核能安全委員會委託研究報告

半導體光源設備自主能力建構

- 計畫編號:NSC11212055L
- 受委託機關: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

中華民國 113 年 12 月

中	文	摘	要	•••	••••	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	1
A	BS	T	RA	C	Г.	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	2
壹		計	畫	緣	起	與目的	4
	-	`	計	畫	緣	起	4
	ニ	•	計	畫	目	的	6
濆	. `	研	究	方	法	與過程	10
	(-	-)	濃	密	電	影聚焦(DENSE PLASMA FOCUS)架構	10
	(二	-)	中	空	陰	種觸發(HOLLOW-CATHODE-TRIGGERED)架:	構13
	(三	_)	無	電	極	E(ELECTRODELESS Z-PINCH)架構	15
	—	`	放	電	電	影聚產生極紫外光機制之模擬技術	18
	<i>–</i>	`	放	電	電	式浆產生極紫外光之電極結構製作	23
	Ξ	`	極	紫	外	光光源腔體及溫度與壓力控制系統設計	上作26
	四	`	高	壓	脈	(衝電源電路設計製作	29
爹	- `	主	要	發	現	」與結論	32
肆	: •	參	考	文	獻	ç	35
伍	. `	論	著	產	出	••••••	37
陸		跨	機	關	團	隊合作	38
柒	•	技	術	創	新	ŕ	39
扨	•	人	才	培	育	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	39

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, and the development of EUV inspection equipment, 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(HVM, high-volume manufacturing)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)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(laser-produced plasma, 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。

放電電漿(discharge-produced plasma, DPP)產生 EUV 光為另一種 廣為使用的電漿放光機制,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 25-50eV。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 50 瓦(2πsr)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 20W 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 以發光效率 1W(2π sr @ 13.5 nm 2%頻寬)、轉換效率達 0.1%為目 標,分年建構自主開發所需之關鍵技術與人才,同時為達足夠佳之 成本效益,以前述之光源規格概估預期成本目標為 100-200 萬台幣, 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。

5

二、 計畫目的

為執行核安會委託計畫的「半導體光源設備自主能力建構」研 究項目,本年度項目分為「放電電漿產生極紫外光機制之模擬技 術」、「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設計製作」及「高壓脈衝電源電路設計製 作」四個工作項目,各分項之目的分別陳述如下,各工作項目之預 期進度及查核點另列於表 2。此外,為便於呈現個工作項目之執行 內容與成果,計劃期間召開之工作會議以及期中報告各則分別列於 附件一至三以供參照。

工作項目一:

本工作項目之目的為透過嚴謹電磁、電漿模擬技術,研究和建 立可靠之放電電漿模型,並進一步以模型所產生之電漿參數透過輻 射轉移模擬產生電漿輻射頻譜,以利完成放電電漿產生極紫外光機 制模擬模型,其電漿放電之模擬結果須能符合表 4 所列之預期電漿 溫度、電漿離子密度及電漿電流值,已供後續光源模組開發使用。 本年度計畫已完成放電電漿模型初版,目前為整合放電電漿及電源 電路模擬正在嘗試進行電漿等效電路參數萃取,並且為提升放電電 漿模型準確度,正在與國家原子能科技研究院物理研究所團隊探討 以其現有設備進行調整後產生 EUV 光源之可行性。 工作項目二: 本工作項目之目的為設計及製作可產生電浆捏縮放光之電極結 構,透過分析現有之架構優劣選擇合適之電極設計並完成製作至少 一種符合工作項目一模擬結果之電極架構,後續嘗試導入新材料及 電極結構優化,以提升電極使用壽命及整體光源輸出功率。由於計 畫期程較趕,目前正在與儀科中心及其介紹之合作企業討論細節並 準備製作初版電極。

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、CCD 相機收光孔位、光感測器收光孔位及電極電源饋線孔位,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,以建置維持電極穩定和使用壽命之溫度監 控系統及用以協助調整整體系統參數之電漿狀態量測系統,並達到 可穩定運作之放電電漿發光腔體系統之目的。由於經費有限,本年 度計畫腔體結構部分將以調整現有之腔體設計為主,也完成盤點現 有閒置或可借用之設備,未來再規劃經費採購其他必要之設備如 CCD 及光感測器等

