

雷射發展史

Laser

黃廣志 教授 美國P.I.B. 電子物理博士

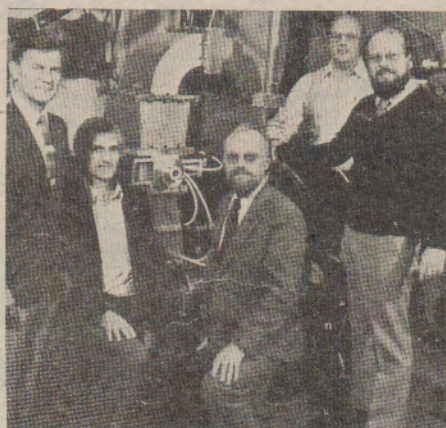
曾任： 電子物理系主任 (62-66年)
交大教務長 (66-70年)

自一九六〇年起，一個新的科學名詞——雷射，很快地被人們使用。它的誕生，為科學界與工業界帶來了新的光明的前途，也將為人類帶來無窮的福祉。

所謂「雷射」(Laser)，乃是藉激發放射的原理產生光的放大作用的一種裝置。其英文全名則是“Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”談到它的起源，遠在一九一七年，二十世紀的科學泰斗愛因斯坦即已導出「誘導放射」(Stimulated Emission)的理論，他認為原子中的能位躍遷，可以利用某種信號使它在自發放射(Spontaneous Emission)發生之前誘導出來，而增加光源之強度。但是原子躍遷過程所須時間通常小於十億分之一秒。在當時要想以如此短的時間來控制原子之躍遷，實為一件非常艱難的工作，所以一直無人繼續研究。

到了二次大戰期間，由於通訊與雷達偵測在軍事上的需要，各國競相開發超短波和微波；而此時在美國以Weber及Townes，蘇聯以Basov及Por-khorov為首所研究原子、分子與無線電波之交互作用現象，也成了熱門的研究專題，其研究成果可謂為雷射被發明之先驅工作。

到了一九五四年，哥倫比亞大學的Townes教授的研究小組利用氣態氦做出了氦氣雷射(NH₃ Maser)，也就是利用「誘導激發放射的原理產生了放大的微波」，當時所產生的微波，其頻率為23.87 GHz (1GHz=10⁹cps)，這就是雷射的起源。



到了一九五八年，Townes及Schawlow再度提出論文，闡述了光波亦可像微波一樣利用誘導激發放射的原理來放大的可行性，二年後也就是一九六〇年的夏天，Hughes研究室的科學家T.H.Maiman利用紅寶石(Ruby)做成世界上第一具「光的射」(Optical Maser)。二個月後，貝爾研究室(Bell Telephone Lab.)的二位科學家，Javan和Sanders利用90%的氦氣和10%的氖氣混合物做活性物質而製造出世界上第一具氣體雷射，吾人稱之為「氦氣雷射」，它也可以產生紅色的光。

至於半導體雷射，則是一九六二年的產物。十多年來，各種不同的雷射紛紛出現，有些在Ultra Violet頻譜內，有些則在可見光領域，也有不少雷射光是在Infrared範疇的，各具特色，其應用亦常相迥異。目前較常見的雷射，約有下列數種，如固態雷射之紅寶石雷射，Nd:YAG雷射(鈦離子“溶於”鋁化鉛石中所產生之四能階雷射)、Nd:Glass雷射(即玻璃雷射)，GaAs二極體雷射；又如氣體雷射中之氦氣氣體雷射、二氧化碳雷射、氦氣雷射、氬離子雷射等；再如液體雷射之Nd³⁺、SeOCl₂液體雷射、以及有機染料雷射(Organic Dye Laser)等。此外，尚有化學雷射，氣體動力雷射(Gas Dynamic Laser)等。

