

雷射簡介

蘇賢錫

國立臺灣師範大學物理系

雷射 (laser) 是 light amplification by stimulated emission of radiation (由輻射的受激發射而將光線予以放大) 的字頭語。雷射在 1950 年代後期首次被引進，現在其發展與應用已經擴及雷射融合、雷射化學、軍事應用、污染控制、資訊處理、醫學應用、光學通訊、材料處理、立體攝影、以及電光裝置。本文將簡單介紹雷射光的性質與其一部分應用。

一、原子的輻射

量子力學規範原子系統中的電子分別處於特別的、分立的能量狀態。以氫為例 (參閱圖 1)，孤立的電子可以處於 -13.6 或 -3.4 eV (電子伏特) 的能量狀態，卻不能處於其他介乎中間的 -10 或 -8 eV 等能量狀態。此外，由一個狀態躍遷到另外一個狀態時，必須牽涉到光子：由較高狀態轉移到較低狀態時要發射光子；由較低狀態轉移到較高狀態時要吸收光子 (由外在能源來供應)。光子的能量等於這兩個量子狀態的能量差。應該注意的是，狀態之間的躍遷所需的能量，也可以來自該原子與其他原子的碰撞或放電時所釋放的電子。

原子的運動可用量子力學的方法來描述，其證據可以從原子或分子被激發時所發射的光子之光譜看出來。原子所放出的光可用稜鏡來彌散而加以分析。來自純粹孤立原子的光譜，不像來自高溫固體的寬闊連續彩虹光譜，而是由一些特定的分立頻率所組成，每一頻率相當於量子狀態之間的一種躍遷。

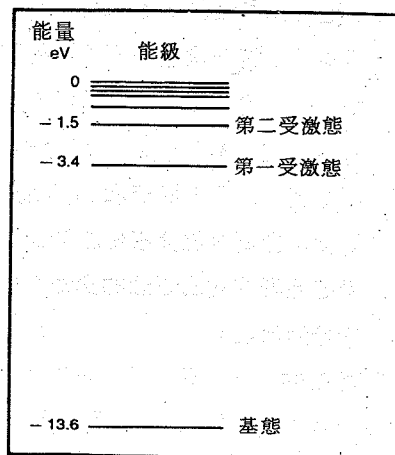


圖 1

二、雷射光的產生

上面已經提到兩種過程：光子的吸收，導致電子從較低能量狀態移到較高能量狀態；其相反過程，光子的自發發射，導致電子從較高狀態移到較低狀態。第三種過程是受激發射，也是很重要的過程。

假設原子處於受激態。通常在一段很短時間之後（ $10^{-8} \sim 10^{-7}$ 秒），原子會回到基態，自發發射一個能量為 E_0 的光子，而 E_0 等於兩個狀態之間的能量差。然而，利用外來的光子撞擊原子，引起人工刺激，也可以發生同樣的發射。假如這個光子的能量正好等於 E_0 ，它將使受激態的原子回至基態；這時所放出的光子，其能量也等於 E_0 ，而其相位完全相同於引發該項發射過程的光子之相位。這兩個光子將並肩出現，朝同一方向前進，如圖 2 所示。

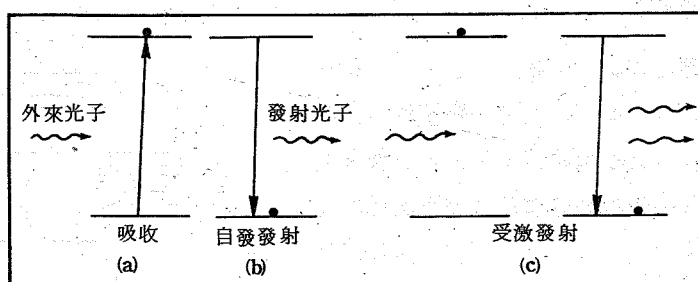


圖 2

這些光子能夠撞擊更多的原子，因而釋放出更多的光子。利用雷射兩端的鏡子，這些級聯光子在介質中反覆再三地反射。經過幾次反射以後，沿著雷射共振腔主軸運動的光子（其波長等於兩鏡間距離的數分之一）變成強大光束，而波長不對的光子或不沿著主軸運動的光子對級聯過程毫無貢獻。光束的一部分不斷地穿透末端部分鍍銀的鏡子而洩漏出去，如圖 3 所示。典型的實驗室示範用雷射可使入射光的 1% 穿透出去。

雷射主要包括三部分。第一部分是激活媒質（active medium），可能是氣體、液體或固體。它可以採取固態棒的形狀（第一具雷射是紅寶石晶體做成的），或裝有原子或分子氣體的容器，或是半導體二極管。良好的媒質具備有利的能級結構；量子狀態的間隔必須相當於雷射光的能量，而且受激態的壽命必須夠長（ 10^{-6} 秒）。

假如媒質中的大多數原子在基態（這是最常見的情況），則不能發生雷射動作；受激態的原子不夠多，不能發生受激發射過程。在此情形之下，已經在受激態的少數原子將隨便發生自發發射而回來基態。首先必須建立粒子數反轉（population inversion），使大多數原子處於較高的能級。粒子數反轉可由外在能源來完成，而這外在能源是任何雷射系統的第二主要部分。雷射的第三部分是光共振腔，其範圍由末端鏡子來設限。共振腔的長度依照駐波標準來選擇輸出波長。此外，二鏡可將光束聚焦在媒質上。能源往往把原子提升到許多受激態。為了順利完成反轉過程，利用輻射或碰撞的方式，這些原子必須先停在介於原受激態與基態之間的單一亞穩狀態（metastable state），其壽命必須

