

二極體雷射特性測量

【目的】

1. 認識二極體雷射的原理和特性，並繪製二極體雷射的 P-I 曲線，找出閾值電流 I_{th} 。
2. 利用光柵非正向入射的第 8 階繞射，測量二極體雷射的波長 λ 、 $\frac{\Delta\lambda}{\Delta T}$ 、 $\frac{\Delta\lambda}{\Delta I}$ 。
3. 利用檢偏鏡找出二極體雷射光的偏振性
4. 利用光度計繪製二極體雷射光的遠場光場分布，算出發散角 θ_{\perp} 、 θ_{\parallel} 。

【原理】

一、雷射產生的基本過程

雷射 (LASER) 是由 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 五個英文字的首字母組合命名的。它的意義為：藉著受激放射 (stimulated emission) 的方式，使得光產生放大。因此雷射又稱為激光。

雷射組成的三個要素為：(1) 活性介質 (active medium) — 具有居量反轉 (population inversion) 特性的介質。(2) 幫浦能源 (pumping sources) — 提供能量使得處於低能階的原子或分子被激發到高能階，以使原子數目分佈達到居量反轉。(3) 光腔 (optical resonator) — 放射出來的光可重複來回地在活性介質內傳播振盪，這種過程又可稱為光程反饋 (optical feedback)。

1. 活性介質

一般的材料都會吸收入射光波，使得光強度因而減弱，這種材料稱為被動材料 (passive)。但有些材料若被適當的能源所激發後，就具有將入射光波放大的能力，所以稱為活性介質。雷射就是使用這種活性介質來產生雷射光。

雷射材料的種類很多，依照所使用的活性介質型式可分為：

① 氣體雷射 (Gas laser)：所使用的活性介質有 He-Ne 混合氣、氫離子、 CO_2 -He- N_2 混合氣等。

② 液體雷射 (Liquid laser)：所使用的活性介質有染料 RB (Rhodamine B)、染料 Rhodamine 6G、染料 Arcidine red 等。

③ 固體雷射 (Solid laser)：所使用的活性介質有稀土族、紅寶石、鉍石榴石晶體、鉍玻璃等。

④ 半導體雷射 (Semiconductor laser)：所使用的活性介質有 GaAs、InGaAsp、GaAlAs 等。

2. 幫浦能源 (激發源)

幫浦能源是用來供給活性介質，使它能滿足居量反轉的條件。能量的形式隨著活性介質的不同而有所不同，大致可分為電幫浦和光幫浦。

① 電幫浦

電幫浦通常使用在半導體雷射和氣體雷射，利用電源供氣器，使得活性介質被激發到較高能階的激發機制 (excitation mechanism)。就氣體雷射而言，大都利用直流或射頻放電來激發氣體原子或分子。半導體雷射則是利用電流供應器。

②光幫浦

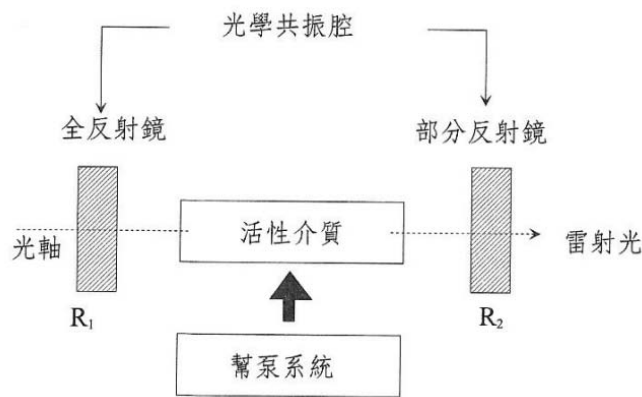
光幫浦通常使用在液體雷射和固體雷射，利用光源將活性介質激發到高能態，稱之為光幫浦。對液體雷射而言，利用閃光燈或雷射光照射活性介質。而固體雷射則利用弧光燈或強力閃光燈。

3. 光學共振腔 (optical resonant cavity)