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

7

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,並使電漿氣體捏縮產生足以輻射出 EUV 波段頻譜之高能電漿,具體驗證規格詳列於表 1。本年度計畫 目前已完成電路設計以及電容充放電模擬初版,但高壓脈衝電源需 依實際負載設計以提高能量轉換效率,因此電源電路需引入動態阻 抗匹配設計以便隨不同電漿工作參數調整,目前正在與合適之企業 接洽以便未來製作電源模組時可考量符合本計畫光源模組之阻抗匹 配需求。

參數	設計目標
充電電壓	1200-1500 V
充電時間	100-150 μs
脈衝輸出電壓	4-5 kV
脈衝輸出電壓上升時間	小於 100µs
脈衝輸出能量	10-20 J
工作頻率	1 kHz

表1 脈衝電源規格需求

表 2 113 年度工作項目預定進度及查核點

年 月	1	2	3	4	5	6	7	8	0	10	11	12	借
	1	2	3	4	5	0	/	0	2	10	11	12	[用]
													註
工作項目													
建立放電電漿發光機制							10	20	40	60	80	100	
模擬技術													
放電電漿產生極紫外光							10	20	40	60	80	100	
光源之電極結構製作													
極紫外光光源腔體及溫							10	20	30	40	70	100	
度與壓力控制系統設計													
製作													
高壓脈衝電源電路設計							10	20	40	60	80	100	
製作													
工作進度估計百分比	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
(累積數)													
	113 -	年 9	月2	23 日	前完	成放	て電電	宽浆杀	そ光 機	送制探	〔討及	建模	莫規劃、放電電漿
	產生	極紫	外光	光源	之電	極結	構設	:計、	極紫	外光	光源	腔體	設計及高壓脈衝
	電源	電路	設計	, <u>並</u>	繳交	期中	報告	· 1 f	分及	word	1電-	子檔	0
預定查核點	113 -	年 12	2月	9日	前完	戊成放	て電電	宽浆颈	~ 光機	送制椁	英擬 模	英型建	立、放電電漿產
	生極	紫外	光光	源之	電極	結構	製作	、極	紫外	光光	源腔	體製	作、極紫外光光
	源腔	體溫	度與	壓力	控制	系統	製作	及高	壓脈	衝電	源電	路製	作,並繳交「半
	導體	光源	設備	自主	能力	建構	」期	末報	告 1	份》	& wo	ord 1	電子檔。

貳、研究方法與過程

本計畫之光源模組採用成本、體積較小的 DPP 光源,並選擇其 中發光效率較高之 Z 軸捏縮(Z-pinch)機制。而放電電聚產生極紫外 光機制方面,選擇文獻探討較完整之濃密電聚聚焦(Dense plasma focus, DPF)架構[2],並同步考量驅動電路較簡單之中空陰極觸發 (Hollow-cathode-triggered, HCT)架構[3]及運作壽命較長之無電極 (Electrodeless Z-pinch)架構[4],三種架構如圖 1 所示,其基本運作原 理將分別詳述於本節。



圖 1 濃密電漿聚焦(Dense plasma focus)架構(左)[2];中空陰極觸發(Hollow-cathode-triggered)架構(中)[3];無電極(Electrodeless

Z-pinch)架構(右)[4]

(一) 濃密電漿聚焦(Dense plasma focus)架構

DPF 是一種高能量密度的放電電漿技術,其發展歷史可追溯至 20世紀中期。最初,科學家們對於電漿物理學的研究主要集中在核 融合和高能量物理的應用上。1950年代,隨著電漿技術的進步,科 學家開始探索如何利用短脈衝放電產生高密度的電漿。DPF 技術由 J.W. Mather [5]和 N.V. Filippov [6]等人基於相似的物理原理分別研 究設計 DPF 的裝置結構,其主要運作原理基於電磁壓縮與電漿不穩 定性。當高壓電流通過裝置中的氣體時,氣體被擊穿形成電漿,隨 後由於勞倫茲力的作用,電漿被壓縮至中心形成一個高溫高密度的 電漿團,此即為 Pinch。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。此技術因其結構簡單,通常由兩個同軸電極組成,外加 充滿低壓工作氣體的真空腔體,且成本相對低廉、裝置體積小以及 操作靈活成為研究核融合、材料科學以及醫學影像等領域的重要工 具。此外,該技術還被廣泛應用於基礎物理研究,例如研究電漿的 不穩定性和磁流體動力學現象,但因電漿放電過程中,電漿內部可 能產生多種不穩定性,因此 DPF 同時也面臨如穩定性控制和能量效 率提升等技術挑戰。

