

X 光雷射簡介

林俊元
中央研究院物理所

一、前言

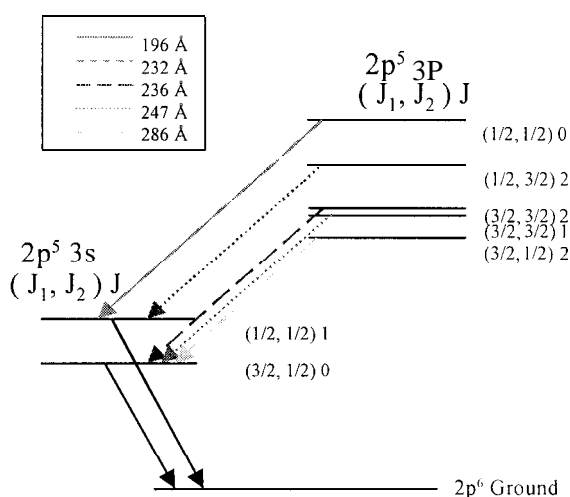
近年來由於同步輻射光源的發明和各項光學元件及技術的快速發展，人們對於使用近紫外光及 X 光做為應用的工具有逐漸增加的趨勢。短波長的光源因為所遭受之繞射現象較小，因此在理論上能比一般可見光及紫外光被聚焦至更小面積。這種能將光束聚焦至一微小區域之特性，不僅對於掃描式之光電子能譜顯微術和生物顯微術有所助益外，對於以 X 光刻蝕製作微小精密之結構及積體電路更有莫大的潛力。另外，舉凡表面科學、材料科學、生命科學、物理、化學等均可利用高強度的 X 光光源做各種不同之應用。然而相對於同步輻射這種大型之光源，發展另一種較便宜、體積小、短波長、和高強度的 X 光光源可說是一般中小型實驗室迫切需要的輔助工具。

二、X 光波段的雷射

X 光雷射顧名思義就是一輸出在 X 光波段^[1]的雷射。一般雷射最主要的物理特徵就是其所使用之增益物質及共振腔之操作模式。自從雷射於 1960 年代被發明後，科學家們便期望雷射的操作能延伸至 X 光波段。然而早期要產生一個在 X 光波段的雷射是非常艱難的。除了在此波段內大多數物質對

於 X 光的反射率均不大，無法形成有效率之共振腔外。雷射的增益系數亦隨著波長的減小有迅速降低之趨勢，而所需要的激發能量亦迅速增加。此外要在增益物質中產生放大這種高能量的光子所需要的反向分佈(population inversion)，激態的生命週期在於參與反向分佈之內層能階均在飛秒(10^{-15} sec.)量級。這使得雷射行為會自行中斷。但近來，人們逐漸了解，只要位於反向分佈中，下層能階的電子能迅速遷移至基態，則 X 光波段的雷射可以用類連續波的模式在高離化原子的外層能階產生。

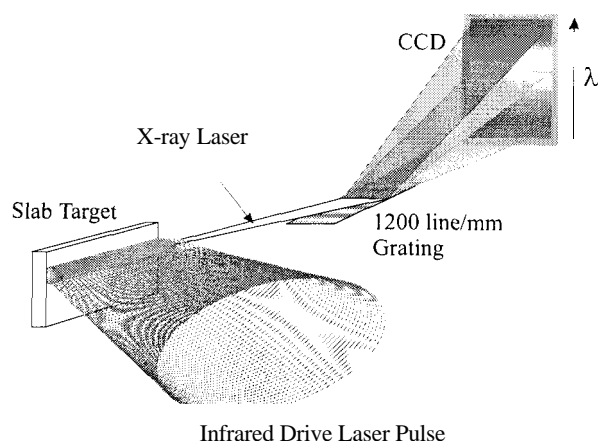
目前在實驗室中所研發的 X 光雷射所使用之增益物質多為類氖(Ne-like)或類鎳(Ni-like)離子。



圖一：類氖的銻離子之簡化能階。

舉例來說，當中性銻原子被游離掉最外層的二十二個電子後，因其所具有之束縛電子數與氬相同，故可稱為類氬的銻。在此離化態時，位於基態 2P 的束縛電子可經由離子與電漿中自由電子碰撞而得到能量躍升至上層激態 3P。由於 3P 至 2P 之間的遷移是不允許的(dipole forbidden)，因此反向分佈便可在 3P 與 3S 之間形成，進而產生 X 光雷射(見圖一)。選擇類氬或類銻離子，乃是因為其外層電子於基態時恰好填滿所在之能階，故具較高之游離能。這使得當外加能量而形成電漿時，不容易發生過度游離化的現象，而能產生最多的類氬或類銻離子以做為增益物質之用。

