

雷射的原理 與應用

雷射光具有光束高度平行、純色、同調及高強度等特性，起初是應用在遙測、科學研究、工業及軍事等方面。時至今日，它已經廣泛地應用在日常生活中，真可謂光源中的極品。

劉海北



心細的你，可能已經察覺到好像到處都有雷射。早上到超市買麵包和飲料，收銀員以雷射光讀條碼來結帳；上課時老師可能用雷射光筆指示黑板或投影幕上解說之處；回到家，你可能會以半導體雷射去讀DVD光碟，觀賞勁歌熱舞；在上網時，則用到以雷射刻製的電腦鍵盤。諸此種種，能否讓你產生「雷射到底是什麼東西」的疑問？

其實簡單地說，雷射是一種光源，只是它發光的原理和一般光源不同，發出來的光就有它特別之處。一般光源是經由「自發放射」，而雷射是以「受激放射」來發光的。提及受激放射，在自然界是觀察不到的，但是它的理論，愛因斯坦早在一九一七年就已推導出來，並且預測了受激放射光的特性。只是以當時的技術，尚不足以在實驗室中證實。

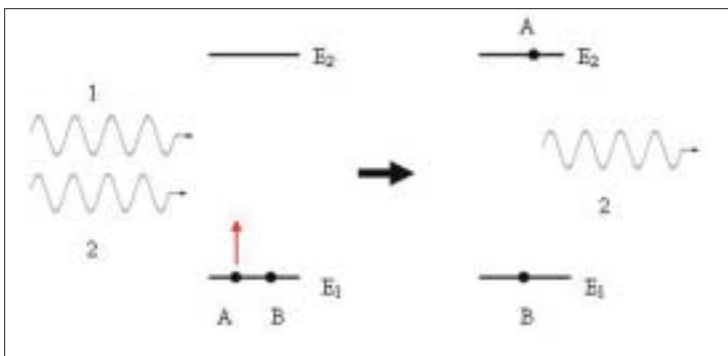
愛因斯坦指出，波長較長的電磁波由「受激放射」而發射的機率會較大。二次世界大戰使用的雷達，促使微波技術快速成長。微波和光波都是電磁波，但是微波的波長要長得多，激起湯斯（Charles H. Townes）觀察受激放射微波的意念。於一九五一年，他發現氦果然可以由受激放射而發出微波，證實了愛因斯坦的理論。

但是微波的受激放射並無實際意義，因為以電子器材發射微波會更具效力。能達成以介質的受激放射釋出光波，才是具體的目標。因為唯有以受激放射所發射出來的光波，才能像水波一樣，具有真正的波性，有明顯的傳播方向和波形等。



各種雷射光筆

一九六一年，梅曼（Theodore Maiman）終於以人造紅寶石實現了光波的受激放射，稱為「雷射」。迄今四十餘年之後，從本體小自微米以至可以摧毀飛彈的武器級雷射一一出現。



介質A吸收光波的一部分，能量由 E_1 升至 E_2 ，光波強度衰減。

一九六一年，梅曼 (Theodore Malman) 終於以人造紅寶石實現了光波的受激放射，稱為「雷射」。雷射是英文「laser」的音譯，「laser」又是取「以受激放射強化的輻射光源」(light amplification by stimulated emissions of radiation) 諸英文字首所組成。迄今四十餘年之後，從本體小自微米以至可以摧毀飛彈的武器級雷射一一出現。