雷射的發展，目前正朝著下列幾個方向進行：

(1)研製更短波長之雷射如X-ray雷射， γ -ray雷射等。

(2)可調頻率之雷射亦為一重要課題，例如染料雷射即屬此類。

(3)高功率、高能量、高效率雷射之研製可謂非常熱門的題目。

(4)利用雷射光作計算機的儲存記憶元件及光學資料處理，亦有不少公司及研究機構積極進行研究中。

(5)雷射光的光學纖維通訊研究乃為電信界所熱中的研究主題之一。

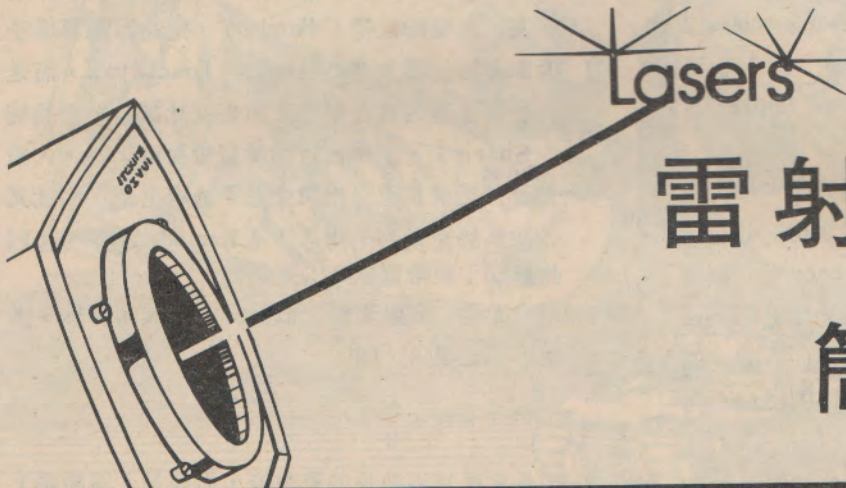
(6)各種「雷射全像術」在工業上「非破壞性測試」之發展與推廣，對工業界必有莫大裨益。

(7)非線性光學之研究，也因雷射之發明，而向前邁進一大步，非線性光學的領域，正如一處豐富的寶藏，正有待科學家去開拓。

(8)雷射之用於同位素分離，可謂即有效又實用。是最值得發展的一大課題。

雷射為一種實用價值很高的元件，已是毋庸置疑之事。科學先進的國家有鑒於雷射所帶來的衝擊，這二十年來，可謂盡全力於其發展上，因此成果輝煌。

我政府近些年來致力於大型建設，全國上下朝氣蓬勃，對精密工業之開發與國防科技的重視，更使人心振奮。其中，有關雷射在國內之發展，亦早已由有關當局鼎力支持，相信不久的將來，雷射將能為國防科學與國防工業帶來新的奇蹟與面貌。



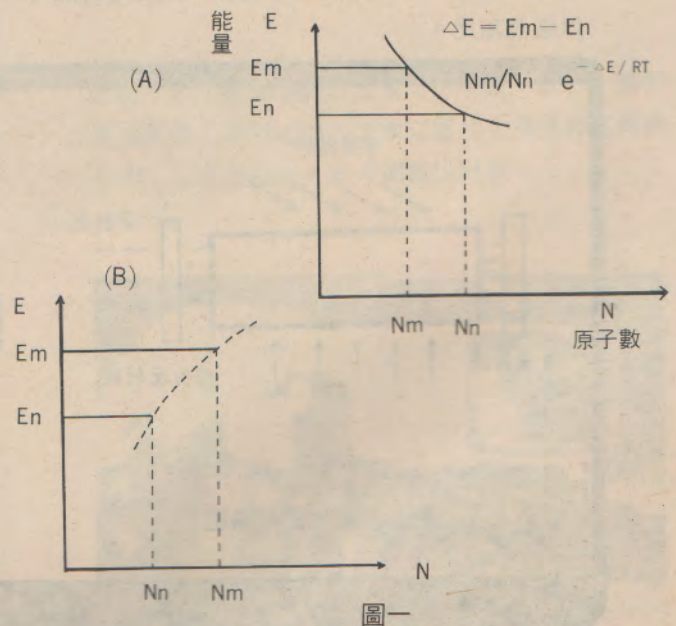
雷射的 簡單原理

由原子物理學、電子力學與統計物理學，吾人得知：(1)當一電磁信號加之於原子上時，原子將有某種反應產生；假如信號之頻率趨近於原子中特許之躍遷頻率時，將會產生共振，此時原子的反應最大。(2)同類原子的集合其總反應與信號之強度以及發生躍遷的兩個能階之原子數之差成正比。(3)在熱平衡之狀況下，高低能階原子數之分佈乃是波茲曼函數，亦即 $N_m/N_n = \exp[-(E_m - E_n)/KT] = \exp[-hf_{mn}/KT]$ ，此處 E_m , E_n 分別為第 m , n 能階之能量，而 N_m , N_n 則為其原子數。 h 為普朗克常數，在光的頻譜裏， hf_{mn} 均遠大於 KT 值，（即波茲曼常數與溫度之乘積）。所以高能階的原子數要比低能階的原子數少得很多很多，亦即 $N_m \ll N_n$ ，此時，物質具有吸收能量和自發躍遷（Spontaneous Emission）之特性。因此，如要產生雷射行為（Laser Action）就必須把能量「幫浦」（Pump）到原子中去，以產生原子數的倒反（Population Inversion），然後再誘導激發放射，方有可能產生雷射光來。圖1所示即說明上述狀況。