較激發過程的時間為長。只有這樣，才有足夠的原子可以參加具體的雷射動作，外在能源包括強力閃光燈、放電管、化學反應、甚至其他的雷射等。典型的雷射裝備如圖 4 所示。

一般而言，必須慎重選擇激活媒質與能源，以便配合許多規格。輸出功率、電力消耗、脈衝循環的時間與頻率、波長、光束大小、體積大小、以及耐久性都是雷射設計上的一些因素。

三、雷射的特性

藉助於外在能源而達成粒子數反轉之後，只要一個原子自發衰變到基態，就可以引起一級聯的受激發射。光在雷射共振腔內來回幾次以後，只有沿著雷射主軸運動的光（其波長的整數倍等於二鏡之間的距離），穿透一端出現成為雷射光。這光的特性是什麼？

第一，雷射光是單一波長的（monochromatic）光。受激發射過程本身所依據的事實是，引起受激發射的光子之能量與發射過程中所放出的光子之能量，完全相同。沒有經過主要躍遷而放出的光子，不在雷射光中。所有出現的光，幾乎都擁有單一波長。光譜的差額在一百萬分之一，這是代表性的數值，其差額甚至可以小到 10^{11} 分之一。在光譜學上與需要正確能量的光來做研究時，這種特性非常重要。通常的光源產生出來的光，具有許多不同的波長，如圖 5 所示。

第二，雷射光的強度很大。雷射光不像白熾光等普通光源（原子自發發射而回來基態時隨便放出光線），由受激發射而產生的光迅速出現，並且集中出現（實質上是單一的龐大電磁擾動）。需要在極短時間內向小目標提供大量能量時（例如雷射融合，其瞬時功率可達 10^{13} 瓦特），雷射光的強力性質非常重要。

第三，雷射是定向的。不沿著主軸方向運動的光子，不能構成雷射光。朝同一方向運動的波所組成的最後光束非常狹窄，如圖 6 所示。在許多應用中，例如測量、通訊、積體電路的製作，雷射融合時，這種特性極其重要。

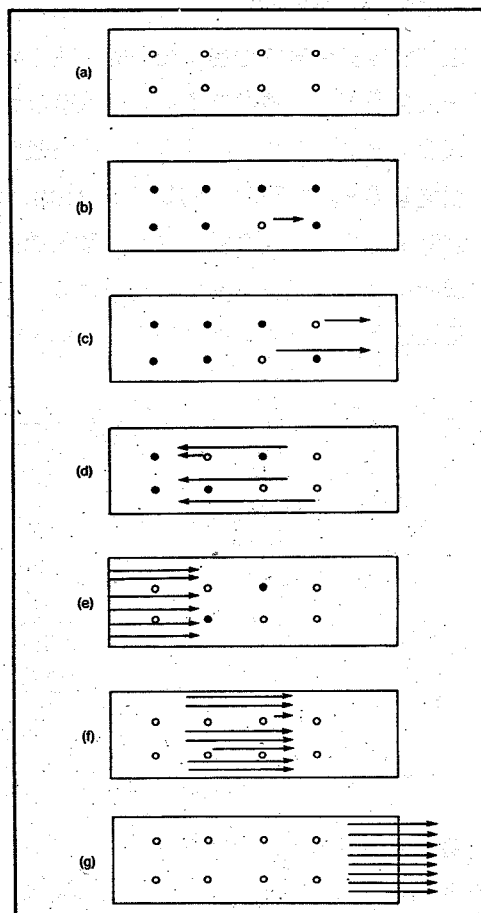


圖 3

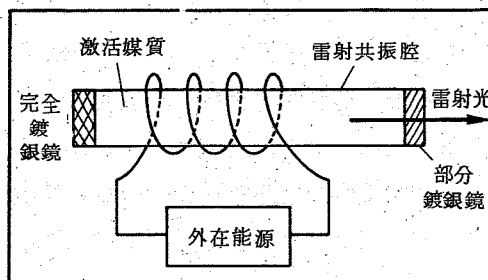


圖 4

第四，雷射光的最重要特性是其相干性 (coherency)。爲了說明相干性，必須涉及光的波動性。如果在任何時間任何位置的波之相位與振幅可以根據稍早的已知數值來計算，則這輻射稱爲在時間上與位置上相干的。換言之，假如就空間的某一位置而言，連續而來的波是同相（同步）抵達，則這輻射是空間上相干的，假如波列的波長和方向都相同，則這輻射是時間上相干的。

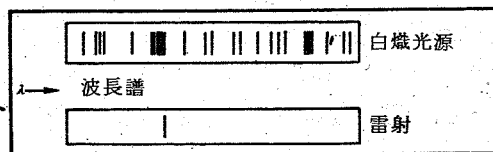


圖 5

雷射的共同發現人之一蕭洛 (Arthur Schawlow) 提出一個有用的類比。丟進水池的一個石頭是水波的相干波源。等間隔的同心波這種有規則的性質，可令人預卜稍後的時間或地點的水面。將一把石頭隨隨便丟進水池，代表非相干波源。稍後的時間之水面是許多未經協調的波前之干擾而不能預卜。

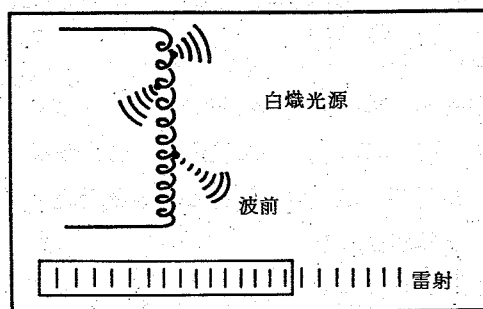


圖 6

同理，白熾燈是光波的非相干波源，受激原子隨時隨隨便放出光線。來自這些個別光源的光波，互相沒有關聯。反之，雷射光是相干的；其波前隨時隨地的變化情形可以預卜。

雖然雷射光包括很多光子（光的粒子形態），卻也可以當單一的龐大電磁波動來看，這波動激發發射光子，並且把光子組合成爲相干的同步整體，利用干涉儀的方法，我們可以限定這種具有相干性的波動之時間與空間的範圍。普通光的相干時間大約等於 10^{-9} 秒。用光速去乘相干時間，我們可以限定等效光子的「大小」，其數值等於 1 呎左右。就雷射光而言，典型的相干時間是數毫秒或更長，而其等效大小是幾百公里。相較之下，波長更長的相干輻射，例如無線電波，其相干時間可能等於幾小時，而所對應的等效大小大約幾百萬哩。