大多數的實驗室目前均以高能量紅外光脈衝雷射於真空中線聚焦(line focus)在氣體或固體靶上來產生這些高離化態的電漿(見圖二)。一般來說，線聚焦的長度介於數個毫米至數個厘米之間，寬度則介於數十個微米至二百個微米之間，而線聚焦之光強度則高達數個 10^{13} W/cm^2 。這樣聚焦的激發雷射可產生高的長寬比值(~ 100)的柱狀形電漿，並在電漿中適當之電子溫度及密度區域，形成一平行靶面之長柱狀增益區(寬約數十微米)。此柱狀增益區對位於起始端的光子而言，其功用就如同一般光學柱狀放大器。因此當一自發光子從軸向通過增益區放大後和一光子直接從側面逃逸的光強度，其比值可高達百萬以上。這使得 X 光雷射輸出被控制在單一軸向。目前 X 光雷射均以無共振腔的單一方向放大或以加入一多層膜反射鏡的二次放大模式操作。這是由於缺乏高效率半透明的輸出鏡以形成高



圖二：X 光雷射的產生與測量。

效率之共振腔。因此高增益係數和適當長度的增益物質，是發展高效率飽和 X 光雷射的兩大條件。

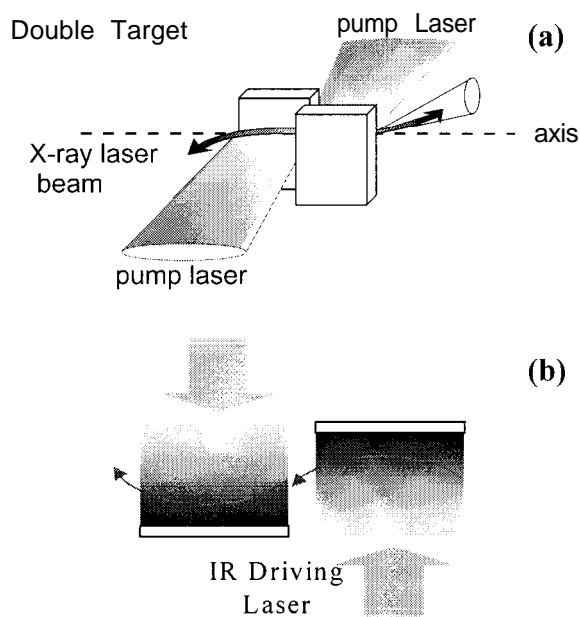
1984 年，美國 Lawrence Livermore 實驗室首先以一千焦耳的 0.45 奈秒脈衝激發硒薄膜，產生世界上第一個 X 光雷射[2]。在這實驗中，所量測到的兩條類氬硒的 X 光雷射光譜線：206 Å 和 209 Å 的增益係數均不到 6 cm^{-1} 。其增益係數與增益物質長度的乘積 GL 只達到約 6.5。這個數值遠遠低於達到飽和雷射輸出所需要的 GL 值 ≥ 15 。這種非飽和的 X 光雷射輸出，除了無法滿足一些需要高強度 X 光的應用外，處於小訊號放大區的 X 光雷射更會因為激發雷射能量的小幅振盪，而使得 X 光雷射的能量輸出呈現指數的大幅改變，無法應用於需要固定光源能量的實驗。在後續幾年的實驗中，雖然 X 光雷射的輸出波長成功地向下推展至 35.6 Å，但由於過低的增益係數使得 X 光雷射一直無法操作在飽和區。並且這些結果需要用全世界最大之雷射做為激發工具才能達成。

造成 X 光雷射的效率一直無法改善的原因，第一是因為激發雷射的能量無法被固體靶有效的吸收，以製造高溫的電漿和充裕的類氬或類鎳離子。電漿中自由電子溫度不高，使得與離子的碰撞率低，進而造成低增益係數。不充裕的類氬或類鎳離子則使得增益區之體積更為狹小，減少光束放大之機會。第二，在雷射激發的電漿中，自由電子的密度隨著垂直遠離靶面的方向，呈現約指數衰減的趨勢。由於這種陡峭的電子密度分佈所造成的密度梯度迫使在電漿中行進的光子感受到垂直於靶面之折射率梯度的存在。進而使光子朝偏離靶面的方向行進。當增益區中的折射效應甚大時，原本在增益區中進行放大的光束則可能偏離增益區而停止放大和被吸收。如此便縮短了有效增益區的長度，降低雷射的輸出與效率。