DPF 放電過程大致上可以分成幾個階段如圖 2 所示[7]

- 氟體崩潰階段(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 氟體崩潰,並沿著絕緣層表面形成電漿鞘層(Plasma sheath),並形成圖2(a)之放電迴路。
- 2. 軸向加速階段(Axial acceleration phase): 當電漿電流於兩同

軸電極間徑向流動時,受其產生磁場之勞倫茲力作用,電漿 鞘層將沿著同軸電極之軸線往開口方向加速移動。

3. 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使電漿於 電極前端產生捏縮(Pinch)區域,並視 DPF 設計參數產生高 能離子、電子及 soft/hard x-ray 輻射等等。









(b)

(c)

圖 2 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]

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

HCT 架構是一種常見於電漿技術中的特殊放電形式,其產生捏 縮電漿的原理是偽火花放電(Pseudospark discharge)。由於其具有高 電子密度、低操作壓力以及穩定的放電特性,中空陰極電漿廣泛應 用於材料表面處理、薄膜沉積、光譜分析以及推進系統等領域。這 項技術在工業和科學研究中展現出極大的潛力,特別是在需要精密 控制和高效能的應用場景中,具有不可替代的重要性。自 1970 年代 [8]以來,這種低壓氣體放電被廣為研究。其主要研究重點是應用於 脈衝功率的高電流開關和作為高亮度電子及離子束源。而此架構用 於 EUV 光源的主要區別在於使用脈衝大電流來壓縮和加熱工作氣

13

體來形成捏縮電漿。

HCT 架構的電極設計概念單純,主要由兩個中央孔洞相對的平 行板構成,連接至低電感的放電電容,並在10-100 Pa 低壓環境下運 行。施加脈衝高壓後,電離過程通常在孔洞附近發生,當電子被陽 極吸引,運動速度較慢的離子於空心陰極形成虛擬陽極並引發電子 在空心陰極中的擺動效應,增強電漿生成效率,如圖3所示[9]。當 陰極附近電場足夠高時,便會觸發自我崩潰(self-breakdown),使電 容放電並產生 10kA 等級之脈衝電流,放電電流通常較容易沿著孔 洞及平板間隙流動,使間隙中的電漿捏縮形成高溫高密度電漿,其 捏縮電漿尺寸依孔洞幾何形狀而決定。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,降低電源電路複雜度及 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 4),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,此外電漿捏縮產生位置附近無絕緣材料,可使降溫效率提高並 减少材料溅射傷害,惟此架構類似兩相對中空同心圓柱,其可收光 角度受限於中心電漿捏縮區域之開孔設計,較其他兩種架構窄,整 體收光效率可能較差。HCT 在 EUV 光源領域具有重要潛力,但仍 需克服多項技術挑戰以實現更高效能與穩定性,如陰極點火、電極 壽命放電觸發技術等問題,特別是在脈衝大電流階段需進一步的研 究。

14



圖3 偽火花放電模擬示意圖;虛擬陽極產生過程之電位變化(左);



中空陰極電將產生階段之電位(右)[9]