光與介質的交互作用

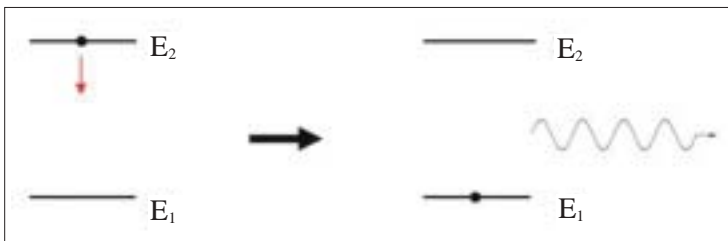
凡是能「吸收」或「發射」光的物質，都以「介質」稱之，如原子、分子及晶體等，會選擇性地吸收某些波長的電磁波，而進入了「受激態」。假設介質A及B原處於較低能態的 E_1 狀態，若介質A吸收了一部分的光波而升至較高的 E_2 狀態，使入射的光波強度減弱，這便是吸收。吸收是機率性的，介質A或B不一定會吸收光波，但若是能吸收則必定要滿足一項條件，那就是光的頻率 f 必定滿足：

$$f = (E_2 - E_1) / h$$

h 稱為「普郎克常數」，它的值是 6.6×10^{-34} 焦耳·秒。

以波長650奈米(1奈米 = 10^{-9} 米)的紅光為例，它的頻率大約是 4.6×10^{14} 赫，這個波長的

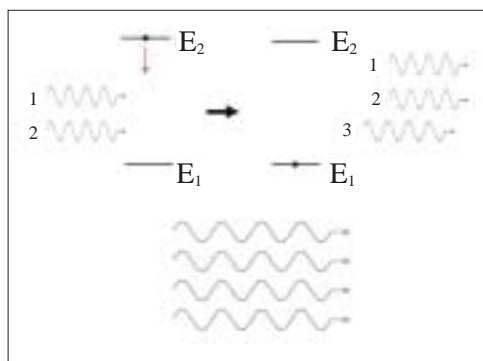
處在 E_2 狀態的介質以自發放射發出光波，能量降至 E_1 狀態。



基本能量 $h \times f$ 是 3×10^{-19} 焦耳，也可以說這束光的總能量是 3×10^{-19} 焦耳的整倍數。只是由於介質的速度差異所引起的都卜勒效應，以及介質之間相互干擾等因素，使介質吸收的光頻率是以 f 為中心，但仍能吸收略高或略低的頻率，也就是說它能吸收位在一個頻帶中的頻率，只是吸收的機率有別而已。

反過來說，在 E_2 狀態的介質也會放出相當 $E_2 - E_1$ 能量的光子，而降至 E_1 的能態，這個過程就是「放射」，稱為「自發放射」，這是放射中的一種，表示這一行動是自動自發的。基於上述的理由，一群介質所釋放光子的頻率，也是在以 f 為中心頻率的頻帶之中。

另一類放射，是處在 E_2 狀態的介質受到頻率 $f = (E_2 - E_1) / h$ 的光子群1或2的誘導，而放出同一個方向，頻率和相位完



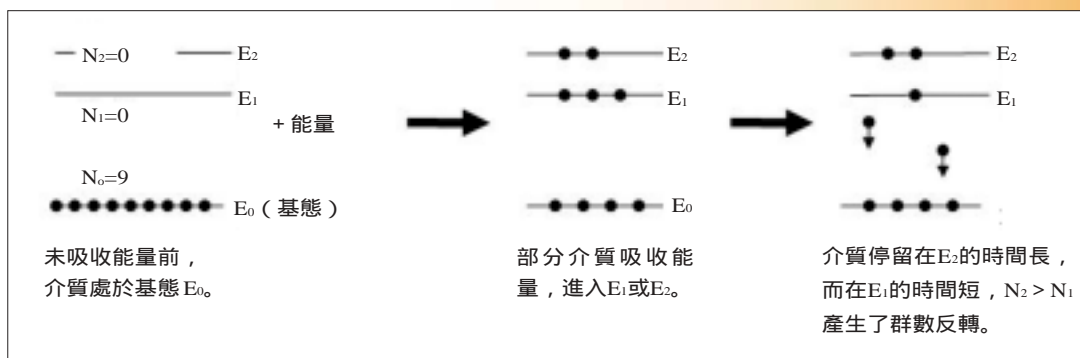
受激放射及其所產生雷射光的同質性

全相同的光子。所謂「相位」相同，是指射出光子的波峰和波谷，與入射光子的相重疊。這種在誘導下所產生的放射，稱為「受激放射」，使得同一類型的光子數有相加的作用，所以稱為「光放大」或「光強化」。受激放射所產生的光子群，有相同的方向、波長和相位，有如齊步前進的士兵。但傳統光源所發射的光子，其波長和方向各異，當然也就沒有秩序和威力了。

