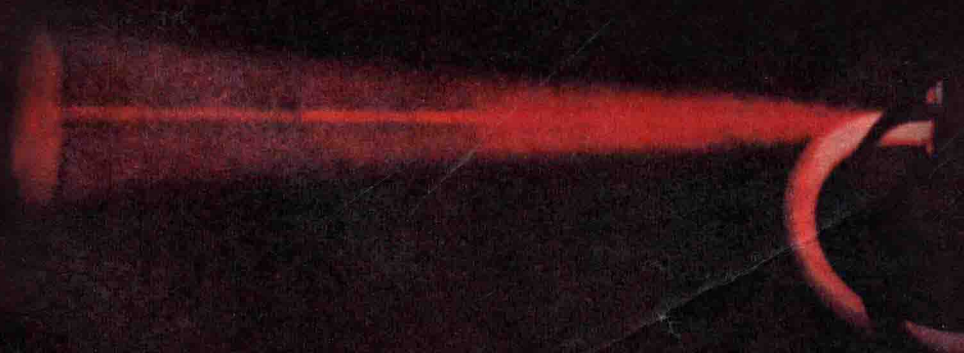


中華科學叢書第三種

雷射與霰射

著者：M. Brotherton

譯者：李 天 培



臺灣中華書局印行

震 射 與 雷 射

著 者 M. Brotherton

譯 者 李 天 培

臺灣中華書局印行

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

雷射與雷射目錄

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

吳序

譯者序

湯序

著者序

引言..... 1

第一章 電、磁和電磁波..... 6

第二章 電子與電子管.....13

第三章 原子和電子的世界.....22

第四章 光子——能量包.....28

第五章 原子能量的階梯.....31

第六章 第一個雷射.....38

第七章 行波紅寶石雷射.....45

第八章 紅寶石雷射及氦-氖雷射54

第九章 半導體接合雷射.....64

第十章 波與波動.....70

第十一章 電磁波發射機.....74

第十二章 雷射的功用及其應用.....78

第十三章 雷射的功用及其應用.....83

索引.....89

封面說明.....紅寶石雷射所放出之光

XXXXXXXXXX

引 言

XXXXXXXXXX

在一九五四年的某一日，哥倫比亞大學的教授和他的學生們成功地，不用一般人用的電子管，產生了無線電波。這一成就震驚了整個科學界。他們所產生的所謂微波，是用一個小小的盒子，裝着少量的氨氣（ammomia）而已。這種氨氣與市面上售賣作清潔用的並沒絲毫不同。自從早年赫爾茲（Hertz）的無線電實驗以來。無線電波的產生都是利用吸取一連串的電子中的能量而來。然而在他們所產生的微波，却是刺激能量而使放射。這能量是原先儲藏在氨氣的分子中的。哥倫比亞大學的科學家們很適當的把這個新的儀器命名為「微波激發放射放大器」（microwave amplification by stimulated emission of radiation），簡稱震射（MASER）。

做為一種通訊工具而言，微波激發放射放大器或許無法與一般簡單的微波放大器競爭。然而其重點在於微波激發放射所顯示的新的放大原理。這使利用原子及分子來儲藏能量繼而使之放射的可能性受到科學界十分的重視，因而在許多大學的研究室中以及工業界，都開始探討新的方法來應用這一原理於短波之產生。

直到一九五九年，操作頻率在電磁波光譜上才向上發展數千百倍而發明了光波激發放射放大器。這種放大器用於放

大光波，其波長僅等於一吋的一小部份。光波激發放射放大器之重要部份爲一活動性的介質，可爲晶體，也可爲氣體或半導體。此介質的兩端爲兩面平行的鏡面，它使光線可在介質內來回反射。介質中的原子在某種條件之下，當光線射到上面就放出更多的光來。當光線在介質中來回反射時，此介質從其原子中放出更多的能量來，所以原來的光的能量因而放大許多倍。如果其中一面鏡子是半透明體，那麼放大後之光便會從鏡中透射出來成爲一道極強的光。

光波激發放射放大器的成就，在歷史上說是第一個可以放大光波的儀器。當我們想到我們已經有了極精密的無線電波放大器，而光波與無線電波均屬於電磁波，不過僅僅頻率及波長不同而已，何以光波激發放射放大器可以用於光波，而別的無線電波放大器便不能用於光波呢？