四、雷射的種類

(A) 固態雷射

固態雷射的激活媒質是晶體或一片玻璃，往往採用棒狀，有史以來的第一具雷射是用紅寶石製造的。這種雷射光來自於嵌在氧化鋁晶體內的鉻原子。紅寶石雷射光的主要波長是 $6934\text{\AA}$ ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$)。其他的固態雷射包括 Nd:YAG (鉍：鉕 - 鋁 - 柎榴石) 雷射，其主要用途在於沿著光學纖維發送訊號（其波長爲 $1.06\mu\text{m} = 1.06 \times 10^{-6}\text{m}$ ，屬於紅外光）；鉍 - 玻璃雷射，其重要用途在於雷射引起的核融合；以及紫翠玉 ($\text{BeAl}_2\text{O}_4 : \text{Cr}^{3+}$) 雷射，紫翠玉的性質類似於紅寶石，主要用途在於矽的退火 (annealing)。

(B) CO_2 雷射

分子雷射，尤其是使用二氧化碳 (CO_2) 的雷射，是最有力而且有效的。像二氧化碳這種分子的能級結構比氫原子複雜得多。除了通常的電子狀態以外，另外還有支級 (sublevel)，相當於分子中原子的許多轉動與振動方式。圖 7 表示 CO_2 雷射的兩條主要發射譜線 (分別為 9.6 與 $10.6\mu\text{m}$) 的能級結構。

CO_2 雷射以連續方式運轉時的功率超過 200kW ($= 2 \times 10^5$ 瓦特)。洛塞勒摩斯 (Los Alamos) 的太陽神 (Helios) 雷射融合裝置使用 CO_2 雷射，以脈衝方式運轉。它產生 10kJ ($= 10^4$ 焦耳) 脈衝，每一脈衝持續 10^{-9} 秒而瞬時功率為 10^{13} 瓦特。運轉效率 (輸入電功率轉變成為有用雷射功率的百分比) 超過 10% 。由於功率很高， CO_2 雷射用在許多軍事上、外科手術上以及工業上的各種過程。

(C) 金屬蒸氣雷射

金屬蒸氣雷射使用氣體的混合物，例如氦與鎘等蒸發金屬。He Cd (氦 - 鎘) 雷射的主要波長是 325.0 與 441.6nm ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$)。

來自放電 (在充氣管的兩個電極之間流動的電流) 的能量激發氣體原子，然後氣體原子與金屬蒸氣原子發生碰撞而傳遞能量。這種雷射可以產生波長在紅外光到紫外光範圍的雷射光。

(D) 半導體雷射

半導體的導電能力介於金屬與絕緣體之間。在半導體晶體格子內，所允許存在的電子能級，實際上分成一些寬闊的能帶。最高的價電子帶 (valence band，在此帶內，電子佔滿所有被允許的能級) 與最低的導電帶 (conduction band，電子在此帶中可以自由漫遊) 之間的能隙足夠大，在一般情況之下可以阻止電子自由流動；但是能隙也不致於大到當有電場作用時，價電子帶的電子無法提升到導電帶，以導電帶掉落回到價電子帶的電子能夠參加受激發射。

注入式雷射，例如 840.0nm 的正向偏壓鎵 - 砷 (GaAs) 二極管，把直流輸入功率直接轉變成為相干光，不需要光泵激 (optical pumping)。半導體雷射比較廉價、堅固而且有效：典型二極管的大小只有 1 毫米，運轉電壓為 1 或 2 伏特，而連續輸出功率可達數毫瓦特。其特性波長 ($1,321.6\mu\text{m}$) 正好符合光學纖維的最小能量損失的範圍，因而這種雷射在通訊方面和視聽碟方面極其有用 (參圖 8)。

(E) 氣體放電雷射

金屬蒸氣以外的第二種放電雷射是稀有氣體 - 鹵化物型，最近已經成為紫外光與其附近波長範圍的主要雷射光源。其中一例是氙 - 氟 (XeF) 雷射，其躍遷發生在 3510 與 $3530\text{\AA}$ 。氙 - 氟是一種激元 (excimer)，亦即由受激原子與基態原子所組成的分子。氣體放電雷射取代其他雷射，廣泛應用在染料與固態雷射泵激，光化學研究 (例如同位素分離)，以及非線性光學過程。氣體放電雷射所

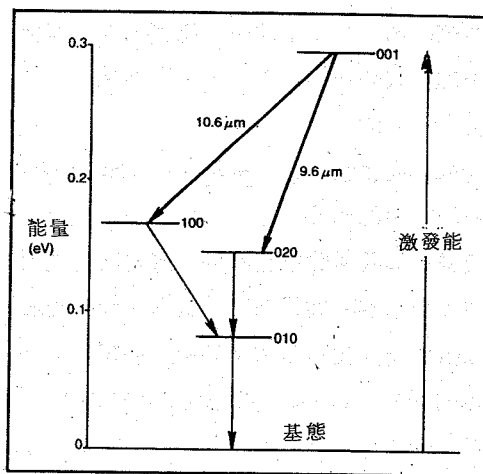


圖 7

產生的脈衝能夠包含數千焦耳的能量，科技人員正在設法把它應用在雷射融合方面。

氣體放電雷射的功率較 CO_2 雷射為低；但其雷射光的波長較短，對融合過程可能比較合適（參閱下述雷射融合部分）。氦-氖（He-Ne）雷射的運轉原理也是根據氣體放電的，在教室與光學實驗室普遍採用這種雷射。壓力大約 1 陶爾（ $1 \text{ torr} = 1 \text{ mm Hg}$ ）的氦與 0.1 陶爾的氖混合起來放電。氦原子因放電而被激發，然後