況。

(A)熱平衡狀況下， $N_m/N_n = e^{-\Delta E/KT}$

(B)原子數的倒反狀態，此時 $N_m > N_n$



由上所述，吾人獲知，雷射之重要組件應為(1)能符合上段所列三點之「雷射介質」，(2)能產生幫浦作用之結構，以及(3)能將電磁信號誘導入雷射介質並從而引出雷射光之雷磁電路。一般之結構可由圖二所示之。

上圖中之幫浦結構可概略歸納為下列幾種方法：

- (a)光照射法 (Optical pumping) 多用新固體。
- (b)氣體放電法 (Electric Discharge pumping)，多用於氣體。
- (c)化學作用法，多用於化學雷射。
- (d)電子束打擊法 (Electron Beam pumping)，氣體雷射亦可用之。
- (e)高電流衝擊法 (Heavy Current Impact)，多用於半導體雷射。

現在再談談雷射光之特性；雷射光與一般白熾光、日光燈等光源截然不同者，在於雷射光具有高強度，高度方向性、同調性 (Coherence)、窄帶寬 (Narrow Bandwidth) 以及單色光性 (Monochromaticity)。當然，這些性質並非完全獨立的，例如高度方向性與窄帶寬只是同調性的兩個不同角度之觀點而已。

- (1)高強度：雷射光之輸出功率可小至氣體雷射之一毫瓦，也可大別脈波固體雷射之一萬億瓦 (10¹² watts)。高強度乃是誘導激發放射必然的結果，因為每一個原子幾乎在同一時刻放出光子 (photon)，這些光子同相相加，雷射光自然可以強烈無比。

- (2)高度方向性：起初產生之光束，只有平行於光腔 (Optical Resonator) 之晶軸者，才能在兩端鏡片間來回反射，獲取雷射物質之累積放大。因此，輸出之光線將是一種均勻定相的近似平面波。此近似面波經由有天線作用之部份反射鏡輸出，所以具有高度之方向性。

- (3)同調性：同調性乃是光束中各個光波都與其他光波同步，也就是同相 (Same phase) 的意思。

- (4)窄帶寬：這是雷射光的另一特性。普通光源所發出的光包含各種不同的頻率。例如氫光譜是由許多條特定的譜線組成，而每一譜線實際上是分散成某一寬度的波帶 (Band)，這是因為氫原子的本身的能階並非是個別的 (Discrete)，而是許多量子態的混合。但雷射光就比其他光源為純 (Sharp)，因為當誘導激發放射發生時，入射光子只把波長與它相同之光子誘導出來，因此其他波長的光就被「排斥」 (Excluded) 了，也因此形成了頻帶寬極窄的雷射光。

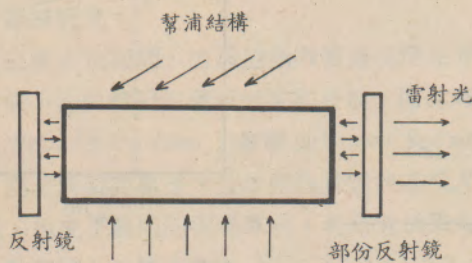
- (5)單色光性：雷射光腔之設計必須使其晶軸長度滿足下式之要求，即

$$l \approx q \frac{\lambda}{2}$$

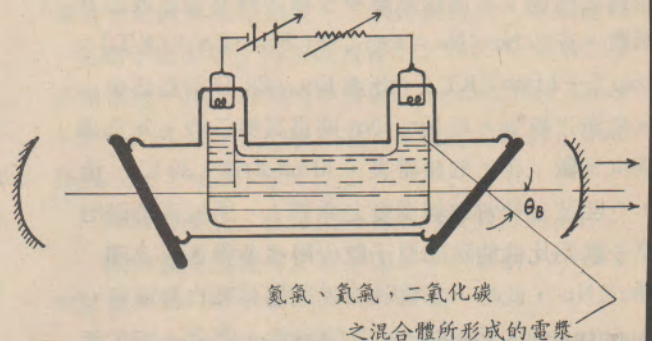
即長度應為半波長的整數倍，而波長 λ 與頻率 f 的乘積為光速，且 f 又等於下式之值