其中的一個原因是這樣的：光波激發放射放大器可以用於放大光波，而不必使光波變爲一串電子的振盪，此種電子振盪是從前的放大器中必要的條件。三極真空管的發明使無線電走上燦爛之途，然而奇怪的是三極管無法用於某些電磁波，如真空中的振盪是。在無線電接收器中，真正能接收無線電波的不是三極管，而是天線（antenna）。天線把空間的振盪，變爲一連串的電子振盪，電子管然後把電子的振盪放大。由於電子管原理中的特性，它無法用於高週波。因此在沒有別種放大器以前，通訊科學界極爲渴望高週波的應用。

直到一九三八年，一種新的電子管即所謂的克萊斯蘭（Klystron）問世。到一九四九年行波管（traveling wave tube）亦問世。行波管是利用電磁波與一連串電子間之相互

作用而成。克萊斯闢與行波管都省去了變換電子振盪的一步驟，因此可以用於較高的頻率，亦即較短波長的電磁波。

雖然克萊斯闢及行波管的原理使短波的應用技術大為進步，然而它們仍舊無法用之於極高短波或光波，因為無法使電子管的實際部份做得再小，或使電子的速度跑得更快。光波激發放射放大器直接利用原子中儲藏的能量，在原理上是一個大躍進，它打開了利用光波的一條大道。概略的說來，它的應用可以分爲三類：

一、對於純粹科學(pure science)而言，光波激發放射放大器供給一個新的有用的觀點，由此可以研究物體的各種現象，同時光的本身也供給光譜學家研究的直接對象，因為光可以用光波激發放射器來放大。極強的、可以集中的而又是單頻率的光，可以用來引發化學反應，以探討分子中的結構。

二、在製造及組合機械零件時，經光波激發放大器放大後之光，不僅強烈，而且集中，可以用於切斷、穿孔或電焊。

三、通訊用途中，光波激發放射放大器之應用有二途：其一爲雷達，用於探測極小的物體，它可以探測比微波可探測的更細微的部份；其二爲電話、電報、電視等之傳送，光波激發放大器之光線在理論上說是通訊上的一條寬敞大道。

如何使基本物理原理能應用於微波及光波激發放射放大器呢？激發放射原理的發明並非是偶然的。在這一方面，它不像電話那樣是亞歷山大·貝耳在探求一個新的電報方法時偶然發明的。也不像湯姆士·愛迪生偶然發現赤紅的電線會放出電子。也不是像X光那樣，當雷琴發現他放在實驗室中工作桌上的一張底片很神秘的變得很黑。相反的，每一個早

期的微波及光波激發放射放大器，都是先由理論上推測出來的。它們都證明了基本物理理論的驚人準確性，並說明了如何使一個有企業和幻想頭腦的人，可以利用科學的原理而在實際上有所成就。

同時，激發放射原理的發明，也說明了電子科學及技術上的一條新路線。我們將會更接近於物體內部原子構造的探討，從而發明或改進新的儀器。十九世紀電子世界初創之時，發明家並不要明瞭物體的內部結構，例如莫斯的發明電報，貝耳的發明電話，愛迪生的發明電燈，都不必要知道何謂電流。相反地，電晶體的發明是由於發明者已熟悉電子在半導體晶體中的一切特性。同樣地，核子物理中如果沒有理論的依據，是無法理解何以核子分裂時會具有如此巨大的能量。總之，在古代的偶然發明中，先發現新的現象，然後來解釋何以如此。激發放射原理代表了新的思想方法，那是先預測會產生什麼結果，然後走進實驗室去證明它。

或則我們會覺得驚奇，激發放射的物理現象在它被發明以前，早為物理學家們所已知。例如愛因斯坦在一九一七年已經預測原子可被激動而放射，而且光譜學家們也早知原子可以儲藏能量或激發放射微波能量。那麼何以第一個微波激發放射放大器沒有在以前，而直到一九五四年才問世呢？

沒有人真正知道為什麼科學的進展一定要到一個特別的時間和特別的地方，但是我們知道那是必須要等到某一個人，能把所有的重要因素融會貫通之後，才向前邁進一步。無論什麼頻率，用何種物質，或外形如何，激發放射的原理有三個基本因素，哥倫比亞大學的科學家們首先把這三個基本因素

融在一起，因此發明了歷史上第一個微波激發射放大器。
以下讓我們來研討這三個基本因素是怎樣被發現而被應用於
科學界的。

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

第一章 電、磁、和電磁波

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

簡單的說來，光波激發放射放大器是一種新式的電磁波發射機。如同其他的發射機(generator)一樣，只是其中之一環而已。人爲的發射機包括火焰、電燈、霓虹燈、X光以及雷達、無線電及電視站所用的發射機等，至於自然的發射機有太陽、螢火蟲和放光魚等等。無論上述的各式各類的發射機外表有何不同，都是利用同一的電與磁的基本原理。爲了易於了解光波激發放射之原理，首先讓我們複習一下電與磁的基本性質。

