

[研究成果報導]

電漿雷射放大器之發展

中央研究院原子與分子科學研究所 陳賜原 白植豪

一直以來，產生具有更高尖峰功率的光源是光物理學家所希望達成的一項重要目標。由於雷射光在時間與空間上都具有很高的同調性(coherence)，它是提供人們獲得強大瞬間光強度的理想光源。近年來，隨著使用啾頻脈衝放大技術(chirped pulse amplification)的脈衝雷射的發展，光物理學家憑藉著持續發展提升的雷射尖峰強度，不斷地在強場雷射物理領域開創出令人驚嘆的新物理研究與應用。例如，以高強度雷射脈衝來驅動產生的電漿波，其加速電場可達到每公分十億電子伏特等級，是傳統加速器的一千倍，因此以雷射驅動電漿波來加速電子被視為極具潛力的下一代電子加速器[1]，不僅對於加速器用於高能物理的研究帶來突破的希望，對於將高能加速器及其衍生光源與粒子源用於其他領域科學研究的拓展更是具有極大的潛力。另外，最近在美國勞倫斯利佛摩國家實驗室(Lawrence Livermore National Laboratory)也開始進行以五百兆瓦尖峰功率的高能雷射誘發核融合反應的實驗，希望以攝氏一億度的高溫（太陽中心溫度的十倍）點燃一公克的氫燃料，預期產生出可控制的「人工太陽」，這也是供給人類乾淨無污染的替代性能源的未來希望之一[2]。

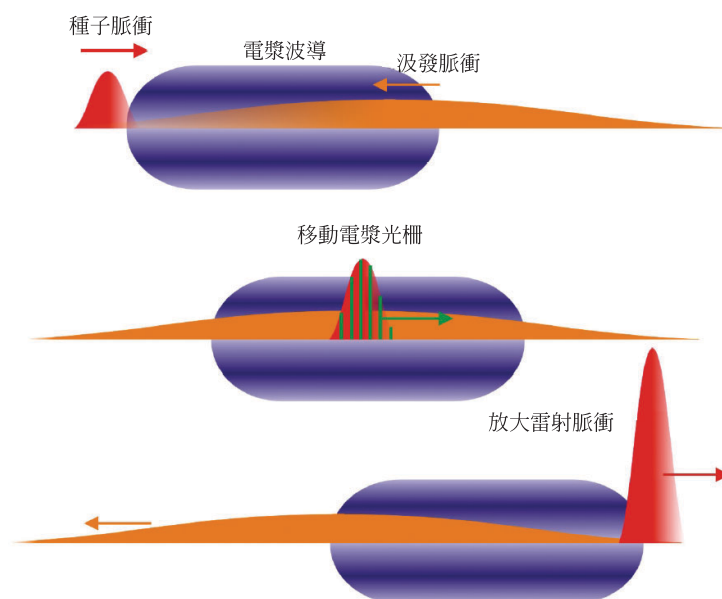
自從 1960 年雷射的誕生開始，這項追逐強大光源的夢想，在世界各地科學界與工程界努力下不斷推進。1960 年代，Q-switching [3]與鎖模技術(mode-locking) [4]的發明，使得雷射光的能量可以集中到短於 100 ps 時間尺度的脈衝裡。在早期的雷射放大器裡，雷射的強度被限制到 GW/cm^2 。超過這個強度，材料折射率的非線性變化將造成雷射光的波形(wave front)嚴重扭曲，引發自聚焦(self-focusing)而造成元件損壞。這個限制維持了將近 20 年。直到 1985 年，Strickland 和 Mourou 發明了啾頻脈衝放大技術，才使得這個強度限制得以打破並使得短脈衝雷射脈衝放大技術的發展突飛猛進[5]。到了