與氖原子發生碰撞，將其多餘的能量傳遞給氖原子。因為這兩種元素的能級結構相似，所以這種雷射的運轉非常順利。後來氖原子衰變而移到較低狀態，產生波長 $0.6328 \mu\text{m}$ 的主要雷射光。典型的教室用氦-氖雷射，其輸出功率為數毫瓦特左右。

(F) 自由電子雷射

自由電子雷射是高功率的可調諧雷射，其中的一束高能電子通過週期性磁場，使電子的動能直接轉變成為光。電子束與反向運動的強烈微波發生交互作用，結果依照都卜勒效應（Doppler effect），微波光子的能量向上偏移幾個數量級。運用雷射的專門名詞來說，上方雷射狀態包括高能電子與低能（微波）光子，而下方雷射狀態包括低能電子與高能（雷射）光子，電子的總能量損失可由電子所通過的外在加速器來補償（參閱圖 9）。調整磁場或電子束的能量，即可調諧雷射光的能量。

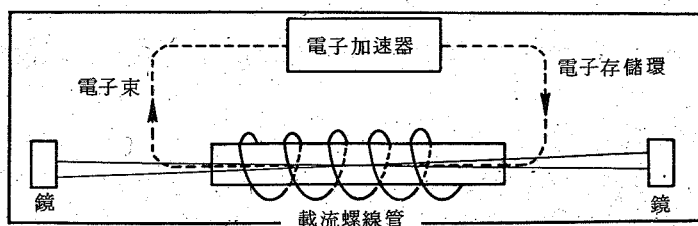


圖 9

使用自由電子而不用原子或分子，就可以任意設定波長，其範圍可以從紅外光到紫外光。高功率與高效率是自由電子雷射的其他優點。

(G) 染料雷射

由有機染料（液態或固態）所製成的雷射具備一些有用的性質。它們可以在廣泛的波長範圍內調諧，而且功率與效率均高。除此而外，一旦選擇特定的波長以後，輸出波長能夠限制在非常狹窄的光譜寬度內。

染料雷射的多用途性，全靠有機分子在第一受激能量狀態與基態的振動支級之間的許多躍遷。某

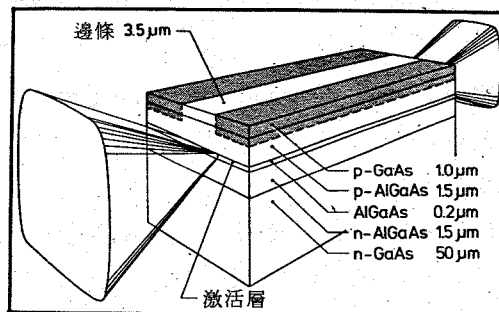


圖 8

些染料能在數百埃 ($1 \text{ 埃} = 10^{-10} \text{ 公尺}$) 的連續頻帶中發生螢光。然而, 實際上應用時, 通常雷射必須在單一波長上運轉。只在光共振腔內使用反射式繞射光柵或稜鏡, 即可達成這項目的。光柵 (可能是刻線的平面鏡) 可以轉動, 使其方向改變, 以便第一繞射峰的光沿著主軸反射回來。因為峰角隨波長而改變, 所以光柵的方向可以優先選出合適的波長, 同時限制雷射光在狹窄的光譜帶中, 有時甚至在 1 埃的幾分之一。

由於輸出光的波長範圍很小, 染料雷射可以用來區別間隔緊密的原子或分子狀態。光化學、同位素的分離、大氣成份的偵測以及燃燒發射的控制方面, 往往需要這種性能的雷射。

(H) x 射線與 γ 射線雷射

上面所說的雷射所產生的光, 其波長從紅外光 ($1 \sim 10\mu$, $1 \mu = 10^{-6} \text{ m}$) 擴及到紫外光 ($100 \sim 4000\text{\AA}$)。能量低於紅外光 (波長大於 10μ) 的相干輻射, 可用雷射 (maser) 或電子裝置來產生。但是, 波長較紫外光為短時, 就發生問題。可見光相當於原子與分子的能級之間的普通躍遷, 而 x 射線與 γ 射線相當於更劇烈的現象, 例如重原子內層電子的發射, 或原子核的能量狀態發生變化。要產生穩定的粒子數反轉, 並且控制這種高能光子來幫助受激發射, 這是非常困難的; 這種輻射直接穿透普通的鏡子。進展雖然是緩慢的, 但是 x 射線與 γ 射線雷射的構想已經起步了。

(I) 化學雷射

化學雷射利用化學反應所釋放的能量來泵激原子或分子, 以便引起雷射動作。化學雷射的輸出能量可能極其龐大, 因而在軍事上有重大的應用價值。

五、雷射技術

除了染料雷射利用繞射光柵來調諧並且獲得尖銳的光譜線以外, 其他還有許多技術可以用來補充雷射的工作。

(A) Q 開關 (Q-switching)

為了引起雷射動作, 必須造出粒子數反轉狀態。如果受激發射開始得太早, 發生在激活媒質內的許多原子被泵激到高能級之前, 則雷射的輸出功率可能很低。Q 開關是一種方法, 在粒子數反轉完全達成之前, 阻止雷射動作的發生。為此目的, 可將末端鏡子之一轉動, 或插入一個光閘 (或克爾盒 Kerr Cell) 在雷射光束的通道, 直到激活媒質充分準備妥當。圖 10 表示這種情況。在適當時刻開啓光閘, 雷射動作就迅速開始, 結果所產生的一個雷射光的「巨大」脈衝, 可能非常強有力量。這一點在雷射融合方面的應用, 極其重要, 因為融合時必須在極短時間內把龐大能量注入極小目標上。