圖 4 透過調整觸發電極電位達到可控放電

(三) 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,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,其基本設計 概念,變壓器的初級電路由兩片平行銅板組成,通過中央的導電管 連接。初級電流在一塊板上徑向流入,通過中央連接軸向流動,然 後在第二塊板上徑向流出。感應的次級電流通過三個並聯的迴路在 電漿中流動,並於中央孔洞匯合(如圖 5 所示)。銅板之間包含兩個 磁芯,內部磁芯緊密包圍中央孔,用以提供主迴路與流動在電漿中 的三個平行次級迴路之間的電磁感應,並於孔中產生捏縮電漿。第 二個磁芯位於銅板的外圈附近,包圍著三個電漿回流孔作為磁開關 運作(如圖 6)。當電流足夠大時,次級迴路產生的磁場將對中央孔洞 電漿捏縮並加熱到足以產生 EUV 輻射的程度,由於電漿電流自行形 成閉迴路且不經由電極,因此無電極殘骸產生,加上電漿迴路受磁 場約束遠離銅板使其空間穩定性更高,並進一步減少殘害,可大幅 提高運作壽命,而暴露電漿強烈濺射環境的中央孔洞區域也使用易 於更換的設計,但也因為電漿電流不直接從電極產生,其發光功率 較難提升,並且中央孔洞幾何形狀對捏縮電漿尺寸有相當大的影 響,增加設計複雜度。



圖 5 無電極架構核心與電漿幾何示意圖[1]



圖 6 無電極架構核心截面示意圖[1]

由於三種 DPP 光源架構其驅動電路皆須配合放電運作原理做相應設計,雖然模擬部分可以三種架構並行,但實體設備建置在有限 資源下須選擇初步建構之架構,為便於比較將於下表簡要三種架構 優劣之處,以便定義初期投入目標。綜觀三種架構,就建立初步可 產生 EUV 光源為優先考量,以 DPF 為主對於有限資源下較為可行, 同時於後續腔體設計也將引入可更換電極之設計,以便未來視計畫 執行狀況有可快速更換架構之可能性。

架構	優點	缺點	現行規格
DPF	電極結構簡單 成本低	電極壽命較低	轉換效率:0.5% 發光功率:76W (2% BW 2π st)
	發光功率高		(2% D ^w , 2 <i>k</i> si) 工作頻率 2.5kHz
НСТ	驅動電路較簡單 能量效率較佳	收光效率較差	轉換效率:0.5% 發光功率:40W (2% BW, 2π sr) 工作頻率 2.5kHz
Electrodeless Z-pinch	穩定性高 核心壽命長	電極結構複雜 發光功率較低	轉換效率: 0.6% 發光功率: 20W (2% BW, 2π sr) 工作頻率 2.5kHz

表3 三種 DPP 光源架構優劣表

一、 放電電漿產生極紫外光機制之模擬技術

放電電漿產生極紫外光之模擬流程,將先以開源程式/COMSOL 或其他電漿模擬軟體建立之放電電漿模擬所得之電漿參數(溫度、游 離態分布、密度分布等),再將前述參數透過 NIST 提供的非局部平 衡 熱 力 學 (Non-Local thermodynamic equilibrium) 模 擬 程 式 FLYCHK[10]計算輻射轉移,以求得不同工作參數下之輻射頻譜,再 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。放電電漿模擬主要參考相關文獻資料建立 DPF 架構之 模擬參數,而預期結果部分則整理文獻上可產生 EUV 波段輻射之電 漿放電可量測之資料為主[11],初步模擬參數及預期結果整理如表 4,本計畫模擬模型之目標預期結果將先以此為基準,後續待優化模 擬模型使其更加精準後,再行探討可得到較佳 EUV 輻射頻譜之電漿 模擬結果。而 HCT 及無電極架構由於目前可取得之文獻資料缺乏較 細節之參數(如完整電極尺寸等),因此將先以最佳化方法透過預期模 擬結果分別求得兩種架構之完整參數。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 及輻射頻譜做為模擬模型之可信度驗證。

模擬參數						
電源輸出電壓	5 kV					
氣體源	Xenon					
氣體壓力	1.22 Torr					
等效串聯電感	100 nH					
充電電容	30 µF					
等校串聯電阻	12 mΩ					
內電極半徑	3.2 cm					
外電極半徑	0.95 cm					
電極長度	4 cm					
預期結果						
電浆溫度	~30 eV					
電漿離子密度	$\sim 10^{18} \mathrm{cm}^3$					

