

知識天地

迴授最佳化式強場電漿元件

白植豪博士後研究、陳賜原研究員（原子與分子科學研究所）

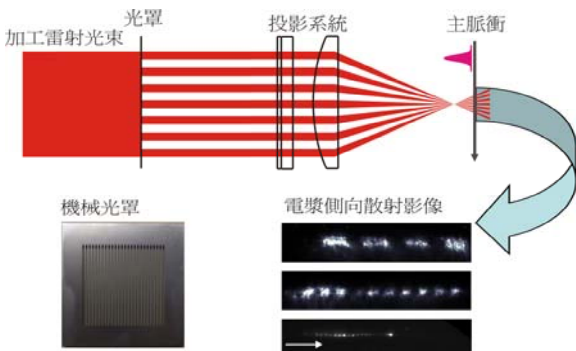
自從 1960 年 Maiman 發明雷射之後 [1]，雷射與各種物質的交互作用就一直就是一門活躍的科學領域。接著，由於雷射光在時間上與空間上的品質不斷地提昇，雷射的功率以及照度也就跟著在增強。例如，1964 年發明的 mode-locking 技術將雷射的能量集中到短於 100 皮秒 (10^{-12} 秒) 尺度的短脈衝裡面 [2]。Strickland 和 Mourou 於 1985 年發明了線性變頻脈衝放大技術(chirped pulse amplification)，使得短脈衝雷射脈衝放大技術的發展突飛猛進 [3]。到了 1990 年代中期，由於內建高階色散補償的寬頻鏡片問世，配合寬頻的 Ti:sapphire 晶體，更使得雷射可以直接產生飛秒 (10^{-15} 秒) 等級的短脈衝雷射。目前，結合了飛秒等級的短脈衝雷射以及線性變頻脈衝放大技術，在小型的實驗室裡已經可以產生時長為數十飛秒、能量達數焦耳以上之雷射脈衝。這樣的脈衝，其瞬間功率已經達到十兆瓦，並且在聚焦後其瞬間照度可以達到 10^{23} W/m²，是正午日照的 10^{20} 倍！

而在 10^{23} W/m² 的強大雷射電磁場作用下，任何物質都會被瞬間游離成爲電漿。電漿常常被認爲是物質的第四態。它普遍地存在於我們生活的地球上，更是組成 99% 目前可觀測到的宇宙的主要物質狀態。同時，電漿具有許多迷人的物理特性：一、電漿可以承受高強度雷射而不會被破壞（這是因爲電漿已經是任何物質被破壞後的最終狀態，就不會被高強度雷射更進一步破壞）；二、電漿具有極寬廣的工作頻率範圍（涵蓋 X 光到紅外光）；三、其光學性質可以藉由改變電漿密度或雷射強度來控制；四、可調的範圍很大，且反應速度快（反應速度由電子移動速度決定，而電子的速度接近光速）。電漿的這些獨特性質促使強場雷射與電漿交互作用無論是基礎科學的研究上還是在應用科學的發展上都有很高的潛在價值。在實驗室裡，由於強場雷射的發明，強場雷射與電漿交互作用除了在基礎非線性科學的探索有極高的重要性之外，更在許多應用科學方面有極大的發展潛力，諸如電子加速器、質子加速器、X 光雷射、雷射放大器、材料製程以及核融合等。