(B) 波模鎖定 (Mode-locking)

受激發射的過程可能在激活媒質內的幾個地方同時開始; 這許多雷射波模的相位都不同, 而

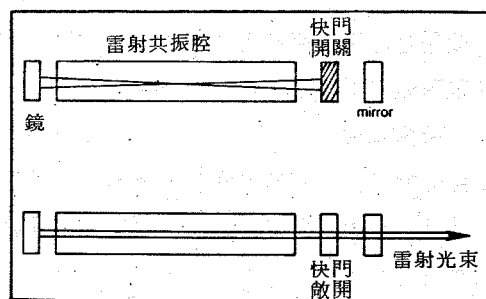


圖 10

且波長也稍微不同，卻必須符合「波長的整數倍等於雷射共振腔的長度之二倍」的要求。雷射放大曲線也隨頻率而變。雷射輸出功率由媒質響應與共振腔響應的重疊來決定。依據共振腔的長度與媒質對頻率的響應情形，一個或許多個波模可以維持下去。

各種波模也可以鎖在一起成為短脈衝，而利用能夠漂白的染料所作成的極薄調制元件來使其相位變成相同。這種染料與Q開關所用的克爾盒不同，它允許雷射動作進行，卻能吸收一部分光，當光的強度增加時，吸收量就減少，這種性質有利於那些迅速建立很大強度的波模；強度較小的波模受到選擇性吸收。如此，通過吸收盒許多次之後，可以造成一系列極短極強的同步脈衝（各種波模的總重疊）。

產生最短波模脈衝的波模鎖定形式之一，如圖11(a)所示。在碰撞脈衝波模鎖定方式中，連續穩定脈衝列（每秒1億個脈衝）沿著相反方向被送入反射鏡與會聚鏡所形成的路線。這些脈衝正面相遇，形成一個瞬變干涉圖樣。如果干涉最高值的位置在染料盒內（其厚度只有一千分之一吋），則吸收效果極低（圖11(c)）。當反向的兩個脈衝互相通過而離開染料盒，它們的干涉效果減低，染料能對脈衝的後（以及前）端作選擇性吸收（圖11(b)）。這個過程使繼續循環的脈衝通過染料許多次後，其長度變短。脈衝長度短於 10^{-3} 秒者，可以利用這種方法來獲得。

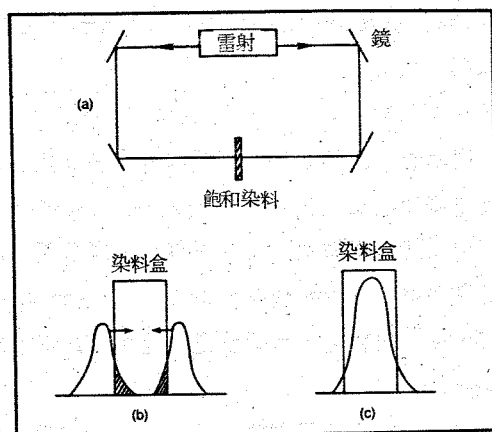


圖 11

(C) 非線性光學 (Nonlinear optics)

假如光輸出與光輸入不成線性比例，則該光學器件稱為非線性（圖12）。同樣地，如果光在某材料中的透射、折射、或反射，受到光的強度之影響，則該材料也是屬於非線性的，暴露在強烈陽光中就變暗而在正常光線中保持透明的太陽鏡就是一個好例子。波模鎖定中，用來吸收脈衝的染料是另外一個例子。

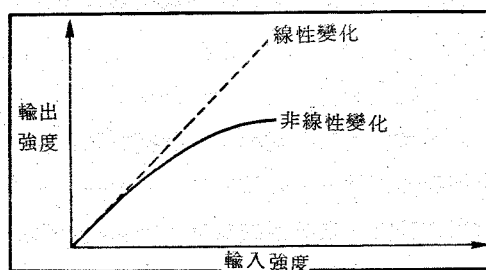


圖 12

某些材料因為雷射光的巨大電場而發生非線性，這種電場強度可以達到每公分 10^7 伏特之高。比較起來，陽光在地球表面的電場強度大約只有每公分10伏特。強大電（或磁）場將使材料原子內的電子排列發生變化，因而改變其折射率。這現象並不是材料的缺點，反而可以利用它來達成許多非線性效應，例如諧波、共軛波以及光雙穩（optical bistability）的產生，其情形將在下面詳述。

(D) 諧波的產生 (Harmonic generation)

當雷射光通過晶體時，其強大振盪電場將使晶體點陣中的原子所微弱束縛的電子，隨即發生同相

位移。尤其是離子化合物的材料（例如氯化鈉），電子對雷射場作用的反應將是非對稱的：電子比較容易朝向某一特定方向去移動。這些被驅動的電子，其電場組成非線性極化波，與雷射場保持同相而行進。它相當於以下三部分之和：①頻率與雷射相同的波，②頻率兩倍於雷射的第二波，③定值的「直流」部分。更高的諧波，其貢獻並不重要。第二諧波輻射是相干的，利用稜鏡或濾波器，可以從雷射光束中把它分離出來。