如果沒有光腔使得自發輻射出來的光能重複地來回在活性介質內傳播振盪，雷射充其量僅可看成頻率較窄的光放大裝置而已，而無法輸出較純單色且極平行的雷射光。

所謂共振腔是指特定波長的波在長度固定的腔體內共振。因為腔體的兩端是共振的節點，所以波共振時，腔體長度必須為半波長的整數倍。當波動為電磁波時，稱為光學共振腔。

如圖一所示，為最簡單的光學共振腔構造，是由兩塊平面反射鏡所組成，活性介質置於腔內， R_1 為全反射鏡， R_2 為部分反射鏡，沿兩鏡面公共法線（光軸）往返行進的光，可以多次通過活性介質來誘發在介質內處於激發狀態的粒子，使得光能屢次增強。當這種光增益作用足夠強，以致於能抵償各種腔內的損失與部分反射鏡的透射損耗時，就可以形成持續的振盪。而由部分反射鏡 R_2 透射出的振盪光能，就稱為雷射光。



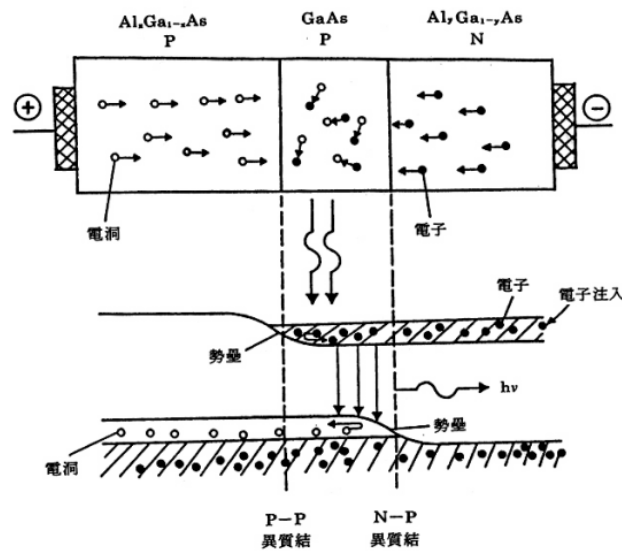
圖一 雷射光學共振腔

二、二極體雷射 (Diode Lasers) 概述

二極體雷射是目前最小、最輕、最堅固、效率最高、壽命最長、最容易調變的雷射。

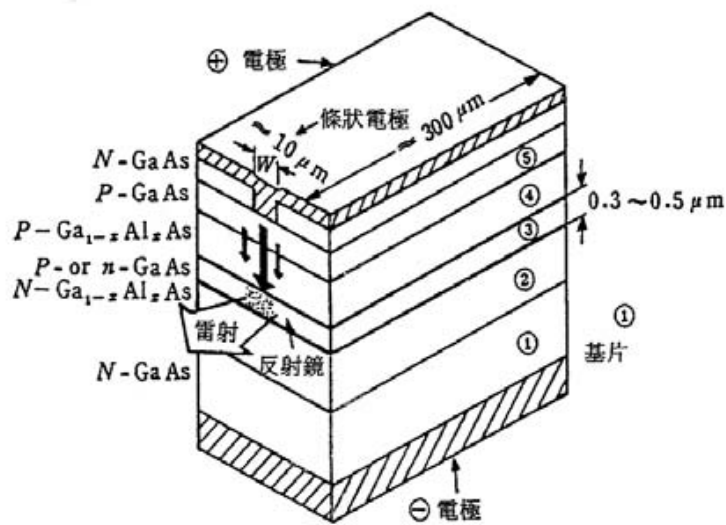
1. 發光原理

如圖二所示，對特定的二極體作順向供電，可強迫 N 型半導體中的自由電子進入「空閥區 (depletion region)」(電子被激發到導電帶)，當電子與空閥區中的電洞 (Hole) 結合時 (電子返回價電帶)，即釋放出 $h\nu$ 能量的光子。在順向電流小時，空閥區中的自由電子數量少，未能滿足「反轉分布」的要求，此時二極體界面內的發光不足以產生「受激輻射」，其行為如同 LED。但當順向電流大到足以滿足反轉分布時，二極體界面內才有雷射光輸出 (發光效率明顯上升)，這就是二極體雷射工作於閾值電流 (threshold current) 以上的原因。