1990 年代中期，由於內建高階色散補償的寬頻鏡片問世，配合寬頻的雷射增益介質如摻鈦藍寶石晶體(Ti:sapphire)，使得雷射可以直接產生飛秒(10^{-15} 秒)等級的短雷射脈衝。目前，結合了飛秒等級的短脈衝雷射以及啾頻脈衝放大技術，在小型的實驗室裡已經可以產生時寬為數十飛秒、能量達數焦耳以上之雷射脈衝，其瞬間功率已經可以達到數十到一百兆瓦等級。而在國家等級的實驗室例如美國勞倫斯利佛摩國家實驗室，應用類似技術，雷射的瞬間功率更可以達到五百兆瓦等級以上的規格。

在啾頻脈衝放大技術裡，飛秒等級的短雷射脈衝先被在時間上拉長，經各級放大器放大，最後再以一對光柵組將脈衝時寬壓縮回到數十飛秒。而為了達到更高的峰值功率，啾頻脈衝放大器裡所使用的元件都需用到更大的面積以避免被強雷射光束打壞。例如，對於 PW (10^{15} W)等級的雷射，用來壓縮脈衝時寬的光柵達近 1 公尺的大小，如此大的光柵不僅難以製造且非常昂貴。也就是說，此類雷射放大器最終可以產生的強度都取決於雷射系統裡所使用到的光學元件的固態基質或鍍膜的損壞閾值(damage threshold)。

為了克服上述雷射放大器的規格障礙，以電漿為基質的新一代雷射電漿放大器在 1990 年代的末期被提出[6, 7]。相較於固態物質，電漿可以承受住高強度雷射而不被破壞的特性（畢竟電漿中的原子早已經被完全拆解，而不能被更進一步地打壞），同時又具有極寬廣的工作頻率範圍。而且電漿光學性質可以藉由改變電漿密度或雷射強度來控制，可調的範圍很大，且反應速度快，因此頗具優勢。這種電漿雷射放大器的放大原理是利用雷射光驅動電漿裡的電子進行後向拉曼放大(backward Raman amplification)來達成。

圖一顯示電漿雷射放大器的基本原理。首先，一道短時寬、較長波長的種子脈衝(seed laser pulse)與另一道長時寬、較短波長的汲發雷射脈

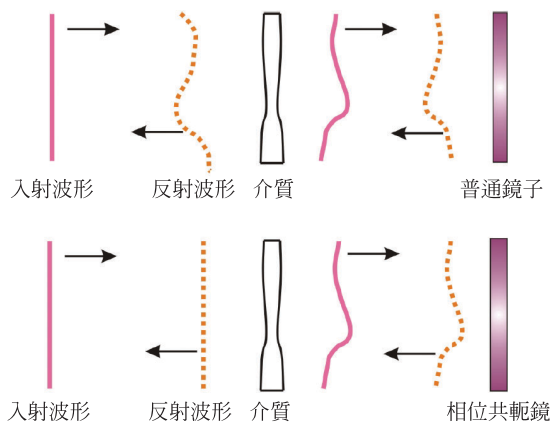


圖一 電漿雷射放大器的基本原理

衝(pump laser pulse)在電漿裡面進行對撞。由於兩道不同波長的雷射光束在重疊區域會形成的拍頻波(beat wave)，無論是靠光壓(ponderomotive force)直接驅動電漿裡面的電子移動[6]，或是靠共振激發的方式來激發電漿波(電漿的電子密度必須調整到使電漿波的波長和此拍頻波之週期一致)[7]，皆會造成瞬態移動電漿光柵(transient moving plasma grating)。此移動電漿光柵會透過布拉格反射原理(Bragg reflection)將汲發脈衝光反射疊加到種子脈衝上，藉此放大種子脈衝的能量。而根據都卜勒效應(Doppler effect)，這些被移動電漿光柵反射的光子會紅移(red shift)至與種子脈衝光子具有相同的頻率。利用此種拉曼後向散射(Raman back scattering)的方法，可以將汲發脈衝之能量轉換到種子脈衝上，因而是一種電漿雷射放大器。我們也可以透過能量守恆的概念來理解電漿雷射放大器：種子脈衝與較短波長的汲發脈衝在電漿裡面對撞時，在兩道雷射光束重疊區域裡的汲發脈衝的光量子藉由拉曼後向散射機制分裂成一顆種子脈衝的光量子與一顆電漿波量子(plasmon)，因此種子脈衝的光子數將持續增加(同時也將部分汲發脈衝的能量傳給電漿波)。理論上，電漿雷射放大器的能量轉換效率可以達到約百分之九十，遠高於傳統的雷射放大器以及啾頻脈衝放大技術。更吸引人的是，理論學家預期當電漿雷射放大器操作在非線性範疇

