿，在輸入電壓於 140V(輸出脈衝電壓約 4.6kV)時尚未看到陽極前端有明亮區域(如圖 60)，而在輸入電壓大於等於 155V 時(輸出脈衝電壓約 5.5kV)可於陽極前端產生較為明亮的區域(如圖 61)，推測應有產生電漿壓縮的現象，大致符合 DPF 電極設計之工作電壓(4-5kV)。相關實驗參數及量測數據如表 18，後續將再對產生之電漿光源進行分析以得到轉換效率及發光功率，並逐步完善各模組以穩定提升發光功率。

表 18 放電電漿發光實驗參數

參數	數值
壓力 (Torr)	1.5×10^{-1}
輸入電壓 (V)	100、120、140、155、165、185、 190、200、205
最大輸出脈衝電壓 (V)	6.96 k
最大輸出脈衝電流 (A)	6.1
輸出脈寬 (μs)	1.48

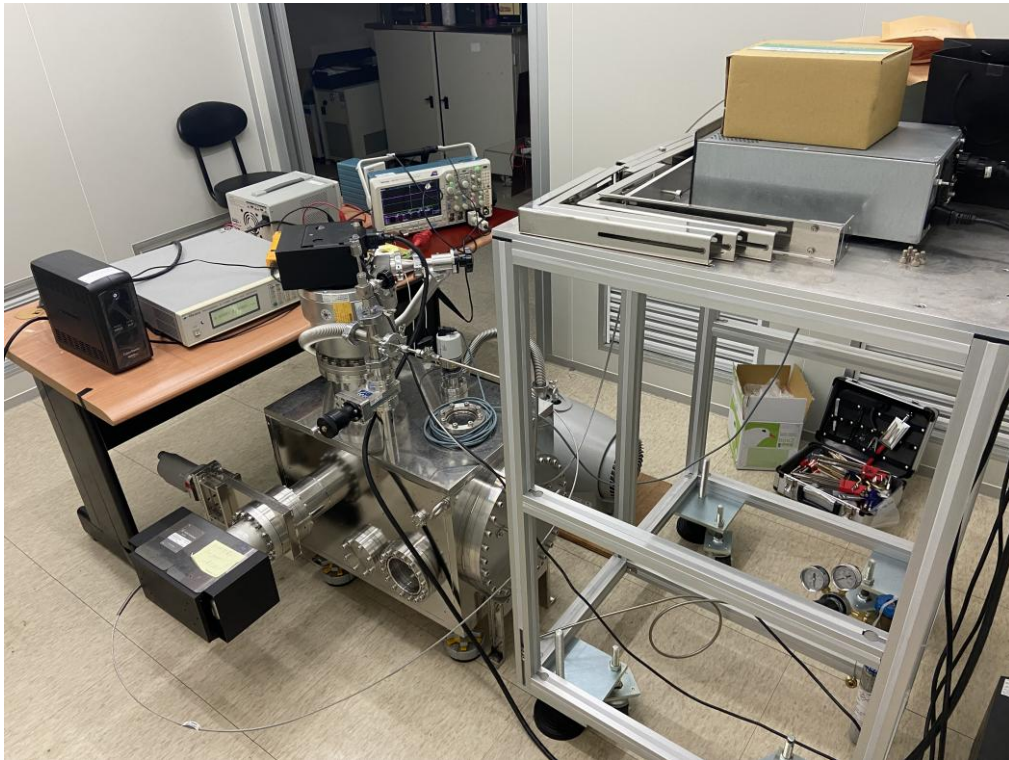


圖 59 台大竹北校區碧禎館實驗室放電電漿整合測實體照片

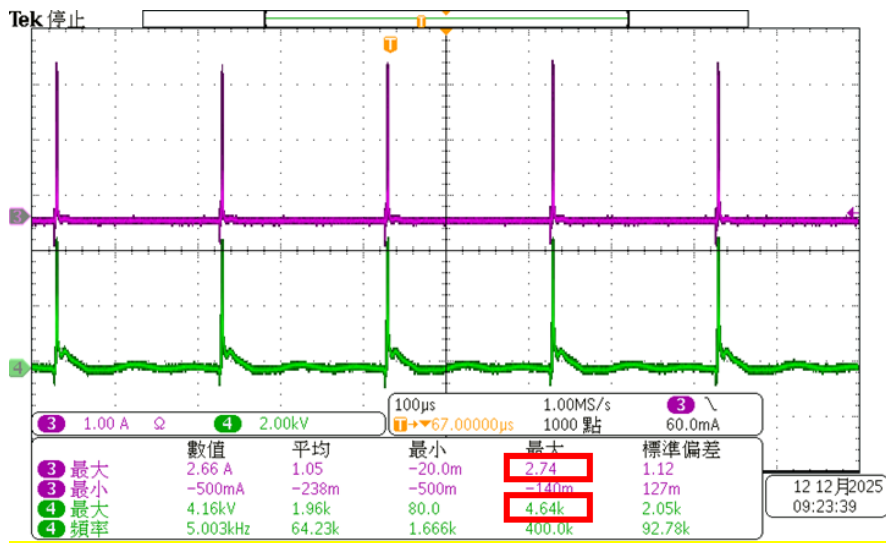
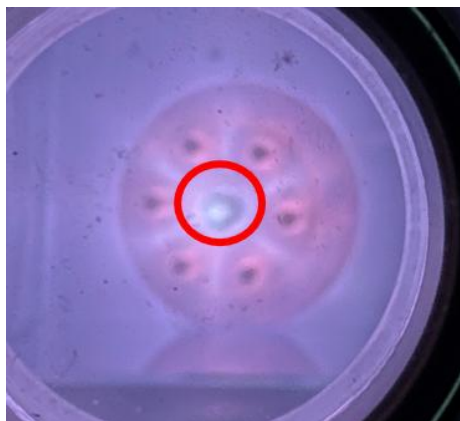


圖 60 輸入電壓 140 V 之電極放電照片(上)及量測電壓電流波形(下)



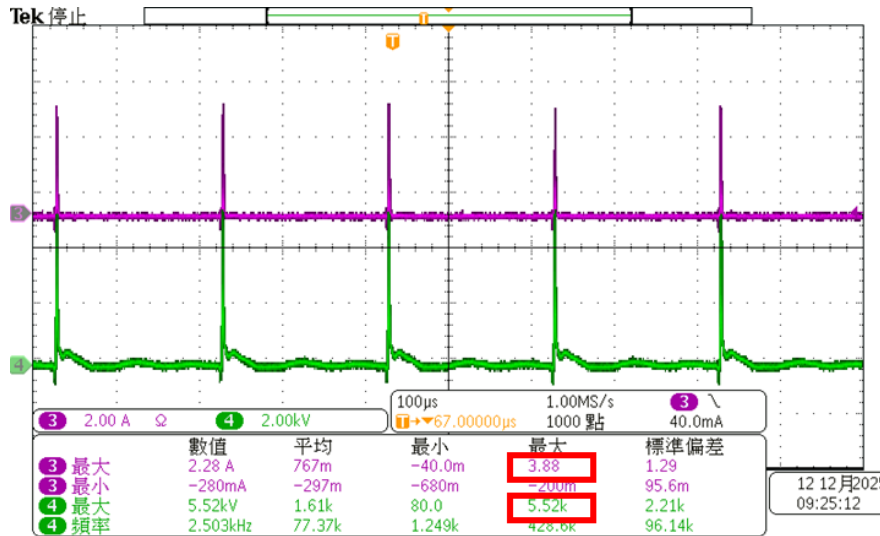


圖 61 輸入電壓 155 V 之電極放電照片(上)及量測電壓電流波形(下)

肆、參考文獻

- [1] Vivek Bakshi, ed. Photon Sources for Lithography and Metrology. SPIE press, 2023
- [2] Vivek Bakshi, ed. EUV sources for lithography. Vol. 149. SPIE press, 2006.
- [3] L. Pína, A. Inneman, A. Bartnik, H. Fiedorowicz, A. Jancarek, and M. Nevrkla, "A study of EUV/SXR/XR grazing incidence collectors for metrology sources," presented at the EUVL Source Workshop, Amsterdam, 7–9 November 2016
- [4] Joseph Pankert, et al. "Physical properties of the HCT EUV source." Emerging Lithographic Technologies VII. Vol. 5037. SPIE, 2003.
- [5] Stephen F. Horne, et al. "Application of a high-brightness electrodeless Z-pinch EUV source for metrology, inspection, and resist development." Emerging Lithographic Technologies X. Vol. 6151. SPIE, 2006.
- [6] Yusuke Teramoto, et al. "High-repetition-rate MPC generator-driven capillary Z-pinch EUV source." Emerging Lithographic