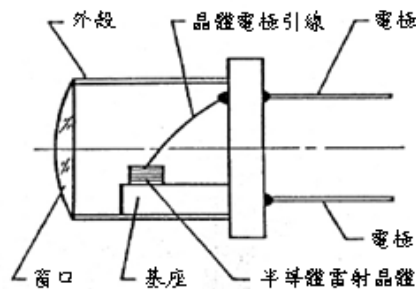
圖二 二極體雷射的發光原理圖

二極體雷射光的波長由導電帶與價電帶間的能隙 E_g 近似決定，改變半導體中各摻雜物質的成份，即可經由改變 E_g 來控制二極體雷射光的輸出波長。圖三為‘雙異質結構 (Double Heterostructure; DH) 半導體雷射’的結構示意圖，其中第三層為雷射的工作區，此層的前後兩個晶面即為此雷射的平面共振腔。



圖三 雙異質結構半導體雷射的結構示意圖

圖四所示為常見的商品化二極體雷射的結構形式，它的大小有如一個小功率電晶體。其使用相當方便，只要將電源與雷射的兩個電極接上，就有雷射從窗口輸出。

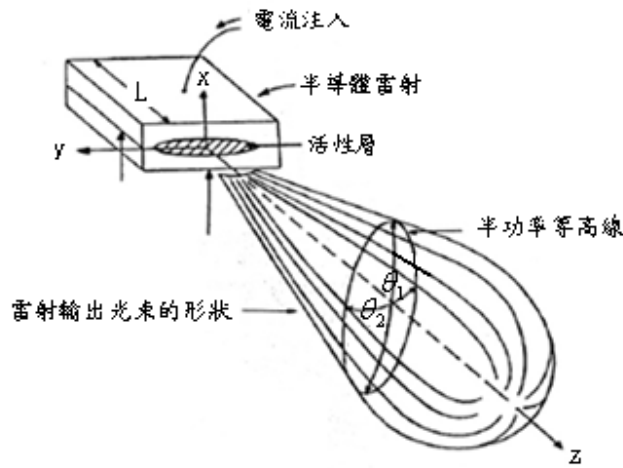


圖四 二極體雷射結構圖

2. 特性

(1) 振盪模式

由圖三知：二極體雷射光共振腔的發光區域為長方形，使得二極體雷射光束的發散角比較大，尤其是共振腔的高度與波長相當或共振腔高度比波長短時，所產生的繞射現象最為顯著，於是雷射光束的發散角相當大，大約在 $10^\circ \sim 40^\circ$ 之間，呈直立的橢圓形，如圖五所示。這種光束發散現象與一般的雷射完全不同，必須在其輸出端設置專用的整形與準直光學元件，才能得到圓形且平行的光束。

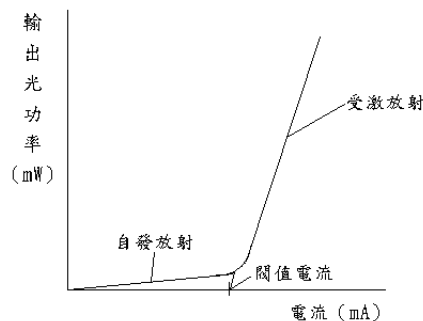


圖五 二極體雷射輸出光束的形狀

二極體雷射光束的發散角定義為 $\frac{1}{2}$ 峰值光強（發散角角度為全角度），垂直二極體雷射‘結平面’（PN 接合面）的是快軸發散角，以 θ_{\perp} 表示，平行二極體雷射結平面的是慢軸發散角，以 θ_{\parallel} 表示。

(2) 閾值電流（臨界電流）

所有雷射都有一個共同的特點，其活性介質必須滿足居量反轉的條件，才能有雷射作用。同樣地，當注入的電流必須大於某一個程度時，亦即須滿足居量反轉條件，才會輸出雷射光，否則只是自發輻射的非同調光而已。這個特殊的注入電流就稱為閾值電流（threshold current），如圖六所示。圖中的斜率愈陡峭，表示效益愈高。