為了解決上述之問題，90 年代初期，Lewis 等人^[3]題出以雙靶耦合方式來增加有效增益區的長度。如圖三所示，雙靶耦合方式是利用兩個反向對立之靶於適當的相對位置以產生反向的電子密度梯度。這使得偏離增益區的光束，能被折回進入另一靶的增益區，繼續被放大。如此即可大大增加有效增益區的長度。至於低增益係數及激發雷射能量吸收效率的問題，則在稍後以利用雙脈衝(約 100 皮秒)激發方式得到解決。

當主脈衝入射於固體靶前，若我們在適當時間前加一預脈衝(predpulse)，則預脈衝與固體靶作用所產生之電漿，在主脈衝到達前，會向外膨脹而降低溫度。此一低溫、低密度、大體積之電漿比固體靶

更能有效的吸收主脈衝的能量^[4]。因此當主脈衝入射後，便可形成一溫度高、體積大的電漿。這使得增益區內的折射效應減小，增益係數提高，並使增益區之寬度增大。結合最佳化雙脈衝激發^[5]與雙靶耦合方式，飽和輸出的 X 光雷射已成功地一些類氬及類鎳離子中產生，輸出的波長更短至 58 Å^[6,7]。由於能量轉換效率的改善，使得產生飽和 X 光雷射所需的激發雷射能量少於 100 焦耳。因此 X 光雷射的發展從此不再限制於超大型雷射機構。



圖三：雙靶耦合配置。

三、X 光雷射的特質

X 光雷射除了具有比一般光源短的波長外，更具有一般雷射高強度、窄譜線寬、相干性好、準直性佳等特性。目前飽和輸出的類鎳 X 光雷射特性

X 光雷射靶材	銀	銅	錫	鈔
波長(Å)	140	126	120	73
激發雷射光強度(W/cm ²)	2× 10 ¹³	2× 10 ¹³	2× 10 ¹³	4× 10 ¹³
激發雷射脈衝長度(ps)	75	75	75	75
X 光雷射功率(MW)	1.7	3.0	7.0	6.3
X 光雷射脈衝長度(ps)	53	50	50	49
X 光雷射發散角(mrad)	2.8	2.2	1.3	1.0
X 光雷射出口孔徑(μm)	~50× 50	~50× 50	~50× 50	~50× 50
增益係數(cm ⁻¹)	8.0	8.0	12.5	9.5

表一：飽和類鐳 X 光雷射的特性^[8]。

請參考表一。一般而言，飽和 X 光雷射的輸出功率約數百萬瓦。由於其超短的脈衝長度、小口徑、小發角，使得 X 光雷射單一脈衝在特定線寬的亮度高達 $10^{36} \text{ photons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \Delta \nu / \nu = 10^{-4}$ 。此亮度不僅遠超過一般 X 光光源的輸出外，也比同部輻射同波段輸出之亮度高出約十個數量級。因此特別適用於有高強度及相干性需求的應用。另外，X 光雷射的輸出脈衝長度，可隨著激發雷射脈衝長度的縮短而縮短。因此超快飛秒級的時間解析度，可藉由高功率的飛秒激發雷射達成。

四、桌上型 X 光雷射？

在以雙脈衝激發 X 光雷射的實驗中，我們發現預脈衝的功用主要是從固體靶產生適當體積、適當溫度之電漿以供主脈衝加熱至高溫以產生高增益之放大區。故使用高強度、短脈衝長度之主脈衝，除了可在瞬間將自由電子加熱至高溫，更因為激發能量於很短時間供予，使能量不容易傳遞至離子，形成增益區內瞬間電子溫度高、離子溫度低的高增益係數條件。實驗結果證明^[9]，使用 3 皮秒(10^{-12} sec.)