假定真空中有一電荷(electric charge)，它可能爲正電荷，也可以爲負電荷。任何一個真空中之電荷都產生一電場(electric field)，假定附近有任何其他的電荷，則此電荷即受電場的力，同性相斥，異性相吸。

讓我們再假定讓一電荷繞一圓周而行。運動的電荷即形成電流。電流沿其運動路線的週圍產生一磁場，此磁場即對任何磁性體有力。其力是斥力或是引力當視電荷之正負及其繞行之方向而定。這一定律相反亦真，即一磁場圍繞電荷而行，可使電荷運動而產生電流。此即爲發電機之原理。如果我們進一步使電荷振盪，則其電場與磁場同時振盪，在適當的條件之下，電荷能量放射出來，電磁波由是而生。

在這裏先追述一段電磁放射性發現的歷史，這要從十八世紀中葉說起：

遠在十八世紀中葉，絕緣體可以儲藏電荷的實驗早已爲人所知。在一七四五年，荷蘭萊登大學的范·莫斯汗布魯克 (Van Musschenbroeck) 示範用兩塊絕緣板(insulator)靠得很近但不相碰時，可以儲藏大量的電荷，比用一塊多得多。萊登瓶就成了它的名字，這也就是今日電容器 (capacitor) 的鼻祖。

當萊登瓶的一端用導線連接起來，去碰另一端，則有放電的現象。有時這種放電是極暴烈的，有的實驗家用萊登瓶的放電來殺鳥，並且用來承歡法國宮庭的士女們。佛蘭克林發現他可以串聯好幾個萊登瓶來殺死一隻雞，他曾想用來殺一隻火雞而未成功。後來佛蘭克林成功的做了一次雷電時放風箏的實驗，他把風箏的一端繫在萊登瓶上，不久他發現萊登瓶充滿了電，因而證明閃電是由於電荷的緣故。

雖然這些發明鼓勵了後來許多對電的實驗，而且那時的科學家已經知道關於電容器的許多特性，但是對於放電現象所隱藏的基本原理並沒有任何表明。這些基本原理一直隱藏到十九世紀的中葉。

那時候，在“電子”這個名詞發明以前約二十多年，對於電的基本性質並不比佛蘭克林時代的人知道得多。不過對於電的運動却知道得很多了。大約在1786年，離開電容器的發明約有四十多年，意大利的生理學家加文尼 (Galvani) 發現，當他把一隻青蛙懸在兩塊相接的不同的金屬上時，青蛙的腿部肌肉會突然跳動。接着意大利的物理學家伏特 (Volta) 做了許多類似的簡單的用化學方法來產生電的實驗。他把銅

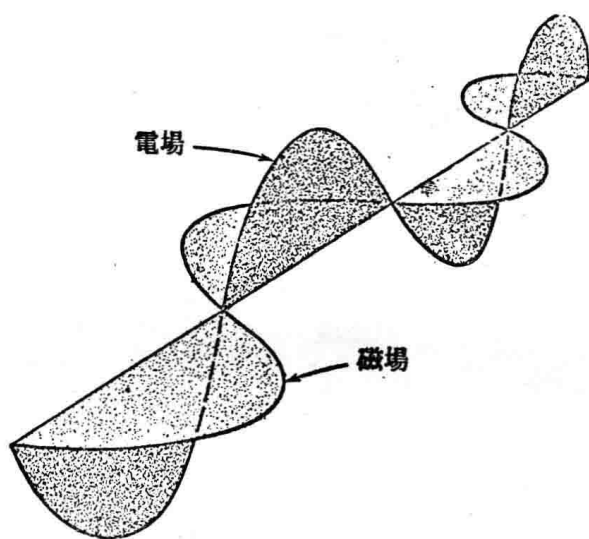
和鋅片懸在酸性溶液中而產生了第一個電池，這是第一個可以產生固定電流的儀器。這是一個鉅大的進步，因為從此以後，對於電的實驗，可以用一個固定的電源來代替用摩擦生電和用電容器。

廿年以後，歐斯特 (Oersted) 在做用導線輸導電流的實驗時，發現電流可以產生磁場的現象。因此電和磁的關係互相連接起來。不久以後，安培 (Amperé)，亨利 (Henry) 和法拉第 (Faraday) 繼續實驗而建立了電和磁之間相互關係的許多定律。