- Technologies VIII. Vol. 5374. SPIE, 2004.
- [7] Ahmad Al Agry. "Study of a Non-Equilibrium Plasma Pinch with Application for Microwave Generation." (2013).
- [8] J-P. Boeuf, and Leanne C. Pitchford. "Pseudospark discharges via computer simulation." IEEE Transactions on Plasma Science 19.2 (1991): 286-296.
- [9] D. Reisman, et al. "Optimization of an All Solid State Driven Discharge Produced Plasma (DPP) EUV Source." 2023 EUVL Source Workshop.
- [10] M. F. Nawaz, et al. "Table-top water-window soft X-ray microscope using a Z-pinching capillary discharge source." Journal of Instrumentation 11.07 (2016): P07002.
- [11] Ahmed Hassanein, et al. "HEIGHTS initial simulation of discharge-produced plasma hydrodynamics and radiation transport for EUV lithography." Emerging Lithographic Technologies VII. Vol. 5037. SPIE, 2003.
- [12] D. B. Reisman, Kosuke Saito, and W. A. Neff. "Simulation of a discharge produced plasma (DPP) for Blue-X (6. x nm) EUV radiation." Optical and EUV Nanolithography XXXV. Vol. 12051. SPIE, 2022.
- [13] Michele Frignani. "Simulation of gas breakdown and plasma dynamics in plasma focus devices." (2007).
- [14] Chung, H. K., et al. "The how to for FLYCHK." URL: <http://nlte>.

- nist.gov/fly/[cit. 2010-01-10] (2008).
- [15] J. J. MacFarlane, et al. "SPECT3D–A multi-dimensional collisional-radiative code for generating diagnostic signatures based on hydrodynamics and PIC simulation output." *High energy density physics* 3.1-2 (2007): 181-190.
- [16] William N. Partlo, et al. "Progress toward use of a dense plasma focus as a light source for production EUV lithography." *Emerging Lithographic Technologies V*. Vol. 4343. SPIE, 2001.
- [17] R. Stuik, "Characterization of XUV sources," Ph.D. thesis, Technische Universiteit Eindhoven (2002).
- [18] Mohammad Reza Qasemian Reyhan Abadi, et al. "High-voltage pulse generators for electroporation applications: A systematic review." *IEEE Access* 10 (2022): 64933-64951.
- [19] Dongdong Zhang, et al. "A compact, high repetition-rate, nanosecond pulse generator based on magnetic pulse compression system." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 18.4 (2011): 1151-1157.
- [20] Yi Liu, et al. "Optimization design of a repetitive nanosecond pulse generator based on saturable pulse transformer and magnetic switch." *IEEE Transactions on Plasma Science* 43.9 (2015):

3277-3285.

- [21]W. C Nunnally. "Magnetic Pulse Compressor Modulators for High Voltage, Low Energy Applications." 2008 IEEE International Power Modulators and High-Voltage Conference. IEEE, 2008.
- [22]饒俊峰, 邱劍, 劉克富. "脈衝壓縮電路磁開關動態特性." 強鐳射與粒子束 24.04 (2012): 859-862.
- [23]Majid Masnavi, et al. "Characteristics of extreme ultraviolet radiation conversion efficiency of xenon plasma." Japanese journal of applied physics 43.12R (2004): 8285.
- [24]Thomas Krücken, et al. "Fundamentals and limits for the EUV emission of pinch plasma sources for EUV lithography." *Journal of Physics D: Applied Physics* 37.23 (2004): 3213.
- [25]A. A. Shapolov, M. Kiss, and S. V. Kukhlevsky. "A simplified MHD model of capillary Z-pinch compared with experiments." *Contributions to Plasma Physics* 56.10 (2016): 959-967.
- [26]Wilhelm J. Egle, et al. "EUV collectors: design, development, fabrication, and testing." *Advances in Mirror Technology for X-Ray, EUV Lithography, Laser, and Other Applications*. Vol. 5193. SPIE, 2004.
- [27]B.L. Henke, E.M. Gullikson, and J.C. Davis. X-ray interactions:

photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at $E=50-30000$ eV, $Z=1-92$, Atomic Data and Nuclear Data Tables Vol. 54 (no.2), 181-342 (July 1993).

[28]Giacomo Galli, et al. "A new discriminating high temperature fission chamber filled with xenon designed for sodium-cooled fast reactors." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 968 (2020): 163947.

[29]Igor V. Fomenkov, et al. "Performance and scaling of a dense plasma focus light source for EUV lithography." Emerging Lithographic Technologies VII. Vol. 5037. SPIE, 2003

[30]Klaus Bergmann. "Research and development of EUV sources at Fraunhofer ILT." 2023 EUVL Source Workshop.