$$f = \frac{E_m - E_n}{h}$$

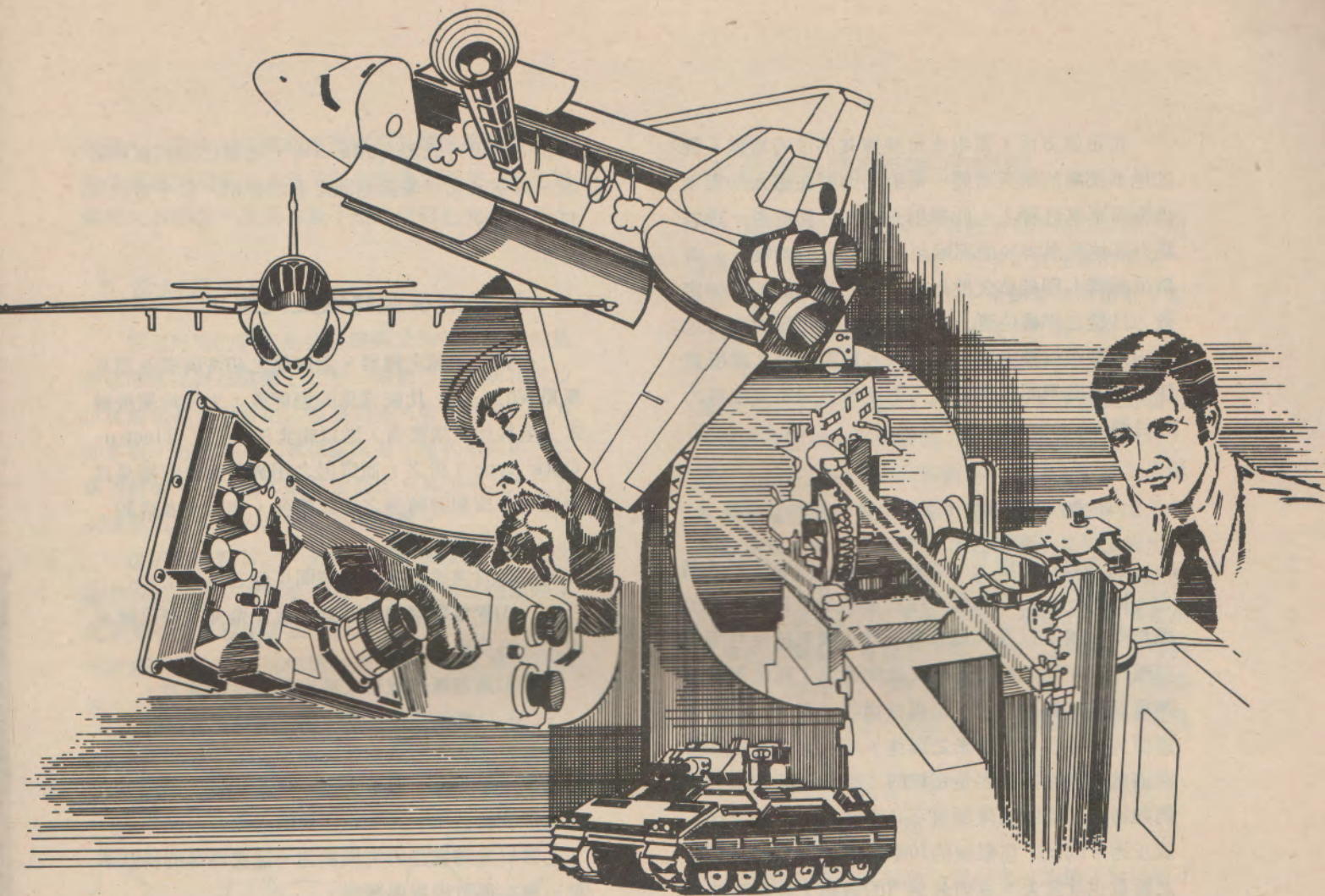
故 λ 與 f 均為定值。雷射光之單色光性因而產生。



圖二 雷射的結構圖



圖三 圖二的實例，以氣體雷射為例 (如 CO₂ Laser)