一八五三年，蘇格蘭的物理學家柯爾文 (Kelvin) 做了一項演算，他說明理論如何可以預測事實，這些事實常被實驗家們所忽略的。在那時候電磁學的許多定律都已熟知，事實上已經應用於莫斯 (Morse) 的電報上，而且正在應用於發電機上，但是雖然對於磁場運動生電的事實懂得很清楚，還沒有人能預知有電磁波存在的可能性。

柯爾文把電容器放電時的電場與磁場寫成許多方程式，他發現在某種條件之下，這些方程式的解答顯示，電荷必定在不停的振動。在放電時的一瞬間，電流於電容器的兩極間衝擊數千次，因此電流對電阻做工，所有的能量全消耗為熱。這是第一個振動電流的觀念，也就是無線電 (radio) 傳送的關鍵。這一觀念使科學的成就更向前躍了一大步。

到一八六四年，蘇格蘭的數學物理學家馬克斯威 (Maxwell) 推論，在柯爾文的電容器實驗中，並非所有的能量全消耗於熱上，而有一小部份能量放射於空間形成電磁能量的波。他繼續下去終於完成了他驚人的理論——電磁波 (elec-



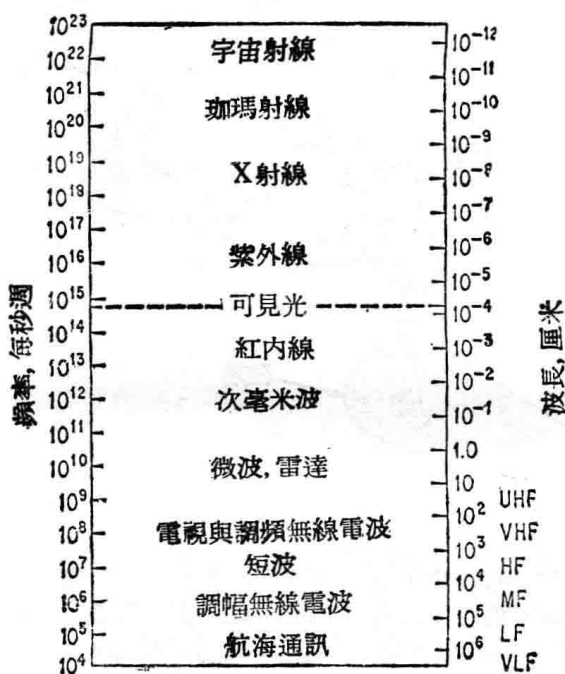
(圖一) 電磁波由一振盪的、互相直交的電場及磁場所形成，此圖所示之波為極化波，亦即其振盪方向僅限於所示之二平面以內。

tromagnetic wave)。

大約四分之一世紀以後，在一八八七年，馬克斯威死後的第八年，荷蘭物理學家赫爾茲 (Hertz) 在實驗上證明了馬克斯威的理論，他用振動電流真正產生電磁波。他更證明電磁波有反射、折射和極化的特性，正如同光波一樣。

因此，馬克斯威與赫爾茲無疑地建立了光具有電磁波的特性，今天我們知道所有的無線電波、光波、紅外線、紫外線、X光、 γ 光及宇宙射線，都是屬於電磁波。

如圖一所示，一連串的电磁波，其最簡單的形式，是由一個振盪的電場和一個同時振盪的磁場所組成。我們注意到有三種基本方法來區別不同的電磁波：第一、他們可以有振幅(amplitude)的不同，這即是電磁場力的大小，第二、他們可以有頻率(frequency)的不同，也即是每秒鐘振動的次



(圖二) 電磁波光譜表

數，第三、他們可以有波長的不同，波長即是波的兩峯或兩谷間的長度。

如果我們假定所有的波都在同一的速度下運行（光速），那麼頻率與波長正互相成爲反比例：波長長的波頻率低，而波長短的波頻率高，因此用波長或用頻率來表示波的特性是一回事。

圖二表明電磁波譜，同時用頻率及波長來表示的。大體說來，波譜可以分爲兩個大區域，上面的一區是由物理學家們來研討的，尤其是原子物理學家及光譜學家們。下面的一區是與通訊學家及工程師們所特別有關係的。

物理學家們喜歡用波長來表示放射線；他們用 Angstroms（一厘米的一億分之一），或用 microns（一米的百萬

分之一) 或用 millimicron (一厘米的千萬分之一) 爲單位。或用一種單位叫做波數 (wave number), 即爲頻率的倒數。但是通訊工程師們願意用頻率, 他們用一週 (cycle), 千週 (kilocycle) 百萬週 (megacycle), 十億週 (gigacycle), 兆週 (teracycle) 等等。爲了不使讀者們感到換算單位的不便起見, 本書用週爲頻率的單位, 而用厘米爲波長的單位。我們用十位指數法, 所以 1,000,000 用 10^6 , 而 $1/1,000,000$ 用 10^{-6} 來表示。