當一束光通過一群介質的時候，如果頻

光電的應用

雷射的原理與應用



雷射介質在吸收能量後進入群數反轉的過程

率合宜，可能會被處在下能級 E_1 狀態的介質吸收，也有可能引誘處在上能級 E_2 狀態的介質放射。並且根據愛因斯坦的理論，這兩種作用發生的機率相等，至於什麼樣的介質才能藉受激放射強化光束呢？

由於吸收和受激放射都是機率的問題，所以如果處在 E_2 狀態的介質數 N_2 比處在 E_1 狀態的介質數 N_1 多，即 $N_2 > N_1$ ，那麼受激放射出來的光子，就被吸收的多，光束就轉強了。所以凡是可能符合 $N_2 > N_1$ 條件的介質，就可能強化光束。 $N_2 > N_1$ ，表示能量狀態居高位的介質數比在底下的多，這是一種反常的現象，我們稱之為「群數反轉」。能進入「群數反轉」的介質有限，所以雷射的介質種類也有限。

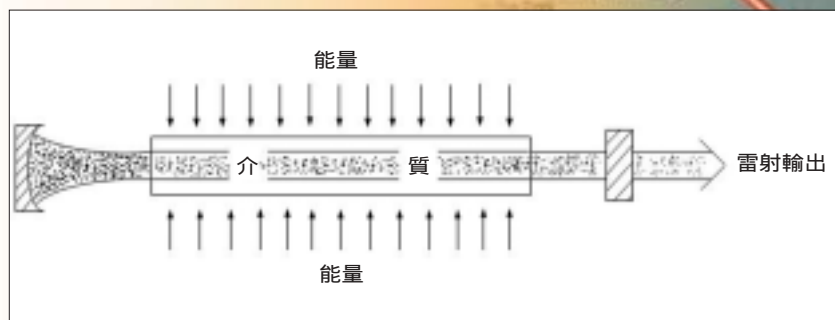
為使介質處在 E_2 狀態的介質數 N_2 比在 E_1 狀態的介質數 N_1 多，我們必須對介質施加能量，或者說使它「活化」。那麼什麼樣的介質才能活化呢？如果有九個介質原本都處在基態 E_0 ，在施加能量之後，有三個進入了 E_1 狀態，有二個進入了 E_2 狀態，或表示為 $N_1 = 3$ ， $N_2 = 2$ 。只是進入 E_1 狀態的介質比較沒有耐性，有二個迅即脫離，但是進入 E_2 狀態的就挺得住，於是變成 $N_2 = 2$ ， $N_1 = 1$ ，因此達成了群數反轉。這只是介質進入群數反轉的方式之一，其他的方式較難了解，在這暫不敘述。

光束在活化了介質中傳播愈遠，就會愈強。但是把介質放在很長的容器中終非良策，

梅曼想出來的方法，是在介質容器的兩端，各放置一面反射鏡。反射鏡中的一面對受激放射波長，也就是相當於 $(E_2 - E_1)$ 的波長高度反射，而另一面部分透射，一些光就由這反射鏡逸出，成為雷射光。於是雷射的主要元件就是「介質」，「能量」輸入裝置，和以兩面反射鏡所構成的「光腔」。光腔使光來回反射通過介質予以強化，每次強化的程度愈高，反射鏡的透光率就可以愈大。

這兩面反射鏡有如固定琴弦的栓子，限定了振動的波長須滿足鏡間距離是半波長整數倍的條件。這條件可提升輸出光的純色性，但也不難達成，因為光波的波長甚短，且可以振動的波長或頻率如前所述有一範圍，所以隨意設定鏡間距離，就有好幾個波長，可以同時滿足這一距離是它們半波長整數倍的條件。為使雷射只輸出單一波長，還需下一番功夫呢！