如此產生出來的較高諧波叫做增頻轉換（up-converted），或頻率變成原來光束的兩倍。這個過程的主要應用之一可能在於融合物理學。在這領域中，科學家認為短波光（紫外光）可能使熱核反應容易開始。勞倫斯利佛莫國家研究所（Lawrence Livermore National Laboratory）的一組人員，使用磷酸二氫鉀（potassium dihydrogen phosphate）晶體，在鈹-玻璃雷射中順利產生 1.05μ （紫外光）的第二及第三諧波光。 $5320 \text{ \AA}$ （綠）光的轉換效率大約 80%，換言之，原來的紫外光，有 80% 可以轉換成為綠光。其次，這綠光再度被轉換成為 $3550 \text{ \AA}$ 的藍光。從紫外光轉換成為藍光的總效率，大約 75%。

(E) 相位共軛（Phase conjugation）

光與物質（例如結晶固體中的原子）或其他光波之間的交互作用，會導致有趣的現象。雷射光的強大電場會引起電致收縮（electrostriction），而高電場附近的材料密度會增加。這樣就可以在入射雷射光的方向產生一個相干聲波，同時產生沿著相反方向行進的反向散射光波。這種現象叫做受激布里淵散射（stimulated Brillouin scattering）。這過程的有趣結果是，散射光波和入射光波的相位相反。換言之，兩個波是彼此相位共軛；散射波是入射波的「時間反轉」像（time-reversed-image）。

假設把雷射光照在畸變媒質上（例如透鏡或一團煙霧）。如果這束光被普通鏡子反射回來，結果的光束將是加倍畸變的，而在該媒質行進兩次。反之，畸變程度相同於原波而相位相反於原波的共軛波，第二次遇到該媒質而從媒質出來時，完全沒有畸變；散射波的共軛相位阻止畸變的發生。

相位共軛在有訊號相差問題的研究方面（雷射融合、電力輸送、通訊以及其他），可能有用。圖 13 表示相位共軛在光刻蝕法（photolithography）上的應用。

(F) 立體攝影術（Holography）

立體攝影術的過程與相位共軛有點關係。來自雷射的光被分成兩道光束，其中一道光束照射在物體上。未散射的參考光束與被物體散射的光速再度一起被收集在照相底片上。兩道會聚光束互相干涉，結果留下對應的強度圖樣在照相乳劑中。要重建該物體的象時，僅僅用參考光束來照射照相底片即可。從各個角度去看，物體的象看起來是立體的。

立體攝影術不但能夠產生一些新奇的光幻視（optical illusion），而且可以應用在許多方面，例如生物樣品的顯微鏡立體研究，氣泡室中帶

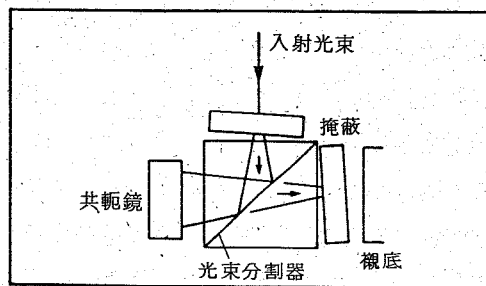


圖 13

電粒子經跡的重建，太空梭上晶體成長的觀察等。

六、雷射光譜學

由於雷射光的強度極大，頻率範圍狹窄，它在某些光譜學方面扮演主角。雷射光可以用來激發特定的原子或分子到特定的能級，然後又可以用它來研究這些受激態的衰變情形。光譜線與其對應的能量狀態往往不容易區別，例如：分子的振動與轉動支級之間的躍遷伴隨著波長在紅外光範圍的光子。複雜的雷射技術已被開發發出來揀選這些光譜線，因而替光譜學帶來一次革命。

(A) 飽和光譜學 (Saturation Spectroscopy)

在觀測明確的光譜線時所遭遇到的主要問題之一是都卜勒譜線增寬 (Doppler broadening)。正如火車頭接近或離開車站時，汽笛聲的音調改變，氣體中的原子或分子放出來的輻射波之波長也會改變，其改變情形要看原子或分子是接近或遠離觀察者來決定。

因此氣體的無規運動速度 (在室溫可以高達 10^3 m/s) 將導致光譜線的增寬 (通常增寬一百萬分之一)。

要解決這個問題的一個方法是，只研究那些沿著偵測者的視線成直角方向運動的原子或分子，圖 14 顯示所謂飽和光譜學的方法。來自雷射的光被分成兩道光束。第一道光束當做飽和器而第二道光束當做試探具。假設雷射光的能量稍微低於激發原子到較高能級所需的能量。如果一個原子沿著光束 2 的方向而運動，則可能尚未激發。光束 2 中的光子因都卜勒效應而向著比進來的原子較高的能量方向頻移。結果，光束 2 中的某些光子被吸收。反之，光束 1 中的光子被沿著相反方向運動的原子所吸收。就能量高於躍遷能量的光束而言，角色完全反過來：光子與離遠的原子發生交互作用。在任何情形之下，任何光束中的光子都只與樣品中的小部分原子發生交互作用，而這些原子沿著光束軸的分速度促使光子的能量發生都卜勒頻移，俾光子能被吸收。只有調整光束的能量，使其完全等於躍遷能量，始不需要靠都卜勒效應來補償。這時，兩道光束中的光子都在爭取樣品中的那些沿著光束軸方向沒有分速度的原子。我們可使飽和光束先與這種原子發生交互作用，把這些原子激發到預期的能級。試探光束通過飽和樣品盒後，將發現幾乎沒有原子可以激發。試探光束吸收量的減少等於偵測器的光子量之增加，表示現在雷射光的能量已經調整妥當，完全等於