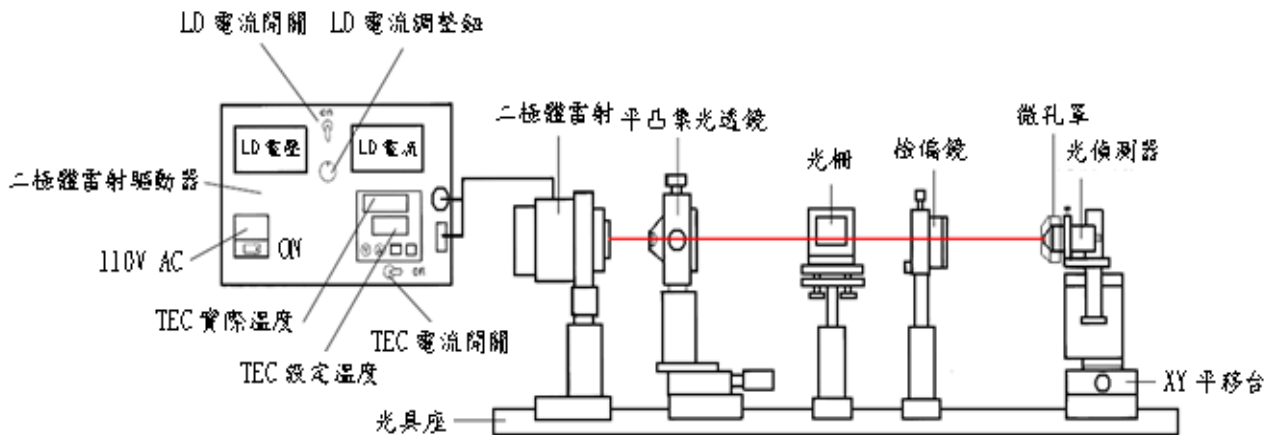
圖六 輸入電流與輸出光功率的關係

(3) 調制特性

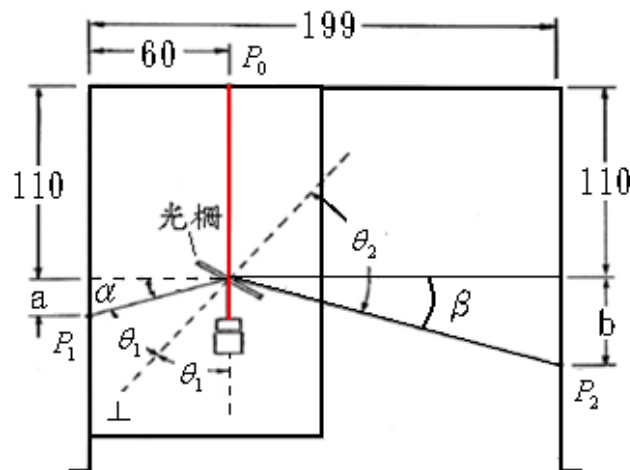
二極體雷射的最大特點之一，就是直接由電流高速調制其輸出光的強弱。由圖六可知，在閾值電流以上，輸入電流與輸出光功率之間大都呈線性關係，所以二極體雷射可以採用類比或數位方式來調制輸出光的強弱，省掉了許多昂貴的聲光或電光調制器。

【實驗器材與裝置】

二極體雷射驅動器、二極體雷射（含 TEC 晶片）、 $f=3.1\text{ mm}$ 平凸集光透鏡、光柵（300 條/mm，已安裝於架上）、檢偏鏡、光偵測器、0.3 mm 微孔罩、光度計（OPTOMETER S380）、XY 平移台、光具座、捲尺、45 cm 直尺、平面鏡



圖七 二極體雷射實驗裝置圖



圖八 光柵放置圖

【注意事項】

1. LD 對工作電流的上升與下降，在通過閾值電流時非常脆弱，所以在電流大於閾值電流時，絕對不可將 LD 電流開關直接 On 或 Off，且 On 或 Off 前必須將電流調到最小值。
2. LD 對電壓脈衝耐受性非常差，在接通或切斷 AC 電源之前，要確認 LD 電流開關在 Off 位置。
3. LD 對工作溫度敏感，工作溫度絕對不可高於 30°C 。
4. 80mA 以上的測量，動作要快，測完 120mA 後，驅動電流立刻降回 80mA。

【實驗步驟】

1. 二極體雷射的開機

- (1) 參考圖七的實驗裝置圖，確認 LD 電流開關在 Off 位置，確認 LD 電流調整鈕逆時針轉到底（LD 電流 $< 15\text{mA}$ ），確認 TEC 電流開關在 ON 位置。

(2) AC POWER ON，TEC 溫度設定在 20°C，待 TEC 實際溫度穩定到達 20°C 後，將 LD 電流開關 ON。

註：按 TEC 溫度控制器上的 MODE 鍵，再利用左側▲、▼鍵設定溫度，再按 MODE 結束設定。

(3) 順時針緩慢轉動 LD 電流調整鈕，使 LD 電流為 80mA。

2. 測量 LD 的波長 λ 、 $\frac{\Delta\lambda}{\Delta T}$ 、 $\frac{\Delta\lambda}{\Delta I}$