的短脈衝取代原來使用的 75 皮秒脈衝，類鐳錫 X 光雷射的增益係數從原先的 12.5 cm^{-1} 提升至 42 cm^{-1} 。X 光雷射的脈衝長度也從原先的 50 皮秒縮短至 3 皮秒。最重要的是驅動飽和輸出 X 光雷射的激發能量，從原先所需的 100 焦耳降低至 10 焦耳以下。漸漸接近桌上型雷射所能負荷之輸出能量。

近年來由於超短飛秒脈衝雷射的發展相當迅速，無論在脈衝的產生、放大、測量，以及任意波形的合成技術都已日漸成熟。這使得輸出短於 100 飛秒，能量達 1 焦耳的高頻超短脈衝雷射系統成為可能。根據電腦模擬數據顯示，以 0.2 焦耳、100 飛秒的超短脈衝，可激發增益係數高達 200 cm^{-1} 、波長短於 100 Å、脈衝長度數百飛秒、操作頻率 10Hz 的飽和類鐳 X 光雷射。此外，短於 100 飛秒的超短激發脈衝，由於其時間度量相同於或短於一些內層激發態的生命期。使其有潛力用於形成內層能階的瞬間反向分佈。如此便可將雷射波長推至硬 X 光波段並提升量子效率、降低所需激發能量。這些結果證明，超高功率的超短脈衝雷射系統為未來桌

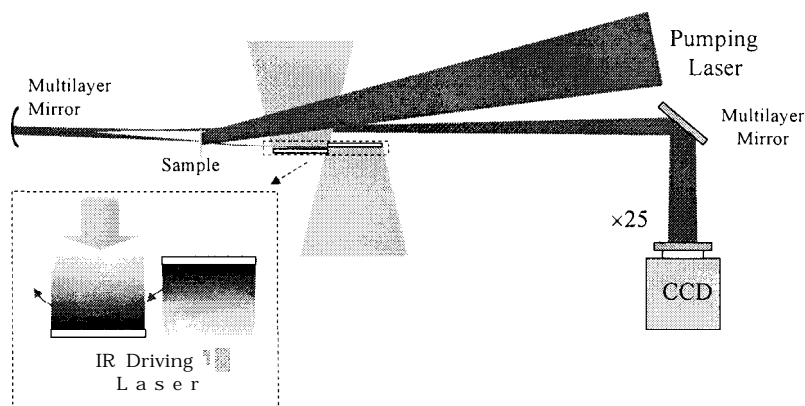
上型 X 光雷射最佳的激發光源。

五、X 光雷射的應用

X 光雷射除了可適用於其他 X 光光源的應用外，其亮度高、脈衝短，使其特別適合從事需高穿透率、高時間解析度的 X 射線照相術。而良好的相干性，則使其適合從事高時間解析度的活體生物全像圖。舉例來說，在雷射核融合實驗中，裝有核融合燃料的膠囊形靶，瞬間受到高能雷射從四面八方同時均勻的聚焦在靶上。由於靶表面爆發產生之熱物質向內壓縮，使融合燃料達到其密度為二十倍固體密度、溫度接近一億度的條件。進而產生核融合反應，釋放出多於輸入之能量。因此可視為新一代能源的來源。然而，若趨動雷射光束中所含強度不均勻的光斑，其不均勻度超過一臨介值，則雷射聚焦於靶面時會產生超高強度之熱點。這些熱點會在適當溫度和壓力形成之前，提前點燃融合燃料，造成核融合反應失敗。因此研究各種使驅動雷射強度分佈均勻的方法，已是雷射核融合研究中最重要的一課題之一。

由於高亮度 X 光雷射的出現，使得於實驗上實際觀察經由驅動雷射聚焦於靶面所產生數微米厚、數倍至數十倍固體密度的電漿成為可能^[10]。這種搭配 X 光雷射與多層膜聚焦與反射鏡的 X 光雷射照相術(見圖四)，已成功的應用於量測各種使雷射強度分佈均勻的方法。配合 X 光雷射的高時間解析度，高密度電漿中各項隨時間變化的流體動力學不穩定(hydrodynamic instability)參數，也可因而測出^[11]。

另外介於氧的 L 吸收能譜線緣(~44 Å)與碳的 L 吸收能譜線緣(~23 Å)之間波段的 X 光雷射，由於其對於水及薄層空氣的高穿透力與容易被碳所吸收的高對比性，使其特別適用於成像含豐富蛋白質(碳量)的活體生物細胞。而不再受限於一般 X 光生物顯微術以乾燥、染色、或切片後的樣品來做為成像的對象。若再加上 X 光雷射的高時間解析度，則可實現觀察於細胞分裂時，細胞骨架的形態變化與重組。並且由於樣品曝光時間短，可避免成像時因樣品的移動或擺動，使圖像模糊。而 X 光雷射長於 100 微米的相干長度，使得大至數十微米的活體