雷射的應用

1. 測距與定位的應用

雷射用之於測距是相當普遍的。例如雷射作用的直線檢示器 (Laser Aligner)，即可測知飛機跑道、隧道、……等工程是否符合直線要求；又如雷射測距器 (Range finder)，利用雷射脈衝在兩地間來回的時間，可測算此兩地之距離，其準確度在三公里內只有0.5毫米的誤差，這種精密度是一般測距儀所無法做到的。阿波羅八號太空船登月，在月球上安裝了一具反射鏡，利用雷射光來測量地球與月球之間的距離，這也是測距應用的一個實例。在軍事應用上，雷射測距器能使步兵、砲兵或坦克射擊手精確的測出數哩外的敵方目標。在中東石油戰爭，以色列的坦克均裝有雷射測距瞄準器，射擊百發百中，所以把埃及打得落花流水。在越戰時，美軍的精靈炸彈就是用雷射光來瞄準和引發。美國和西德所發展的坦克火力控制系統也有雷射測距器的

裝置。手提式測距器之重量均在十公斤以下，攜帶相當便捷。雷射在軍事方面之應用，為世界各國所重視，所花之財力，亦可謂無以計數。



雷射 laser

在定位方面，雷射亦可發揮其高度的功能，例如地面部隊的砲兵可將一雷射光束射在敵人的重要措施或軍事目標上，此雷射光經由目標散射。設若我方高速飛機與地面部隊早已配合，則飛機上「雷射偵測器」即能感受散射的雷射光的光能，並確定敵方目標之準確位置，於是飛行員即可發射空對地導向飛彈予以摧毀之。近年來，以雷射為基礎所要建立的彈道飛彈防禦系統，更是西方國家積極努力的目標。

2. 通訊的應用

在通訊的應用上，雷射之為載波實有深厚的潛力。回溯一九五〇年代，由於電話系統和電視網的爆炸性發展，以及大量的電子計算機系統擬利用電話線作相互間資料之傳遞，致使電信工程師們對這些電話線、資料連線、電視波道將佔滿整個通訊頻道而大為操心。雷射光之誕生，在理論上適足以解決這些疑慮。其原因是這樣的：根據通訊理論，我們知道通訊訊號之傳輸量乃是與載波的「頻帶寬」成正比。因此，電磁波的頻率愈高，它可傳輸訊號之數量也就愈大。目前最熱門的通訊工具是微波，而雷射光的頻率在微波的十萬倍以上，其可載送訊號數目之多自不難想像。基於上述理由，以雷射作軍事通訊之工具，亦有其不可忽視的潛力。

在長距離之雷達系統，例如測量星球的距離或是偵測敵國洲際飛彈的動向，所使用之信號必須是極為獨特和靈敏的，尤其太空探測中假如使用通常之信號，則其回音將比地面上的雜音更加微弱以致頗難分辨。最佳的解決之道是使用雷射，把反射回來的信號與發射信號混波分析、放大，則遠地方目標的一舉一動將會在銀幕上顯示出來。

在近距離的通訊應用上，雷射之大氣通訊亦有其重要地位。美國科羅拉多大學的電子計算機之資訊作業就是靠雷射光環（Laser Link）以連接各建築物裏的終端機的。

近些年來，有不少科學家正積極致力於光學纖維通訊（Optical Fiber Communication）研究，以減少訊號傳遞時的損失。美國貝爾電話公司作了不少先驅及領導工作。目前經光學纖維之雷射通訊，

其損失率已可低於 1.5db/km，可謂已達到實用階段。雷射之光學纖維通訊之廣泛使用，似乎可以指日以待了。

3. 雷射在迴轉儀上之應用

火箭、飛彈之發展，迴轉儀之研究與製造為其極重要的一環。比較常見的迴轉儀，大致均屬機械式。至於比較精密者，則以電光控制式（Electro-Optic type）居之，而雷射之用於迴轉儀當屬最為理想者。雷射迴轉儀之優點頗多，舉其要者諸如：

- (1)能立即操作；
- (2)對突然的轉向有瞬間反應之能力；
- (3)較他類迴轉儀堅固，即使飛彈起飛或操縱中加速均不影響。
- (4)具有極端敏感之高旋轉速度的能力。
- (5)可測極微小的角度變化等等。