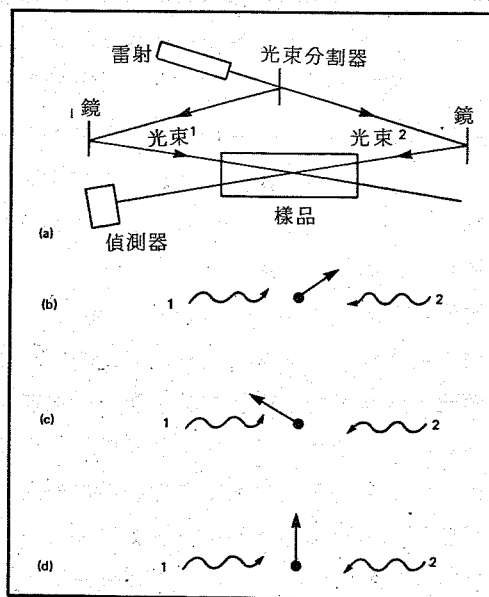


圖 14

原子的躍遷能量。

(B) 二光子光譜學 (Two-photon spectroscopy)

消除都卜勒譜線增寬的另外一種方法是，同時用兩個光子來激發一個原子。為此目的，先把原子樣品放在雷射與反射鏡之間。入射光與反射光在樣品中建立駐波。假如調整光束能量，使其完全等於原子躍遷能量的一半，當兩個光子同時被吸收時，即可引起預期的躍遷。這個方法的較大優點是，不必像飽和光譜學那樣，只選擇那些沿著與光束成直角的方向運動的原子。對於分速度是沿著光束軸的原子，這兩個光子將因都卜勒頻移而朝向相反的兩個方向，但是它們的能量之和將保持定數，二光子光譜學對於較高能量的躍遷之研究一直很有用，尤其是在雷射能量往往不足的紫外光躍遷方面。

應該指出的是，光譜線的寬度不會無限狹窄。量子力學的測不準原理要求發射光譜線的能量必須與該狀態的壽命成反比。即使某狀態的壽命很長，所對應的寬度一定是有限的。

(C) 拉曼散射 (Raman scattering)

當一個原子被能量合適的光子撞擊時，這原子可能吸收光子而躍遷到受激態。當撞擊進來的光子能量太多，不能引起特定的原子能級躍遷時，可能發生拉曼散射。這時，光子撞擊原子（放出一部分能量）之後，變成頻率較低的光子而再度被放出來，猶如一個人帶著 10 塊錢進入戲院，後來只帶著 5 塊錢出來，戲院從他收到了 5 塊錢。

拉曼散射是在雷射來臨之前就被發現的，然而，這種現象因為受到雷射所能提供的極大強度與單一波長性而獲得莫大益處，尤其是在研究分子的許多振動與轉動支級之間的躍遷，以及波長在紅外光範圍的光子所引起的躍遷時，幫助更大。這些躍遷是以該物質的散射光譜中的伴線姿態來出現的。在這種光譜中，佔主要波長的未被散射雷射光的旁邊出現較弱的譜線，其波長較短。原來的雷射光與拉曼散射光之間的能量差，完全相當於該樣品物質的振動支級之間的躍遷能量。

注意，在拉曼散射中，分子樣品並沒有預先泵激。入射光子引起激發而被轉變成爲較低能量的光子。在受激拉曼散射 (stimulated Raman scattering) 中，這種過程繼續進行，猶如普通雷射過程中的受激發射之建立。不久，基態分子被激發到較高狀態，雷射光被消耗，而變成較低能量的光（亦即較低頻率的光）。正如原來的雷射輻射，這光是相干的。拉曼效應被用來研究分子狀態，並且反過來創造新波長的相干輻射。

(D) 同位素分離 (Isotope separation)

利用雷射來分離同位素，全靠雷射光的單一波長性質。一個元素的同位素，只是原子核中的中子數不同而已，通常不能用化學方法來辨別。然而，利用質量的些許差異，可用雷射來對同位素做選擇性激發。例如，原子束中的同位素混合樣品可用強烈雷射光束照射，而只激發其中一種同位素。然後，被激發的同位素可在電場或磁場中利用其他的雷射來電離與分離，以便達到區別的目標。

氣體擴散、氣體離心分離、多層蒸餾、電磁分離以及其他傳統的同位素分離法，效率較低，進行緩慢，而且費用浩大。同位素雷射分離法可能效率較高，對於產生核動力的重元素，尤其有效。目前正在開發階段的方法，如果完全實現，鈾 235 的萃取可能更加徹底而且經濟（勝過氣體擴散法 1000 倍）。

七、雷射融合

原子核融合是將兩個輕原子核（例如氘與氚）融合成爲一個較重的原子核（例如氦）而放出過剩的能量。然而，這種反應能夠開始之前，必須克服原子核的靜電排斥，因而需要類似於太陽內部的條件： 10^8 K的溫度以及一4倍於液態氫的密度。在這種溫度之下，燃料樣品中的所有原子都電離了：帶正電的離子與帶負電的電子混合在灼熱的電漿中，以數千電子伏特的動能四處運動。

截至目前，最受矚目的融合反應器是托卡馬克（tokamak），其中油煎圈餅形狀的容器裝著電漿。電漿粒子用強大磁場來作「磁性容納（magnetically contained）」，而磁場由繞在容器的線圈所產生。但是，托卡馬克的巨大磁場線圈與擁擠的測量儀器會阻礙電力的產生工作。

慣性限制方案（inertial confinement scheme）提供托卡馬克以外的另外一辦法。在雷射融合中，一個氘—氚燃料的小球（直徑 $100\mu\text{m}$ ）同時受到來自四面八方的雷射光之照射，因而導致小球向內爆破，產生高密度電漿與高溫。緊接著進行的暫時性融合反應，產出高能中子，而這些中子被吸收在包圍著融合容器的液態金屬鋰。這樣產生出來的熱可以用來發電。然後，把新的燃料小球放進設定的位置，這過程就可以重新開始。