(nonlinear regime)時，放大的雷射脈衝的時寬也將是脈衝能量的倒數。因此，電漿雷射放大器可同時放大雷射能量與壓縮脈衝時寬，而兩者都將增強雷射脈衝的尖峰功率。

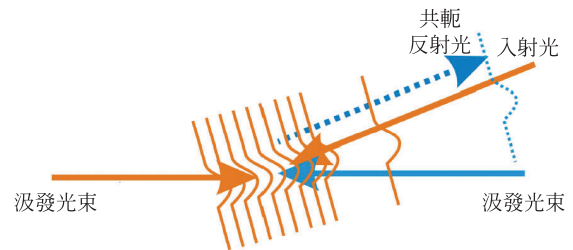
由於電漿雷射放大器的放大與壓縮過程均不需要使用到光學元件，而且放大器的本體是以電漿為基質，因此幾乎沒有被雷射光打壞的限制。因此，相較於啾頻脈衝放大技術，電漿雷射放大器是未來產生可以達到極高強度的超短雷射脈衝的一個極可能的解決方案。然而，為了能激發出較大振幅的移動電漿光柵以達到較高的雷射能量轉換效率，雷射光束必須聚焦到較小的截面積以獲得高雷射強度，而光的自然發散定律指出當雷射光焦點的橫截面越小時，其維持此強度的距離就越短，這使得高放大倍率與長增益長度兩者無法同時提昇。目前，這也是造成在電漿雷射放大器的發展上，放大倍率主要都受限於放大器的增益長度太短的原因。要克服這個問題，必須引入光波導的技術，使得雷射脈衝能夠在一個小橫截面的光波導中傳播，以能維持高強度傳播一段夠長的距離。過去，我們實驗室已經發展出很成熟的以光學方式產生電漿波導(plasma waveguide)的技術[8]。此電漿波導的製作方法是利用一道短時寬、低能量的雷射脈衝加上一道緊跟在其後的長時寬、高能量的雷射脈衝，一起被圓錐透鏡聚焦到氣體噴流中形成一個縱向線



圖二 相位共軛鏡與普通鏡子的比較

形的焦點。第一道脈衝具有足夠高的強度而可以在該線形區域游離氣體，產生自由電子，故稱為點火脈衝。第二道脈衝則可以有效加熱這些自由電子，因而可使電漿的電子溫度提高，並且經由電子撞擊離子來產生更多電子游離。之後，熱電子往徑向擴散，並拖著離子往外移動，造成中心的電漿密度下降，而周邊的電漿密度卻因為往外衝的高溫電子與中性原子碰撞，產生電子游離，故而升高。如此形成了一個中間電漿密度低、外圍電漿密度高的線狀電漿結構，形成了一條軸心折光率高、外圍折光率低的電漿光纖，可以導引雷射光維持高強度進行長距離傳播。藉此技術，我們成功地發展出了電漿波導式的後向拉曼雷射放大器。利用 9 毫米長的電漿波導，單趟能量放大倍率可高達 900 多倍[9]。