表 4 DPF 架構模擬參數及預期結果

DPF 架構目前參考表 4 於 COMSOL 建立電極結構(如圖 7),並 參考 NIST 之 Atomic spectra database[12]、LXCat 的 plasma database[13]或相關文獻資料[14][15]匯入氙氣粒子碰撞反應資料,以 建立適當反應模型,以便在 COMSOL 模擬得出電漿電子/離子分布 密度、溫度等資料後,可再透過反應模型模擬其電漿輻射轉移效應, 並與 FLYCHK 之 collisional-radiative 模型之模擬結果交互驗證。 COMSOL 電漿放電模型建立後,透過導入電路模組(如圖 8),可進 一步萃取放電電漿等效電路函數,以完善第四項工作項目之高壓脈 衝電源電路設計與模擬。目前引入電路模組之放電電漿模擬已初步 建立(如圖 9 (a)、(b)),並可模擬放電過程電漿之電壓及電流變化, 惟目前因時程較趕,模擬環境設定未調整完全,因此耦合電漿物理 模型後,萃取放電電漿參數部分僅有初步模擬結果(圖 9 (c)),尚未 取得完整之電漿等效電路函數。



圖 7 COMSOL DPF 電極結構建模



圖 8 DPF 架構等效電路











圖 9 COMSOL 模擬放電電漿等效電路於放電時之電壓電流變化及 (a)電漿電流(b)電容電壓(c)加入電漿物理模型後之電壓電流變化

二、 放電電漿產生極紫外光之電極結構製作

放電電漿產生極紫外光之電極結構方面,電極材料選用考量依 據主要為耐熱性及阻抗。因為放電過程會使電極瞬間加熱至上千 度,可能使電極變形,因此為了提高電極使用壽命,耐熱及導熱性 高為電極的材料的選擇因素之一;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。本年度將以前述文獻 上成熟結構及材料(鎬、銅等)為基礎,並藉由第一項所建立之模型 設計可產生極紫外光之電極結構。實作方面,三種結構初步設計如 下分別說明,但考量 DPF 架構國內亦有相關設施可借鑒及資源有 限,故本團隊將優先選擇此架構,並規劃與台灣儀器科學中心合作 利用其設備零組件設計之經驗及已建置設備進行製作,後續將與儀 科中心共同評估合適製作之電極結構(視未來執行進度及儀科中心 新引進之無電極 EUV 設備運用情形選擇單一或多個電極架構),未 來將嘗試優化電極結構及導入新材料,以進一步提升電極壽命及發 光功率。

(一) 濃密電漿聚焦(Dense plasma focus)架構

DPF架構電極參數藉由S. Lee 團隊所開發之RADPF程式設計初

23

步電極與工作參數如表 5,並進行初版電極設計(圖 10),目前正與 儀科中心及其介紹之合作企業討論細節並準備製作。

參數	設計數值
內電極半徑	3.2 cm
外電極半徑	0.95 cm
電極長度	4 cm
電容大小	30 µF
脈衝電壓	5 kV
氣體源	Xenon
氣體壓力	1.22 Torr

表5 可產生 EUV 光源之 DPF 初版設計參數



圖 10 DPF 電極結構初版設計圖

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

HCT 電極結構將參照第一項工作項目所提方法進行設計,初版結構設計如圖 11,待完整 HCT 放電電漿模擬模型建立完後,將完

善設計並與儀科中心合作討論細節並完成製作。



圖 11 HCT 電極結構初版設計圖

(三) 無電極(Electrodeless Z-pinch)架構

無電極架構將參照第一項工作項目所提方法嘗試進行設計,初 版結構設計圖12,待完整無電極架構放電電漿模擬模型建立完後, 將完善設計並與儀科中心合作討論細節並完成製作





圖 12 無電極耦合磁芯結構初版設計圖:整體架構(上);紅線部分截

面圖(下)

三、 極紫外光光源腔體及溫度與壓力控制系統設計製作

極紫外光光源腔體及溫度與壓力控制系統方面,由於 EUV 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,電漿捏縮 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。此外在脈衝放電過程中電極需承受相當大的能量,並可能將電 極加熱至上千度,若無法及時將廢熱排除,將可能使電極變形影響 運作。因此為了提高光源功率,除了必須控制氣流,以避免電漿電 漿捏縮位置維持不穩定及確保輻射出之 EUV 不被工作氣體重新吸 收,亦需設計適當之電極散熱系統使電極於運作時能維持穩定,同 時也需要建置電漿量測系統評估放電電漿狀態,如溫度、電漿密度 分布、輻射頻譜等,以分析及調整放電電漿系統參數使其能穩定輻 射頻出 EUV 波段光源。