[31]A. Biermanns-Föth, et al. "The EUV-LAMP and application in Pellicle Inspection Tools." 2023 EUVL Source Workshop.

[32]C. Lee, et al. "Next-generation DPP EUV light source to support the HVM lithography ecosystem." Photomask Technology 2024. Vol. 13216. SPIE, 2024.

[33]Yusuke Teramoto, et al. "Development of Xe-and Sn-fueled high-power Z-pinch EUV source aiming at HVM." Emerging

Lithographic Technologies X. Vol. 6151. SPIE, 2006.

[34] 趙永蓬, et al. "13.5 nm 放電 Xe 等離子體極紫外光源." Chinese

Journal of Lasers 45.11 (2018): 1100001-1.

伍、論著產出及研討會發表

類型	題名	主要作者	編號
研討會論文	Model-based optical proximity correction for talbot lithography considering the non-paraxial Talbot effect	Jr-Wei Ke, Jia-Syun Cai, Chien-Lin Lee, Chung-Ping Tang, Kuen-Yu Tsai, Jia-Han Li, Chao-Te Lee	Proc. SPIE 13687, Photomask Technology 2025, 136871B (6 November 2025)
研討會論文	Camouflage circuit design and complementary lithography techniques with proximity effect correction for IC security	Jia-Syun Cai, Chien-Lin Lee, Kuen-Yu Tsai	Proc. SPIE 13687, Photomask Technology 2025, 136871N (6 November 2025)
研討會論文	The effect of thermal annealing on the surface roughness and optical properties of periodic Mo/Si films with TiO ₂	Chao-Te Lee, Wen-Hao Cho, Hung-Pin Chen, Wei-Chun Chen, Yu-Wei Lin, Kun-An Chiu, Bor-Yuan Shew,	Proc. SPIE 13687, Photomask Technology 2025, 1368718 (6 November 2025)

	film for EUV application	Cheng-Chung Jaing, Chien-Lin Lee, Kuen-Yu Tsai	
研討會簡報	Z-pinch 裝置之電漿動態研究	李建霖、唐中平、蔡佳勳、蔡坤諭	2025 COMSOL 多物理量 AI 技術年會

陸、跨機關團隊合作

1. 與台灣科技大學就極紫外光光源所需之脈衝電源設計及製作形成合作團隊，結合台灣大學設計模擬能力與台灣科技大學於高壓電路實作能力，共同建置關鍵高壓脈衝電源電路。
2. 與國家實驗研究院台灣儀器科技中心就光源設備關鍵模組建置形成合作團隊，結合台灣大學研發創新能力與國儀中心設備建構及近期引進之極紫外光源設備之經驗，共同建置光源自主設備，如真空腔體及周邊模組等。

柒、技術創新

1. 本計畫藉由結合放電電漿模型、電漿輻射模型及電路模擬技術，建置完整 EUV 光源系統模擬架構，並預計加入最佳化方法將發光效率作為最佳化目標，對光源模組之電極形狀尺寸、電路參數、氣體參數等同時進行疊代調整，以期尋找能有效提升光源發光效率之設計參數。
2. 計畫團隊也於 2025 年 3 月及 9 月與美國 EUV Tech 公司互訪進

行技術交流，該公司致力於研發 EUV 檢測系統，初步討論若本計畫建置之光源模組達到一定規模後，該公司有意願合作使用其檢測設備進行測試，並探討後續自主光源設備商轉之可能性。國內部分預計也將與國儀中心及工研院合作尋找適合的單位，若為業界可能以 EUV 檢測公司為主，學研界則以建置實驗用 EUV 光源為目標。

- 計畫團隊已加入國際上新成立之 Blue-X Technical Working Group，該工作團隊主要目標為研發及推動下一代 EUV 技術，探討之議題囊括 EUV 光源所有面向，透過定期參與工作會議可獲取國際最新研究成果，如電漿模型及實驗測試資料、反射鏡設計及材料測試參數等，可幫助計畫團隊調整研究方向，並藉此尋求更多資訊與經驗交流來支援研發及與國際接軌。

捌、人才培育

參與計畫人力	本國籍	大專生	1
		碩士生	2
		博士生	2
		專任人員(博士級)	1
		專任人員(非博士級)	1
	非本國籍	大專生	
		碩士生	
		博士生	
		專任人員(博士級)	
		專任人員(非博士級)	