雖然輸出了數個波長，但仍不影響純色性，從視覺的觀點來說，這些波長的光色都一樣，並且每一波長都很「純」或集中在狹窄的範圍內，所以雷射光仍是純色的。



雷射的基本結構 反射鏡中最少有一面是凹面，以確保穩定性。

此外，這兩面反射鏡限制了雷射光束的方向，這也是造成雷射光方向性的主因。至此我們已經知道為什麼雷射光有方向性、同調性、純色性和高強度性，以下再介紹數種重要雷射及其介質的活化方式。

重要的雷射種類

介質可能是原子、分子或離子。原子必定是氣態的，分子可能是氣態或在溶液中，離子則可能在氣體或晶體內寄居。至於半導體也是晶體，不必寄居就可以是自發或受激放射光源。以下以氣體、液體、晶體及半導體為分類，介紹幾種重要的雷射以及如何活化其介質。

氣體雷射 第一部問世的氣體雷射是氦氖雷射，它也是繼梅曼製成紅寶石雷射之後的第二部雷射。雷射的介質是氖，但是在氦氖混合氣中氦遠比氖多，才能使氖產生雷射作用。這種雷射一般以小型為主，輸入數瓦至數十瓦的放電功率，輸出數毫瓦至數十毫瓦的633奈米紅光。因為以放電為激發的方式，所以雷射管放電時看似霓虹燈。雖然雷射的功率不高，但是光束的品質最佳，最能示範雷射光以及光波的特性。

二氧化碳雷射是以放電方式激發的高功率雷射，目前商品化的已達萬瓦。這種雷射中的氣體，以氫及氮為主，介質氣體二氧化碳反而最少，原因是大量的氫和氮，才能幫助少量的二氧化碳進入群數反轉。二氧化碳雷射的效率，也就是輸出光功率和輸入電功率的比值可達15%，較氦氖雷射高約百倍。輸出的波長是10.6微米（1微米 = 10^{-6} 米）紅外線，也證實了愛因斯坦長波長介質較容易發生受激放射的理論。

鹵化惰性氣體是優秀的紫外線雷射介質，其種類有氟化氫、氟化氬、氟化氫、氯化氫等，都輸出紫外線，且效率可達1%。惰性氣體如氫、氬和氫等，原本不會與其他的元素化合，但是如果把它們和化學性最活潑的鹵族氣體如氟、氯等混合，再以放電刺激，就會產生前述氟化氫等在受激態的分子。

因為分子一降到基態就告分解，表示只要有分子是在受激態的，就是進入了群數反轉。這種分子稱為「準分子」，這些雷射稱為「準分子雷射」。準分子雷射輸出極強的閃光，或稱為脈波的紫外線，效率也高，是重要的雷射。

惰性氣體如氫、氬和氫等，在高電流放電時所產生的離子，是優秀的可見光雷射光源。

氦氖氣體雷射



<http://www.nmse.fcu.edu.tw/laboratory/la08.htm>

光電的應用

雷射的原理與應用

氫離子和氦離子雷射，分別輸出紫、藍、天藍、綠和黃、橙、紅等波長的雷射。這些雷射以高輸入和輸出為特色，把這兩種氣體混合，雷射光看似白色但又可把各色光分離，在舞台效果方面甚受重用。

前述氣體雷射都賴放電輸入能量，另有氣體雷射是以化學反應產生活化介質。這種雷射不需電力輸入，是極佳的摧毀性軍用雷射，目前已發展到空載以對抗飛彈的階段。

液態雷射 溶解在水或其他溶劑中的染料，在以光照激發後，得以成為雷射介質。每一種染料，在以適當的波長激發後，可以在某一範圍內調變它輸出的雷射波長，並且更換不同的染料及激發光源，雷射輸出波長可包含全部可見光及其附近的紫外線和紅外線，在基礎科學研究上極具價值。前述的離子雷射原本是染料雷射的最佳激發光源，現在又有倍頻的固態晶體雷射可取而代之。