實作部分將參考 Cymer DPF 光源腔體設計[16](如圖 13), 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、電極及電源饋線孔位、真空幫浦孔位、壓力監控孔位、 光感測器、CCD 及 EUV 出光孔位等。腔體結構將以過去本團隊與 儀科中心合作設計製造之 EUV 製程腔體或近期受到轉讓之 EUV 腔 體為基礎(如圖 14、15),修改設計使其符合 EUV 光源腔體需求,並 完成製作。此外,由於經費有限,因此也將盤點使用現有閒置或可

26

借用之設備如表 6,後續再規劃經費採購其他必要之設備如 CCD 及 光感測器等,而與儀科中心合作之具體設計及製作流程(包含電極和 真空腔體系統)主要為本計畫團隊先行完成初版之電極及腔體各模 組的設計及需求規格,再透過儀科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,以完成電極及腔體模組零 件之採購與製作。



圖 13 DPF 腔體示意圖[16]



圖 14 台大-儀科中心 EUV 製程腔體及孔位示意圖



圖 15 可用於 EUV 應用之腔體

表	6	現有	設借	及儀	器	盤點	表
1	0	-/0/1	~ 175	~~ AX	uu	THE WILL	11

設備名稱	廠牌型號	型號		
渦輪幫浦	Varian	V81M Turbo Pump		
離子幫浦	Varian	Valcon 150 StarCell Ion Pump		
乾式幫浦	Agilent	SH-110 Scroll Pump		
真空計	Edwards	APG100-XM		
真空計	Agilent	UHV-24 Ion Gauge		
CCD攝影機	Princeton Instruments	PI-MTE:2048B		

四、 高壓脈衝電源電路設計製作

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設計將分析文獻上各種設計之優劣如放 電管開闢(圖 16)、磁開闢(圖 17)及功率固態元件開闢(圖 18)等,並 輔以電路設計模擬,選擇適當設計,以達成穩定產生可輻射出 EUV 光源之放電電漿,目前電源電路初步規格需求如表 1。電路模擬部 分採用 Matlab Simscape 平台, 並以表 4 之設計參數建立含開闢之電 容放電過程電路模型如圖 19, R₀、L₀、C₀分別代表雜散電阻、雜散 電感、充電電容,由於 R_0 、 L_0 真實數值需要待電路建置完後才能取 得,因此目前數值先參考類似設置使用的參數[11],而電漿等效電路 參數(Lppp)由於 COMSOL 電漿參數萃取正在進行中,因此將先參考 文獻[20] 使用放電過程之平均電漿等校電路參數,並先採用理想開 關和充電電源以進行定性模擬電漿放電特性,初步電容單次充放電 模擬結果如圖 20,從 C $_0$ 之電壓波型來看,上升時間大約為<100 μ 符合需求,惟電壓峰值因模擬使用之電路元件特性不完善,使其不 完全符合預期,後續將再透過文獻蒐集並請教國內有脈衝電路經驗 之相關研究團隊,以加入實際充電電源及功率開關模型參數以完善

30

電路模型,並結合第一項工作項目所建置之放電電漿模擬模型,使 用 COMSOL 或其他電漿模擬軟體萃取電漿等效電路參數定量模擬 電漿放電特性,以更準確對電源電路和電漿放電系統的阻抗進行匹 配提升效率。後續預計將 COMSOL 電漿放電模擬與 MATLAB 電路 模擬結合確保符合電漿放電整體系統特性符合設計並方便進行優 化。電路實作部分亦將請教相關研究團隊以期能順利完成製作



圖 16 放電管開關電源電路示意圖[17]







圖 18 功率固態元件開關電源電路示意圖[19]