再參看圖二, 電磁波譜內頻率 30,000 週或波長 10^6 厘米起到頻率 3×10^{22} 週或波長 10^{-12} 厘米。看來波之不同僅僅在於頻率或波長之各異而已。然而我們身體的感官對不同頻率的波便有不同的感覺, 同時在科學的應用技術上, 他們也就各有不同了。

在光譜的最上層是宇宙射線, 它可以通過人體而無所障礙一直到地球的內部。其次是 γ 光, γ 光如有適當的強度, 照過人體後會有使人疲倦的影響。X 光用來透過肌肉照到人體內部, 而紫外線可使皮膚灼焦。

再次是可見光的部份, 在光譜上只佔極小的一部份, 他使生物生長, 有了可見光我們才見到世界上各種形形色色, 再次是紅外線, 由此我們感覺到熱。再往下是尚未發掘出的次毫米波 (submillimeter wave), 本書後面當再敘述。最下層是波長比較長的無線電波, 已經在通訊上很成功的應用了。

所有這些頻率或波長各異的波, 都有一個共同的起源: 他們都是由於振動的電荷, 正的或負的, 或不同的振幅, 或由於不同的原子或分子的運行有不同的振動方式。在光波激

發射放大器中，此電荷是帶負電的電子，在下章我們再討論它。

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

第二章 電子與電子管

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

不容疑義的，我們可以說電訊的進步，是由於利用電子活動的新方法的進展而向前推進的，這在三極電子管(triode) 克萊斯蘭管(Klystron)和行波管(traveling wave tube) 這些主要的進步方面是如此的。當然在雷射方面也是一樣。

電子的本身是不變的，所不同的是他們被應用的方式。用在雷射中的電子與我們日常電線中供給電力的電子，或電話線中的電子，以及在收音機或電視機中電子管內的電子，並無絲毫不同之處。從電子的立場來看電線、電子管或雷射，所不同的僅在其周圍的環境及所加能量的方式各異而已！

現在我們來看看電子在電線中是如何運動，在電子管中又是如何運動？然後我們再討論在電子管中的電子及在雷射中的電子，不過首先略述一下電子的本身。

因為我們要討論許多關於電子的活動，我們希望能說明電子是什麼或者電子像什麼。電子，除開它微小的質量不計以外，幾乎完全是電。恐怕它不像我們日常生活中可見到的任何東西，即使把電子放大到像棒球那麼大，我們不敢說會看見它。然而，相反地我們對電子確有一個十分正確的觀念。的確，在不可見的事物中，沒有任何其他的事物，其存在及

其特性能像電子一樣在理論及實驗上那樣建立得完全。

我們知道電子是負電荷的最小不可分的單位，它也是世界上最小的東西。即使我們把電子放大五百萬倍，它還不及一粒微塵。電子的數目可又多得驚人。愛丁頓 (Sir Arthur Eddington) 曾經估計宇宙中的原子數是1的後面加上76個0。電子既是構成原子的成分，它的數目當比原子還多得多。我們也知道在我們的星系之中，這極微小的負電荷包 (packages of negative electricity) 是被「拘留」在原子中的。電子，如同衛星一樣，圍繞在帶有正電荷的原子核的周圍。

以後我們會了解這些被拘留的電子如何在雷射中工作。目前我們先討論那些不受原子拘禁的電子（特別是在金屬中的），他們可以不拘束的自由活動。在電線中流動的電子即是這種自由活動的電子。

多數物體中的電子是極牢固的依附着原子而不活動的，除非受了極大的電力。相反地，導電的物體，如銅，有很多的電子，它們並不依附原子而是可以自由活動的。

導電的電線可比作一條細管子，其中充滿了無數的自由電子，由於熱的激動以及相互的排斥力，這些電子極不規則的向各方急急忙忙的跑來跑去，活像一羣在廚房中的蒼蠅一樣。每個運動的電子都產生電流和磁場。可是因為向某一方向運動的電子數目極可能與相反方向運動的電子數目相同，所以最後的電流或磁場相消而等於零。這就是為什麼一條銅絲不具電和磁性，雖然其中却有千百萬的電流和磁場。

為使電流替我們做工，我們必須使電子有秩序的運行，