固態晶體雷射 人造紅寶石中的鉻離子，是梅曼最先發現的雷射介質。他原本是研究以紅寶石強化微波，卻發現它可以強化深紅色的光波。紅寶石並不是優良的雷射介質，它的效率甚差，但因它是世上第一具雷射，其歷史價值相當重要。

寄居在鈮鋁石榴石中的釹離子，是一種優良的雷射介質，稱為釹—鈮鋁石榴石(Nd:YAG)雷射。起初研發這雷射時是以放電燈為激發光源，吸收光源中以810奈米為中心的紅外線，發出1.064微米的雷射光，效率約3%。現在以波長808奈米的半導體雷射為激發光源，總效率可達20%，是現有雷射中最優秀的。這種雷射的波長可經二倍頻成為532奈米的綠光，甚至三倍頻成355奈米的紫外線，可取代離子雷射以激發染料雷射。現在石榴石雷射的輸出可達數千瓦，成為極佳的工業用雷射。

寄居在藍寶石晶體中的鈦離子，經以綠色雷射光激發後，可發出波長可調範圍甚廣的雷射光。經調制後，每一脈波時間可達 10^{-14} 秒，

或波段長度僅 $(3 \times 10^8 \text{ m/s}) \times 10^{-14} \text{ s} = 3 \times 10^{-6} \text{ m}$ ，可謂薄如紙張。波長可調且時間甚短，是非常有用的光源。

半導體雷射 正(P)型與負(N)型半導體接觸時，在接觸面附近會形成空乏區。若對P型和N型側各施以正和負偏壓，則可驅趕電洞和電子進入空乏區，電洞和電子的結合會釋出能量並導通電流。因為電子和電洞分居高和低能級，偏壓就能在空乏區造成群數反轉。如果能級間差距夠大且電子和電洞移動夠快，就足以產生雷射作用。

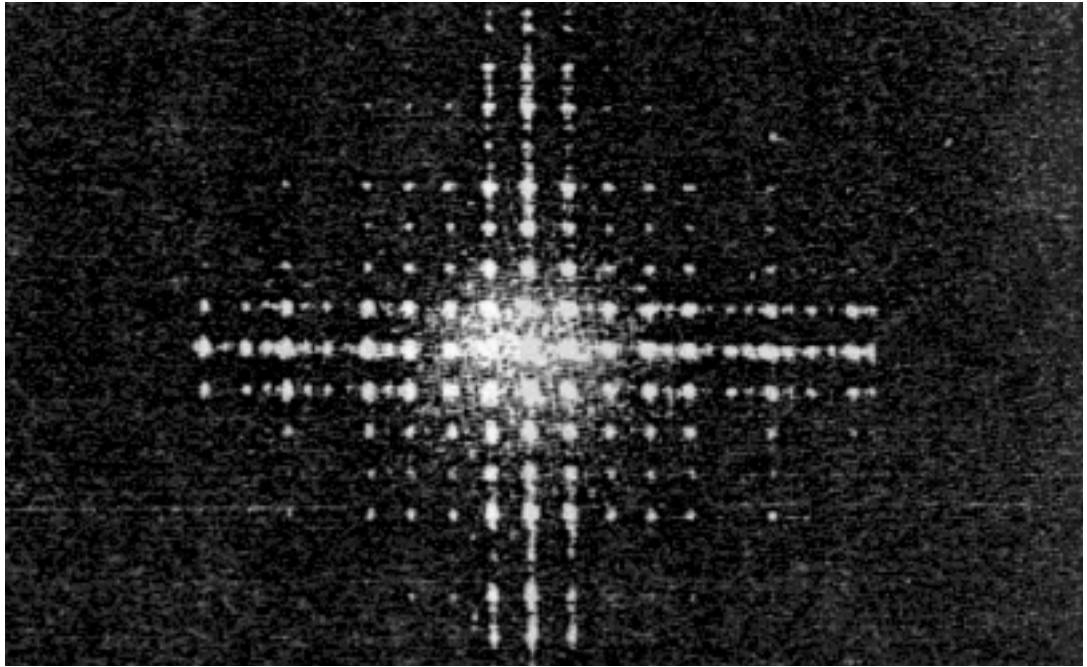
砷化鎵系列或三五族半導體，在摻入雜質後可成為P型或N型的半導體，二者接觸後的空乏區在施以偏壓後可發出波長840奈米一帶的雷射光。若分別在砷化鎵中摻入其他等價的元素如銻和磷等，就能變化雷射的波長。半導體雷射本身甚小，在封裝後也僅及米粒的體積，輸出功率也不高。若把一群半導體製成雷射陣列，體積雖仍然很小但輸出甚高，可用以激發石榴石雷射，甚至有工業上的用途。