在一般強雷射脈衝放大器裡，光波在經過介質如增益晶體時會因熱效應及非線性效應造成雷射空間波形嚴重扭曲，使其難以聚焦也容易打壞光學元件。因而在固態雷射的技術中，已發展出使用相位共軛鏡(phase conjugate mirror)來進行相位補償[10]。在電漿雷射放大器裡，同樣的效應也會造成雷射空間波形嚴重扭曲，因此也需要發展同樣的技術來解決此一問題，而且必須是以電漿為基質來達成才能避免損壞閾值的限制。圖二為比較普通的反射鏡片與相位共軛鏡的差異。當光經過不均勻介質時，由於各點雷射線行經不同厚度（或不同折光率）的介質，造成穿透光波形的扭曲。經普通鏡子反射後，逆向再經過此同一介質，會有第二次的相同量且符號相同的波形扭曲，此扭曲與原本的波形扭曲相加，造



圖三 在電漿中進行簡併四波混合的原理

成了兩倍量的波形扭曲。當使用相位共軛鏡取代原先的普通鏡子時，由於反射光是入射光的共軛光(conjugate wave)，反射光的空間相位分布是入射光的相反值（正負號反轉），將使得此光束在第二次經過介質時，新增的波形扭曲會與原本的波形扭曲互相抵銷。這就是相位共軛鏡用來補償波形扭曲的原理。在固態雷射中，一般是利用雷射光在非線性介質裡以簡併四波混合(degenerate four-wave mixing)的方法製作產生相位共軛鏡。類似於固態雷射，在電漿雷射放大器裡我們可以利用簡併四波混合的方法產生相位共軛鏡，藉此解決未來電漿雷射放大器的波形扭曲問題。過去在電漿中進行的簡併四波混合的實驗都是在紅外光與微波波段，近來我們已成功達成近紅外光波段（一般電漿雷射放大器的波段）的電漿簡併四波混合實驗（如圖三）[11]。在簡併四波混合實驗中，兩道對撞的汲發光束與一道入射雷射光束（三者具相同波長）在電漿裡面進行交互作用，產生一道與入射光相反方向傳播、具有與入射光相位共軛的波前的反射光。這是藉由入射光與前向汲發光束（灰色表示）形成駐波來產生電漿光柵，此電漿光柵會將後向汲發光束（黑色表示）反射到入射光來的方向，產生了一道入射光的共軛光。同樣的共軛光束也可同時來自入射光與後向汲發光束形成駐波來產生電漿光柵而將前向汲發光束反射而產生。

相較於固態物質，被稱為物質第四態的電漿具有不會被雷射打壞的優勢，又能以雷射光直接控制電漿的光學性質，並且具有極寬廣的工作頻率範圍，是未來發展許多強場雷射物理及應用的理想介質。而我們實驗室成功首次達成在電漿波導中的雷射脈衝後向拉曼放大器，並且在電漿中首次達成近紅外光波段的簡併四波混合，兩者是通往建造以電漿為基質的極高能雷射脈衝放大

與壓縮器的兩個關鍵技術，將可加速推動雷射電漿放大器的發展及強場雷射物理的更多應用。

參考資料

- [1] T. Tajima and J. M. Dawson, *Phys. Rev. Lett.*, **43**, 267 (1979).
- [2] C. A. Haynam *et al.*, *Appl. Opt.*, **46**, 3276 (2007).
- [3] R. W. Hellwarth, Ed., *Advances in Quantum Electronics*, Columbia University Press, New York (1961).
- [4] L. E. Hargrove *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **5**, 4 (1964).
- [5] D. Strickland and G. Mourou, *Opt. Comm.*, **56**, 219 (1985).
- [6] G. Shvets *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **81**, 4879 (1998).
- [7] V. M. Malkin, G. Shvets and N. J. Fisch, *Phys. Rev. Lett.*, **82**, 4448 (1999).
- [8] Y.-F. Xiao *et al.*, *Phys. Plasmas*, **11**, L21 (2004).
- [9] C.-H. Pai *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **101**, 065005 (2008).
- [10] G. S. He, *Prog. Quantum Electron.*, **26**, 131 (2002).
- [11] K.-H. Lee *et al.*, *Phys. Rev. E*, **75**, 036403 (2007).