雷射迴轉儀的構想是科學家 Rosenthal 於西元一九六一年提出，而 Honeywell 公司則於西元一九六六年底製造出一具，送往美國海軍部門試用。

雷射迴轉儀之研究與製造，需要高度的科技水準，實在很值得提倡發展。

4. 雷射雷達及雷射之水下應用

雷射雷達與一般之微波雷達，在方式上大同小異，所不同者僅一般的微波雷達之微波發射機與接收機被雷射及光學系統所取代。由於雷射之頻率高，「波寬」窄，故其解析度（Resolution）遠較微波雷達為佳。

雷達用來測量遙遠物體的距離、方向、和速度以及大小和形態。雷射之用於雷達，乃因強力的雷射可測的距離比微波雷達更遠。雷達可測物的大小與波長成正比，十萬分之一吋的雷射光波長，可以測的物體比波長一吋的微波可測的物體更微小。根據計算所示，用二呎寬的反光鏡，十六瓦的雷射光柱，在測量一百英哩以外的物體，其誤差僅為十萬分之一。

雷射之水下應用，其構想乃在意圖以「水下雷射雷達」（Underwater Lidar）來取代「聲納」。

因為，一般所用之聲納或微波都很難偵測到潛藏於海底深處之潛艇。「水下雷射雷達」所用之雷射以發綠光者為佳，蓋海水較不易吸收綠色光的光能。

5. 雷射死光的研究

雷射死光的研究是美蘇兩國公開的秘密，也是美蘇兩國在科技戰場上的另一場競爭。此類雷射乃以高能量高功率雷射之發展為主。最具潛力之此方面雷射，有可能是二氧化碳雷射、氟化氫雷射、碘氣雷射等。以二氧化碳雷射而言，其功率之大已可切鋼裂石，未來的發展實不敢想像。

從另一觀點言之，某些高能雷射確能使遠處之敵方步兵軍服起火燃燒，亦可使敵人的眼睛變瞎；此雖非直接之殺敵方法，但對敵人情緒上之影響則不可謂不深，此則高能雷射用在戰場上之另一功效也。



1. 生物與醫學方面的應用

凡是有機體對不同的單色光有不同的反應。而雷射光乃為最佳的單色光，用來研究生物的構造、組織與功能，可謂非常恰當。生物學家用雷射（如二氧化碳雷射）來研究胚胎的成長即為一例。

雷射光在醫學方面的應用尤多。例如眼睛的水晶體、皮膚、皮下脂肪、肌肉各對某種波長的雷射光無吸收作用，所以我們可以用它來作網膜接合，或殺死癌症細胞。目前外科醫生正致力於研究用雷射光經纖維導光管（Fiber Optic waveguide）來根除膀胱、肺、腸等內臟之癌細胞以及用雷射光來作「無痛手術刀」。前幾年，榮民總醫院有以色列的教授表演雷射刀的外科手術，其所使用之雷射為二氧化碳雷射。有些牙科醫生也已用雷射光來照射牙齒的病態部分，而不傷及健康牙齒。如此治療所需時間只有千分之一秒左右，病人想減痛都來不及呢！

2 化學上的應用

可以聚焦而又單色的雷射光，供給了對於分子構造以及化學反應特性等研討的可能性。而此等研究的結果，必然會影響化學科學的前程。普通化學反應均由熱而引起，化學藥品混合以後，都要靠搖動試管來引起反應，雷射射入一混合氣體之中，可使其中某一氣體發生反應而不影響其他，不像熱那麼容易分散開來影響其他氣體。在研究化合物時，它可針對某一分子使引起反應而不影響其他分子。

3. 光譜學上之應用

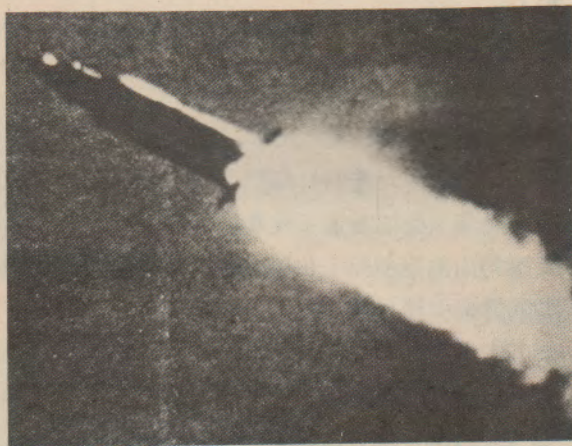
在拉曼散射（Raman scattering）現象中，當一分子受外來光子的撞擊之後，可能有兩法來處理光子的能，它可留下其中一部分的能由其電子系統所吸收，而將其餘的能，由另一光子射出去，因為此新光子的能量較原來射擊光子的能量為小，故其頻率亦低，因此頻率的差便可測量分子的旋轉狀態。