雷射的應用

雷射是一種工具，現代各行各業都少不了它。以下略述它的用途。

教育是百年大業，「光」又是科學教育中不可缺的一部分。在以前求學的年代，光波的知識都是「用背的」，這是因為當時沒有任何光源可以發出整齊的光波。當年的老師費盡了力氣，也很難做出繞射和干涉等效果。

今日氦氖雷射既夠明亮，又能發出最為「整齊」的光波，利用氦氖雷射，不費吹灰之力實驗就做出來了。如果你認為氦氖雷射太貴，可以到光華商場以新台幣約三百元買一支紅光半導體雷射筆，再自製狹縫等進行實驗。至於多狹縫，可以用側放的梳子來替代。而圓孔的繞射，用針在不透明的紙片上鑽一小孔，令雷射光透過後射到暗室中的牆上即可看出。總之，今日的教師和學生，都比從前有福，萬



<http://cslin.auto.fcu.edu.tw/scitech/diff/wch7.htm>

雷射光通過網狀金屬線的繞射圖案

餘元的氦氖雷射光束品質要優秀的多，各級學校又都買得起，應該多採用。

工業是經濟的命脈，財富的來源。今日對工業製品的要求日趨個人化，所以量少、樣多，精緻又汰換快速，雷射切割、焊接等，正好能滿足這些需求。此外，如引擎、齒輪和軸承等，必須耐用耐磨，經雷射處理的材料能達成這些條件。精密的加工，要靠精確的量測來檢驗，雷射量測的誤差可達波長級，或 10^{-7} 公尺，可謂相當精準了。

二氧化碳雷射和石榴石雷射主要用於加工金屬材料。銅和鋁等對紅外線有很強的反射，石榴石雷射勉強可藉其脈波或閃光輸出來加工。二氧化碳雷射只宜加工鋼及鎢等。加工的機制在於材料吸收光波，溫度升高而熔化，所以和材料的硬度無關。堅硬如鎢、

鉻和鎳等，反而容易以雷射加工。
使用二氧化碳雷射可輕易切割木材，於是美國家具工業又告復活，可見只要使用合宜的工具，沒有所謂的「夕陽工業」。準分子雷

射鑽孔的效果極佳，但因使用成本較高，非必要時不採用。

除了切割、焊接和鑽孔等類型的加工外，石榴石雷射適於刻製印記。個人電腦鍵盤上的字母、數字和注音符號等，都是用石榴石雷射刻製的。脈波石榴石又可用於去除石像和金屬表面上的污垢或銹蝕，可能會成為標準清理表面的方法。

如果把對材料的施工轉到人體上，雷射的功率不必太高，就可以作外科手術、止血、去除色斑和修正視力等。因為進行手術時不接觸傷口，可減少感染。此外，雷射在整容方面的功能最受重視，這正反映了愛美的天性。

半導體雷射可以讀取光碟中儲存的訊息，經轉換後可以成為音樂或影像。半導體雷射的

雷射可以作外科手術、止血、去除色斑和修正視力等。因為進行手術時不接觸傷口，可減少感染。

輸出可以看作是由近似點光源發出來的，因光波的繞射效應而成錐狀，和一般雷射的光束很不一樣。但因光源如同點狀，光錐可以用透鏡平行化，或再聚焦成光點。這光點的大小，除了視原光點的大小之