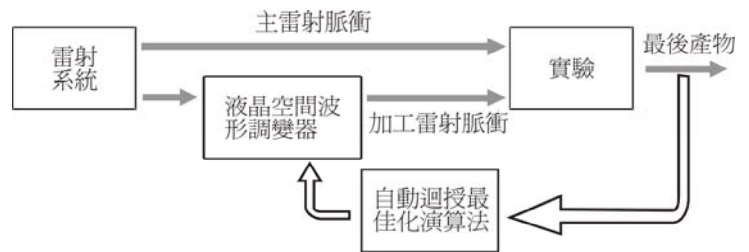
我們實驗室利用一部自製的高性能十兆瓦雷射來研究強場雷射與電漿的各種交互作用以及其應用的開發 [4]。對我們來說，電漿就如同半導體材料一樣，需要藉由這樣的雷射來製作出我們想要的強場電漿元件的特定結構，從而產生更高品質和更高輸出的光源或粒子源。半導體產業的發展的重要關鍵在於小尺度的電子元件製程的成功發展。在半導體元件的製程裡面的一個關鍵程序是利用預設的光罩縮影來曝光光阻後再經由蝕刻的方法來製造出事先設計的 IC 線路。類似半導體電子元件的製程，我們發展出一套利用光罩縮影與雷射加工的方法來製作出瞬態強場電漿元件 [5]。光罩縮影雷射加工電漿的基本原理是當雷射將原子游離成電漿時，也會加熱游離出來的電子。電漿受熱後會開始膨脹散逸，進而形成局部的瞬態空洞。這樣的瞬態電漿結構雖然僅存活約 1 奈秒，但相較於我們所要進行的強場雷射與電漿進行的交互作用的時間尺度而言（少於幾十皮秒），等同於近乎穩定不變的電漿密度結構。建立於這個光罩縮影雷射加工電漿的基本原理上，我們著手設計類似於半導體製程的強場電漿元件製程。第一步是利用光罩和縮影的辦法控制加工雷射脈衝在氣體內的空間強度分佈。例如圖一，要讓電漿的密度呈縱向週期性分佈，必須先以光罩調變橫向的加工雷射脈衝的空間強度分佈，再縮影投射到氣體中強場電漿元件的主驅動雷射脈衝行進的路徑上。在雷射強度高於原子游離閾值的區域，氣體將被游離成電漿，電漿被加熱後快速散逸，使得該處的電漿密度降低，而得到週期性的瞬態電漿結構。此方法一開始的發展是先使用的是化學蝕刻製造出來的機械光罩來達成調變加工脈衝的強度分佈。但機械光罩具有許多缺點：（一）製作不同結構的機械光罩相當費時與耗費成本；（二）更換不同結構的機械光罩相當費時。對於發展強場電漿元件的實驗而言，快速改變電漿密度分佈結構來找到各個特定作用的電漿元件的最佳條件是重要的關鍵。很明顯地，這兩項嚴重的缺點將導致金錢與時間成本的大量耗損。於是我們著手設計以液晶空間波形調變器來取代機械的光罩 [6]。這是利用電腦來編寫好我們想要的圖形，接著以電腦程式會將此圖形寫到液晶空間波形調變器上，從而達成調變加工脈衝強度的分佈。有了液晶空間波形調變器，我們便同時解決了這兩項重要的問題。藉由此技術我們達成了首次以電漿空間結構來進行三階相對論性諧波產生的準

相位匹配，大幅增強其能量轉換效率。

此發展不僅可在線上隨意變換結構，提昇進行研究的效率，同時也可將強場電漿元件的應用提升到了自動迴授最佳化的境界。近年來，自動迴授最佳化開始被用來研究愈來愈複雜的物理系統，例如複雜分子的量子同調控制的實驗。由於這樣的複雜系統的變數空間太過龐大，導致無法建立簡單模型來描述以及進一步的控制其輸出。Walmsley 在 2003 年發展一套自動迴授最佳化技術（如圖二），用來研究量子物理的複雜系統 [7]。這項技術主要是設計一組可控制的參數以及一個目標特性函數（例如最後產物的能量）。改變這組可控制的參數，就會得到不同的目標特性函數值。而自動迴授最佳化演算法就是用目標特性函數值來評估此時這組可控制的參數的有效程度，並提供迴授信號供進行下一組可控制的參數的設定。利用如圖二的自動迴授最佳化流程閉路迴圈系統，我們可以找到在既定實驗條件下達成目標特性函數最大值所需的控制參數。這種自動迴授最佳化流程的優點在於這種控制的過程並不需要事先假設一個模型，而是可以藉由最佳化的過程發掘此複雜系統的物理。在強場雷射與電漿交互作用的實驗裡，可以設定每一個液晶空間波形調變器裡的空間基本單位為控制變數，各種最後輸出產物的性能當成是目標特性函數，就可以利用自動迴授最佳化的技術來達成輸出產物的最佳電漿密度結構。此方法開闢出了電漿密度結構控制在大幅提昇如雷射電漿式電子加速器、X 光自由電子雷射、兆赫茲脈衝源、等強場電漿元件的輸出性能各種可能性。



圖一、光罩縮影與雷射加工系統。左下圖為機械光罩的照片。右下圖則是縱向主驅動雷射脈衝在此週期性電漿結構中傳播的側向散射影像，可由此看到電漿密度分佈。



圖二、自動迴授最佳化流程閉路迴圈系統。

參考資料：

[1] T. H. Maiman, Nature **187**, 493 (1960).
 [2] L. E. Hargrove *et al.*, J. Appl. Phys. **5**, 4 (1964).
 [3] D. Strickland and G. Mourou, Opt. Comm. **56**, 219 (1985).
 [4] H.-H. Chu *et al.*, Appl. Phys. B **79**, 193 (2004).
 [5] C.-H. Pai *et al.*, Phys. Plasmas **12**, 070707 (2005).
 [6] M.-W. Lin *et al.*, Phys. Plasmas, **13**, 110701 (2006).
 [7] I. Walmsley and H. Rabitz, Phys. Today **56**, 43 (2003).