圖 20 Simscape 電容充放電模擬電壓波形圖

參、主要發現與結論

- `

放電電漿產生極紫外光機制之模擬技術及電極結構製作

放電電漿模擬機制部分目前已完成模擬流程之設計,並已建立 COMSOL DPF 電極模型並完成初步放電電漿模擬,目前為整合放電 電漿及電源電路模擬正在嘗試進行電漿等效電路參數萃取,同時也 將評估使用 Vsim 電漿模擬軟體以交叉驗證模擬模型之可行性,以 便完成完整電極設計、電路、腔體零組件採購和製作。此外,計畫 團隊也拜訪國家原子能科技研究院物理研究所團隊,借鑒其高能電 漿實務經驗,並正在探討以其現有設備進行調整後產生 EUV 光源之 可行性,以取得實驗資料改善提升放電電漿模型準確度。後續亦將 結合 FYLCHK 輻射轉移模擬程式及 COMSOL 或 Vsim 放電電漿模 擬,透過疊代最佳化電極設計與工作環境參數,以達到較佳之電漿 輻射頻譜,提升光源模組性能,以期能完成光源建置,並逐步提升 發光功率。



圖 21 國家原子能科技研究院物理研究所之 5kW ICP 電漿源 二、 極紫外光光源腔體及溫度與壓力控制系統設計製作

光源腔體部分因放電電漿相當不穩定,需能有效控制電漿狀態 方可穩定出光,而為了能調整工作參數以控制電漿,需建置電漿量 測系統如光感測器及 CCD 以便分析電漿狀態,以及氣流控制系統使 電漿捏縮區域維持穩定,此外考量電極耗材更換之便利性及未來多 種光源電極結構共用腔體之可能性,也將可置換電極概念納入腔體 設計考量,上述相關模組將借重儀科中心於腔體設計製作方面之經 驗,並於有限經費下最大程度使用現有設備,目前正與儀科中心共 同討論設計細節及尚需採購之必要設備以加速製作符合 EUV 光源 需求之腔體。 三、 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步電路設計以及電容充放電 模擬,但高壓脈衝電源需依實際負載設計以提高能量轉換效率,因 此電源電路需引入動態阻抗匹配設計以便隨不同電漿工作參數調 整,目前正在與合適之企業接洽以便製作電源模組時可考量符合本 計畫光源模組之阻抗匹配需求。此外不同電極結構所需之電源模組 亦有差異可能無法通用,未來也將視執行狀況來選擇建置單一或是 多個電源模組。惟本團隊較缺乏高壓脈衝電源電路實務經驗,因此 實作部分將尋求國內於高能物理、電力電子有相當經驗之單位,如 國家原子能科技研究院、成大太空與電漿科學研究所、中大、台大 相關系所等之專家建議,若有機會也將爭取至美國德州理工大學脈 衝功率及電力電子中心或其他研究單位參訪,以利完成建置所需之

肆、參考文獻

- 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] Joseph Pankert, et al. "Physical properties of the HCT EUV source." Emerging Lithographic Technologies VII. Vol. 5037. SPIE, 2003.
- [4] 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.

- [5] J. W Mather. "Investigation of the high-energy acceleration mode in the coaxial gun." The Physics of Fluids 7.11 (1964): S28-S34.
- [6] N. V. Filippov, T. I. Filippova, and V. P. Vinogradov. "Dense high-temperature plasma in a non-cylindrical Z-pinch compression." Nucl. Fusion, Suppl. (1962).
- [7] Ahmad Al Agry. "Study of a Non-Equilibrium Plasma Pinch with Application for Microwave Generation." (2013).
- [8] J. Christiansen, and Ch Schultheiss. "Production of high current particle beams by low pressure spark discharges." Zeitschrift für Physik A Atoms and Nuclei 290.1 (1979): 35-41.
- [9] J-P. Boeuf, and Leanne C. Pitchford. "Pseudospark discharges via computer simulation." IEEE Transactions on Plasma Science 19.2 (1991): 286-296.
- [10]Chung, H. K., et al. "The how to for FLYCHK." URL: http://nlte. nist. gov/fly/[cit. 2010-01-10] (2008).
- [11]M. Akel, et al. "Xenon plasma as a potential source for EUV and soft X-ray radiations: Numerical experiments." Vacuum 101 (2014): 360-366.
- [12]https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database
- [13]https://nl.lxcat.net/home/
- [14]K. Rajaraman, Radiation Transport in Low Pressure Plasmas: Lighting and Semiconductor Etching Plasmas, PhD thesis, Depart. of Physics, University of Illinois 2005.
- [15]Michele Frignani. "Simulation of gas breakdown and plasma dynamics in plasma focus devices." (2007).
- [16] William N. Partlo, et al. "Progress toward use of a dense plamsa

focus as a light source for production EUV lithography." Emerging Lithographic Technologies V. Vol. 4343. SPIE, 2001.