光電的應用

雷射的原理與應用

外，原光點愈大再聚焦光點也愈大，並受到光波波長的限制，波長要短則聚焦點才能小，現在藍光半導體雷射是熱門的題目。

一張光碟如果以藍光雷射來寫和讀，儲存的節目至少是現有紅光DVD光碟的兩倍長。由此可以了解VCD儲存節目較短的原因，在於是以紅外線半導體雷射讀和寫。

待有一天綠光和藍光半導體雷射都成熟後，配合現有紅光半導體雷射，R(紅)G(綠)B(藍)三原色雷射俱全，就可以在銀幕上投射電影。這時電影的亮度和解析度高，可以在有照明的室內觀賞，畫面較液晶或電漿顯示器大，而價格可能更為低廉，那時家庭電影院就告正式上市了。

在舞台上的表演，常以跳躍的雷射光束來營造氣氛。這時雷射光束要能看得到，所以雷射的輸出要達數瓦，目前以離子雷射為秀場的主角。

雷射光效令人歡樂，但它在戰場上的應用也令人恐懼。世人可能都知道以雷射光導引的飛彈，只攻擊所要摧毀的目標，且一定不會失誤。在戰場上，雷射也可以測距和測速。這些功能也可以用在交通管制上，所以研製武器並不一定是壞事，其效用可以推及日常生活。飛彈是一種令人恐懼的武器，反制之道是以直接摧毀飛彈或照射其尋標器，恰如強光使人目眩而誤失目標，所以雷射武器或反制武器都值得研發。

波灣戰爭和伊拉克之戰，都和石油有關，可見能源是造成爭端的主因。自從了解如何促使氘—氚核融合產生巨大能量，成為恐怖的氫彈後，核子科學家就在設法引爆一連串的微小氫彈，以提供可資利用的能源。努力的方向之一，就是由四面八方同時照射的雷射光，壓縮小型的氘—氚靶球以引起核爆。

半導體雷射可以讀取光碟中儲存的訊息，經轉換後可以成為音樂或影像。

一張光碟如果以藍光雷射來寫和讀，儲存的節目至少是現有紅光DVD光碟的兩倍長。

目前這方法已經證明的確可行，但如何利用小型核爆產生足夠能量以發揮經濟效益，仍是在探索中的問題。這方法給予科學家無限的希望，其原因在於不會產生放射性副產品，要比目前的核能發電「清潔」得多。又何況氘及氚取自海水不虞枯竭，可以解決眼前的能源問題。

基礎科學的研究，帶動了科學及技術的進步。雷射光的純色性及極短脈波等，成為發掘物質新特性的有利工具，在物理、化學、生命科學等方面的貢獻可謂日益重大。科學研究的特性，可以說是解決了舊問題即啟動了新問題，似乎永無寧日，而雷射正可能是解開新課題之鑰。新課題可能要用新功能的雷射來解決，於是新雷射的開發也是永恆的挑戰。

以光纖傳送半導體雷射所發出來的光訊號，已取代以電纜來傳送的電訊號。當然，光纖也組合成光纖，其通訊量、傳訊速度和通話清晰度等，都遠勝電子訊號產生器和電纜的組合。往日台灣在淹水後常話路不通，改用光纖即解決了問題。此外，光纖中的光訊號不會外洩，所以無法偷聽。雷射有線通訊是仍在發展中的科技，日漸多采多姿，當然，其目的在於提升通訊的品質和擴充通訊量。

本文以引起青年人對雷射的興趣為目的，力求簡單易懂。但是有些內容，還是要用到更深入的物理學才能說得清楚。請對雷射有興趣的青年學子，耐心地逐步學習，先培養興趣，作為進一步探討的動力。

劉海北
中央大學光電科學研究所

以光纖傳送半導體雷射所發出來的光訊號，已取代以電纜來傳送的電訊號。當然，光纖也組合成光纖，其通訊量、傳訊速度和通話清晰度等，都遠勝電子訊號產生器和電纜的組合。