雷射的光供給了一強烈的輻射來產生散射，而使散射之強度達到可測程度。又有一特殊的雷射，

利用激發拉曼散射而產生了不同頻率的雷射光。因此強力雷射由應用拉曼散射可產生各種不同頻率（顏色）的光。

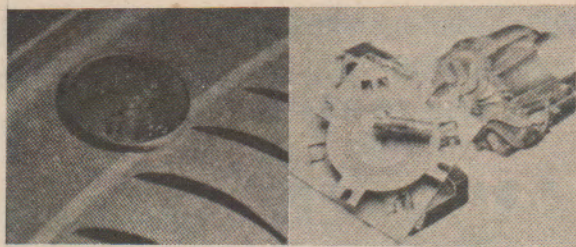
4. 在國防工業上之應用

國防工業涵蓋頗廣，一般而言，雷射均可應用及之，雷射光因強度大且具同調性，可調聚光束於一小面積上，亦即能將能量聚焦於一點，因此可產生區域性的高溫，可用之於熔化、蒸鍍、焊接、鑽孔、割切、加熱等重要的工業程序上。例如在大造船廠裡，可用高功率高能量之雷射（如Nd:YAG雷射或二氧化碳雷射等），從事鋼板之切割、鑽洞、成型或燒焊等工作。此項操作時間可較一般方法為短，且可減少材料的損失與免除成品加工的手續。除了工作效率快之外，雷射操作的費用亦不高昂，堪稱經濟實惠。



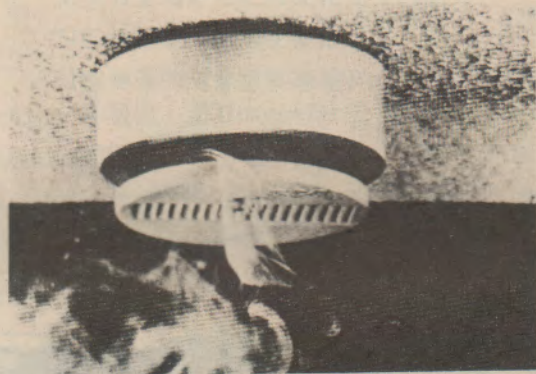
5. 在一般工業上之應用

雷射光用於鑽孔，最早者應屬通用公司（G I），他們是用雷射來作鑽孔穿孔；以古典方法穿孔需費時三天，而雷射光為之只須兩分鐘就夠了。另外，英國有一家製衣公司，名叫Montague Burton，每年有一百多萬顧客來定做西裝，他們就是用自動化的雷射裁衣設備，來完成裁衣工作的。我國的紡織品居輸出總額的首位，國內紡織公司為數頗多，若能採用雷射裁剪機，不僅可以提高生產效率，相信價廉物美可做得更徹底。



6. 環境污染的研究方面

雷射之空氣污染測試，在國外是一極熱門的研究題目，非常實用。雷射光不僅可以測知空氣污染的位置，亦可測知污染的程度。例如某處有臭氧（ O_3 ），二氧化硫，一氧化硫……等物。經雷射光之測試，就可清楚地知曉其量的多寡。台北空氣污染似乎亦頗嚴重，雷射光可在測試上盡力！



7. 成品檢驗方面的應用

Dennis Gabor在一九四九年創立了波前重建理論（Wavefront Reconstruction），而於一九六二年Leith與Upatnieks利用雷射與Gabor理論製造出「雷射全像圖」，從此以後，雷射全像術在檢驗方面之研究與應用可謂相當迅速。利用此方法，就可以比較物體在不同情況下的差異；例如物體的表面受溫度、壓力或外在因素影響所產生之變化，均可用全像術檢驗得知。此外，雷射全像術亦可用之於製造「動儀干涉儀」（Dynamic Interferometer）「全像顯微鏡」（Holographic Microscope），「氈動分析」（Vibration Analysis），「表面等高線測繪儀」（Contour Generation）等等，用途非常之廣泛。

奇妙的光纖通訊

—雷射的新里程

光纖可以避免外界電磁波的干擾，因此其資訊的保密性亦同樣的，較傳統式的電線要好得多。

□ 劉應鎔

一、引言

光纖管對於現在一般通用的電線、電纜等，可以說都有許多更具吸引力的通訊應用。它應用的範圍可以由資訊連接：到辦公室間或城市間的遠距離通訊主幹。這些都是目前正在研究改進中的範圍。以下將概述一些正在萌芽中的光纖技術。另外對於光纖、電纜、光纖通訊的設計裝置及其各項元件，都將作一發展上的回顧。