- [17]S. Lee, et al. "A simple facility for the teaching of plasma dynamics and plasma nuclear fusion." American Journal of Physics 56.1 (1988): 62-68.
- [18] Vivek Bakshi, EUV Sources for Lithography, Ch12
- [19]Optimization of an All Solid State Driven Discharge Produced Plasma (DPP) EUV Source, 2023 EUVL Source Workshop
- [20]R. M. Ness, and W. N. Partlo. "Solid-state pulsed power module (SSPPM) design for a dense plasma focus (DPF) device for semiconductor lithography applications.", 2001.

論著類型	題名	主要作者	編號
		Chao-Te Lee,	International
	The effect of TiO2	Wen-Hao Cho,	Conference on
	film on the surface	Wei-Chun Chen,	Extreme Ultraviolet
	roughness and	Bor-Yuan Shew,	Lithography 2024 -
研討會論文	optical properties	Hung-Pin Chen,	Proc. SPIE 13215,
	of Mo/Si periodic	Cheng-Chung	1321508-1-1321508-
	films by atomic	Jaing, Chien-Lin	6, Monterey,
	layer deposition	Lee, Kuen-Yu	California, United
		Tsai	States, Sept. 2024
技術報告	多功能式極紫外	卓文浩、吳品	科儀新知,2024年9

伍、論著產出

	光微影元件檢測	鈞、李建霖、黃	月號 第240 期
	服務平台	羿誌、李昭德、	
		蔡坤諭、李佳翰	
计你却止	EUV 光罩檢測技	李建霖、蔡佳	科儀新知,2024年9
拉 侧 報 音	術	勳、蔡坤諭	月號 第240期
技術報告	半導體光源設備 自主能力建構	李建霖、蔡佳 勳、唐中平、蔡 坤諭、李昭德、 李佳翰	預計 2025 可投稿至 科儀新知或工研院 機械工業雜誌
研討會論文	(暫定)Independent development capability of EUV light source for semiconductor applications	李建霖、蔡佳 勳、唐中平、蔡 坤諭、李昭德、 李佳翰	預計 2025 可投稿至 International Conference on Extreme Ultraviolet Lithography 或 Source Workshop

陸、跨機關團隊合作

- 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及儀科中心設備建 構經驗及即將引進之 EUV 光源設備技術共同建置自主 EUV 光 源模組。
- 與國家原子能科技研究院物理研究所就其高能電漿技術與實務 經驗進行合作,藉由調整其現有高能電漿平台之部分架構或參 數,取得 EUV 光源相關實驗數據,並測試計畫之關鍵模組(如電 極設計、電源模組等),以增進計畫之模擬模型精準度及各模組 功能驗證。

柒、技術創新

- 本計畫藉由結合放電電漿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就光源模組之關鍵 參數(如電極形狀尺寸、電路參數、氣體參數等)進行疊代調整, 以期有效提升光源發光效率。
- 2. 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世代 EUV 技術, 並將參與下一次工作會議(2025 年 2/10-2/12),藉此尋求更多資 訊與經驗交流來支援研發及與國際接軌。此外,計畫團隊也預 計將與 2025 年 3 月來訪之美國 EUV Tech 公司進行技術交流, 探討各種合作之可能性。

捌、	人才	培育
----	----	----

		大專生	
	本國籍	碩士生	1
		博士生	2
		專任人員(博士級)	1
安的斗争人力		專任人員(非博士級)	1
<u> </u>		大專生	
		碩士生	
	非本國籍	博士生	
		專任人員(博士級)	
		專任人員(非博士級)	