圖四：X 光雷射照相術實驗設置圖。

生物細胞全像圖得以藉 X 光雷射全像術達成。這將使得時間解析的三度空間活體細胞影像呈現於人們眼前。另外以 X 光雷射干涉術來測高密度氣體或電漿等物質之密度分佈，或以其高階繞涉條紋來製作高解析度的光柵等，均為其重要應用項目之一。

六、結論

X 光雷射的輸出亮度比其他目前所知最強的光光源高出數個至十個數量級。因此特別適用於有高光譜強度及相干性需求的應用。然而 X 光雷射雖已處於應用之階段，但就其物理尺寸、操作頻率、能量轉換效率、輸出波長、相干長度、波長可調性等特性，均有進一步改進的必要與空間。未來透過以高功率的超短飛秒脈衝雷射系統為 X 光雷射的激發光源，除了能改善能量轉換效率、縮短輸出波長外，更可實現高操作頻率的桌上型 X 光雷射的目標。此外，高強度 X 光雷射束與可調波長的可見光雷射於特定氣體中作用，則可藉由非線性光子加減作用，形成可調性波長輸出之 X 光雷射。

相信由於桌上型 X 光雷射的發展，必能提供中小型實驗室另一種 X 光源的選擇。進而吸引更多從事 X 光研究的人才，開啓更多有趣之應用。

參考資料：

- [1] 目前所研究的 X 光雷射輸出波長均在軟 X 光波段 ($2 \text{ \AA} \sim \text{few } 100 \text{ \AA}$)。
- [2] D.L. Matthews, P.L. Hagelstein, M.D. Rosen, M.J. Eckart, N.M. Ceglio, A.U. Hazi, H. Medeck, B.J. MacGowan, J.E. Trebes, B.L. Whitten, E.M. Campbell, C.W. Hatcher, A.M. Hawryluk, R.L. Kauffman, L.D. Pleasance, G. Rambach, J.H. Scofield, G. Stone, and T.A. Weaver, *Phys. Rev. Lett.* **54**, 110 (1985).
- [3] C.L.S. Lewis, D. Neely, D.M. O'Neil, J.O. Uhmohibhi, M.H. Key, Y. Al Hadithi, G.J. Tallents and S.A. Ramsden, *Opt. Comm.* **91**, 71 (1992).
- [4] J.Y. Lin, G.J. Tallents, A. Demir, S.B. Healy, and G.J. Pert, *J. Applied Phys.* **83**, 1863 (1998).
- [5] 根據電腦模擬數據，在 X 光雷射的實驗中，主脈衝的能量在單一脈衝激發方式中，約有 30% 的能量被吸收應用。但在雙脈衝激發方式中，主脈衝能量的應用效率可高達 90%。
- [6] J. Zhang A.G. MacPhee, J. Lin, E. Wolfrum, R. Smith, C. Danson, M.H. Key, C.L.S. Lewis, D. Neely, J. Nilsen, G.J. Pert, G.J. Tallents, and J.S. Wark. *Science* **276**, 1097 (1997).
- [7] R. Smith, G.J. Tallents, J. Zhang, G. Eker, S. McCabe, G.J. Pert, and E. Wolfrum, *Phys. Rev. A*, **59**, R47 (1999).
- [8] J.Y. Lin, G.J. Tallents, J. Zhang, C.L.S. Lewis, A.G. MacPhee, R.M.N. O'Rourke, D. Neely, J. Nilsen, R. Smith, and E. Wolfrum. *Opt. Comm.* **158**, 55 (1998).
- [9] J.Y. Lin, G.J. Tallents, A.G. MacPhee, A. Demir, C.L.S. Lewis, R.M.N. O'Rourke, G.J. Pert, D. Ros, and P. Zeitoun, 'Demonstration of travelling wave CPA pulse pumping for collisional excitation x-ray lasers', to be published.
- [10] D.H. Kalantar, M.H. Key, L.B. Da Silva, S.G. Glendinning, B.A. Remington, F. Weber, S.V. Weber, E. Wolfrum, N.S. Kim, D. Neely, J. Zhang, J.S. Wark, A. Demir, J. Lin, R. Smith, G. J. Tallents, C.L.S. Lewis, A. MacPhee, J. Warwick, and J.P. Knauer, *Phys. Plasmas* **4**, 1985 (1997).
- [11] E. Wolfrum, J.S. Wark, J. Zhang, D.H. Kalantar, M.H. Key, B.A. Remington, S.V. Weber, S. Rose, J. Warwick, A. MacPhee, C.L.S. Lewis, A. Demir, J. Lin, R. Smith, and G. J. Tallents, *Phys. Plasmas* **5**, 227 (1998).