由於光纖可以避免外界電磁波的干擾，因此其資訊的保密性亦同樣地，較傳統式的電線要好得多。我們可以很容易地以非破壞性的方法來竊聽以電線傳輸的通訊，因為電磁波可以相當容易地進出電線。因此在軍事上，當保密性高的命令要傳送於兩地間時，這種光纖通訊便是一種很好的工具。

二、介紹

我們對於可信賴而又經濟且有大的資料載送容量的通訊媒介的需求，早已刺激我們在遠距離通訊方面的研究。當雷射於1960年初發展成功時，它作為同調性光源的潛力馬上就被發現，而且很熱切地被用到光學通訊上。

首先，光波在大氣及在週期性聚焦元件中傳播，分別在理論上及實驗上研究。同時也在光學儀器及元件，以及在光訊處理技術上作深入的研究。在大氣中的實驗已做出，但其用處却大大地被天氣狀況所限制。同時利用聚焦裝置的高容量系統，一直要到1980年代才具有商業上利用的價值。

第一個將光纖作為遠距通訊媒介的重大建議於1961年提出。然而一直到1970年，20分貝/公里的低損耗光纖才被做出來。從這時起，光纖的發展才迅速而大量的發展下去。

兩個具有代表性的發展就是光訊上的損耗及半導體雷射的可靠性。利用發光二極體(LED)及注入式雷射，光訊損耗在0.8~0.9 um的範圍上已可減低至1~2分貝/公里。在過去十年中，以Al Ga As做的注入式半導體雷射也被大大的改善，其壽命已可達到一百萬個工作小時。

這些上述的發展都是非常令人興奮的，有著高功率的雷射光源與低損耗的傳輸線，才能將光訊傳播至數百公里外，如此才能做廣泛的應用。但目前的各項元件造價仍相當昂貴，在軍事上可作特殊用途之用，諸如將機密訊號由總部送至計算機處理時便可用，而可避免被竊聽的可能性。在一般用途上仍有賴大量製造，發展後以降低售價。

三、光纖維系統的應用

最影響光纖系統的經濟效能的因素就是商業上可購得之光纖的光訊損耗及脈波擴散等傳輸特性。一般而言，低損耗所代表的就是可以有長的中繼站間距，小脈波擴散則代表大的遠距離傳輸信號頻寬。不同的應用可以利用不同的儀器及零件組合。譬如，在同棟辦公大樓中所用的資訊連接系統，所需要的傳輸速率大約在10百萬/秒，其適用距離約為數百公尺。因此，此一系統可以有較鬆的標準，光

纖的損耗可高達 100 分貝/公里，脈波擴散也可大至 10^{-7} 秒/公里，另外 LED 可用作光源，PIN Photodiode 可用作光波檢波器，再加上一些電子儀器以與其他現有儀器相接。

剛才我們提到的是辦公大樓內的光纖短距離通訊時的狀況，而對於市內各電話局間的數公里之遙的長距離通訊，所用的傳輸速率高達 100 百萬/秒時，其要求標準便相對的提高；光訊損耗不得高於 10 分貝/公里，脈波擴散低於數個 10^{-9} 秒/公里，尤其當這數公里間不設中繼站時更要求提高標準。當光纖系統應用到市與市間，長距離，高容量，並以每秒數億次的傳輸速率作數千公里之遙的資訊傳送時，所有的要求又將更嚴謹了。這時光訊損耗必須低於數分貝/公里，脈波擴散須遠低於 10^{-9}

秒/公里。此種低脈波擴散要求便需用單一頻率式光纖 (Single-mode fiber) 或用多頻光纖而此種光行的折射率以漸變的方式來做的。如此當使用於波長為 1.3 微米時，可達到最低光訊損耗及脈波擴散。單頻雷射與高效率 Avalanche photodiode 便是目前為達到此最低標準而努力中的方向。

四、結論

光纖通訊在遠距離通訊上產生了一次徹底的革新，它技術上可行性已經在許多前進的實驗與試驗中顯示出來。這種新技術對於通訊領域上的衝擊，將決定於其與傳統及其他不同系統，如微波通訊等比較時，在經濟上是否能夠擊敗其他系統而在不同的應用上生存。