因爲靶子材料不太吸收雷射能量，而且利用長波光（ $1\mu\text{m}$ ）時，燃料加熱過早，所以雷射融合的真正實現受到阻礙。由於所謂「反軔致輻射（inverse bremsstrahlung）」的過程，雷射光與燃料中電子發生耦合。反軔致輻射是普通軔致輻射的反過程，而在軔致輻射中，快速電子與原子核碰撞而被迫停止時，電子的能量以光子的形式輻射出去。科學家認爲，減少雷射的波長可以提高反軔致輻射的效率。羅契斯特（Rochester）大學與勞倫斯利物莫國家研究所的實驗已經支持這種想法。較短波長的雷射光和電子的耦合（電子也透過碰撞而把能量傳給正離子），其改進業已激發上面所述的諧波轉換的研究，同時令人重視氟化氬（KrF）激元雷射的重要性，而這種雷射可以產生沒有諧波轉換的紫外光。

最大規模的雷射融合裝置在洛塞勒摩斯（Los Alamos）與利物莫。利物莫的SHIVA（濕婆，係印度三大神中司破壞之神）系統使用Q開關鉗：鉍-鋁-石榴石雷射當主力振盪器來透過鉗（玻璃棒而發送脈衝。在本質上，這些棒都是雷射，只通過一次雷射共振腔就發生受激發射，各棒都被泵激，而來自主力振盪器的脈衝通過時，各棒就參加雷射動作。通過許多這種階段之後，累積起來的脈衝非常強有力量。照射SHIVA靶子的雷射光，其波長爲 1.06μ ，以短脈衝方式運轉時，在 100×10^{-12} 秒的脈衝中產生 25×10^{12} 瓦特的功率。以長脈衝方式運轉時，在 10^{-9} 秒的脈衝中產生 15×10^{12} 瓦特的功率。

NOVA（新星）是SHIVA的改良型，預定在1985年開始運轉。在NOVA中，將不用矽玻璃棒，而改用磷酸鹽玻璃，同時，雷射放大器的數目要加倍，輸出光的波長將略有變化，從 1.06μ 到 1.05μ 。根據設計，NOVA將在 3×10^{-9} 秒的脈衝中產生 10^{14} 瓦特的功率。脈衝較短時，功率將爲 $2 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{14}$ 瓦特。NOVA的設計標準是要達到融合點火的條件：溫度大的 10^8 K，而勞遜數（Lawson number，係密度與限制時間的乘積）大於每立方公分 10^{15} 秒。

利用較短波長光的優點，已經成爲NOVA的設計因素之一。有人提議標準波長的光（ $1.053\mu\text{m}$ ）

，功率 $2 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{14}$ 瓦特）改為綠光（ $0.527\mu\text{m}$ ，功率 $1.6 \times 10^{14} \sim 2 \times 10^{14}$ 瓦特），或改為藍光（ $0.351\mu\text{m}$ ，功率 $6 \times 10^{13} \sim 10^{14}$ 瓦特）。或許較低的功率可由雷射能量與燃料物質之間的較佳耦合來彌補。

洛塞摩斯科學研究所的雷射系統 HELIOS（太陽神）使用 CO_2 氣體雷射，其運轉波長為 10.6μ ，HELIOS 在 10^{-9} 秒的脈衝中產生 2×10^{13} 瓦特的功率。其改良型是 ANTARES，將在 10^{-9} 秒的脈衝中產生大約 4×10^{13} 瓦特的功率。

從巔值功率的立場來看，這裏引述的是現有雷射中最強力的。軍用雷射的脈衝時間不必小到 10^{-9} 秒；所以通常其運轉的平均功率較高。

八、其他應用

雷射廣泛應用在材料處理、退火、材料之改變、儀器製造、測量、表面合金、焊接、積體電路的檢查、立體表面的測量以及光化學，足以證明雷射光在工業界的力量與多用途性。

現在雷射經常用在測量大氣與水的特性，例如分子濃度、氣溶膠的存在、風速以及湍流；重要的碳氫化合物燃燒參數，例如溫度、流體流動、速度、物種濃度等，雷射都能測得極其準確。

雷射的軍事應用包括，軌道上太空飛行物的紅外光雷達成像、雷射測距、海軍通訊、追蹤系統、火器自動檢驗、沙漠中的成像以及飛彈的防禦。高能雷射計畫是最近美國國防部資助的最大科技方案。1981 年的預算是二億美元，而 1982 年估計可達三億美元。因為 CO_2 雷射與氣體動力雷射的能量極高，所以它們是常用的軍用雷射。

由於波長較短，電磁光譜中的紅外光到紫外光部分，可能比無線電波部分擁有數千倍的資訊。偵測器系統、光連接器、放大器、開關以及光學纖維，不久以後可能影響整個通訊工業。此外，雷射也用來錄放視聽碟。

光電儀器是利用電流在透明媒質引起效應，因而產生光學變化的。目前的純粹電子積體電路所負責的許多工業可能由小雷射、稜鏡、開關與纖維所組成的積體電路來替代。光電儀器的應用範圍包括資訊處理、聲光學、固態儀器的評估，而最後必然擴及「光」電腦。

最後談到雷射在醫學方面的應用。雷射的極大強度與優異會聚能力使它成為醫學界最有價值的工具。雷射光束能夠切割組織而使流血量減少，又能使腫瘤等大塊物質汽化而不必動手去碰患部。利用 CO_2 雷射來治療惡性與惡性前期病，愈來愈普遍。利用氫雷射與鈹 - YAG 雷射，使整型外科與皮膚病患者的不正常血管得以凝固，並且控制潰瘍的出血，已經改變這些疾病的傳統治療法。從糖尿病性視網膜病到綠內障的眼病，經常應用氫、紅寶石與染料雷射來治療。其他的廣泛應用包括： CO_2 雷射在產科學、泌尿科學以及頭頸外科手術上的應用，鈹 - YAG 雷射在子宮止血上的應用，纖維光學感覺器在測量血流、血壓與血氧飽和上的應用。

（取材自 THE PHYSICS TEACHER November 1981）