(1) 光具座上放置二極體雷射和 $f=3.1$ mm 平凸集光透鏡。

(2) 調整平凸集光透鏡，使二極體雷射光收集成平行光；參考圖八的實驗佈置，使光路徑平行桌面及隔間木板，光路徑與隔間木板相距 60 cm。

(3) 放入光柵，光柵中心距前隔板 110 cm，調整光柵高度、俯仰角度及 z 軸角度，使光柵反射及繞射的光點同高，即光點軌跡平行地面。

(4) 將 TEC 溫度調升到 25°C。

(5) 旋轉光柵使反射光點落在圖八中的 P_1 點（距前隔板 120.5 cm），由 P_0 點（ $m=0$ ）開始向右數到第八個繞射光點，即 P_2 點（ $m=8$ ），將其位置標記於紙上，量取並記錄 b 的長度。

(6) 利用下列公式計算波長

入射角 $\theta_1 = \frac{90-\alpha}{2}$ ，繞射角 $\theta_2 = \theta_1 + \alpha + \beta$ ，繞射光滿足反射條件時—譜線最亮

$$m\lambda = d \cdot (\sin\theta_1 + \sin\theta_2), m=8, d = \frac{1}{300} \text{ mm}, \tan\alpha = \frac{a}{60}, \tan\beta = \frac{b}{139}$$

(7) TEC 溫度每次下降 5°C 至 5°C 止，待溫度穩定後，重覆步驟 (5) 和 (6)。

(8) 以溫度 T 為橫軸（代表 ΔT ），波長 λ 為縱軸（代表 $\Delta\lambda$ ）作圖，求出斜率 $\frac{\Delta\lambda}{\Delta T}$ 。

(9) TEC 溫度設定在 20°C，改變二極體雷射驅動電流，由 110mA 起，每次減少 10mA 至 70mA 止，重覆步驟 (5) 和 (6)。

(10) 以電流 I 為橫軸（代表 ΔI ），波長 λ 為縱軸（代表 $\Delta\lambda$ ）作圖，求出斜率 $\frac{\Delta\lambda}{\Delta I}$ 。

3. 改變 LD 的工作電流 (I)，測量工作電壓 (V) 和輸出功率 (P)，並計算發光效率 (η)

(1) 設定 LD 工作溫度為 20°C，驅動電流為 80mA。

(2) 開啟光度計並設定在工作狀態（操作步驟寫在機殼上）。

(3) 光具座上放置二極體雷射和光偵測器，光偵測器裝在 XY 平移台上，取下光偵測器上的 0.3 mm 微孔罩，調整 XY 平移台，使光偵測器前沿儘量靠近 LD 後固定位置，再調整 XY 旋鈕，使光度計讀值最大。

(4) LD 驅動電流由 15mA 起，每次增加 5mA 至 120mA 止，記錄工作電壓 V 和光度計讀值 P 。

(5) 以工作電流 I 為橫軸，輸出功率 P 為縱軸作圖，繪出 $P-I$ 圖，找出 LD 的閾值電流 I_{th} 。

4. 測量 LD 的偏極特性與 $f=3.1$ mm 平凸集光透鏡的光穿透率

(1) 將 XY 平移台後退，平凸集光透鏡放在 LD 前，調整平凸集光透鏡，使二極體雷射光收集成平行光，並落在光偵測器的中央，即讀值最大。

(2) LD 驅動電流由 60mA 起，每次增加 10mA 至 120mA 止，記錄光度計讀值 P 。

(3) 步驟 3. 為未通過平凸集光透鏡的 LD 光強度 P_0 ，步驟 4. 為通過平凸集光透鏡的 LD 光強

度 P ，將相對應的數據找出來，並計算穿透率 T 。

(4) LD 驅動電流設定在 80mA，檢偏鏡放置在光偵測器前，轉動檢偏鏡使光度計讀值最大，記錄 $P_{//}$ 和檢偏鏡偏振方向，檢偏鏡轉 90 度會使光度計讀值最小，記錄 P_{\perp} 。

5. 測量 LD 的遠場光場分布，算出發散角 θ_{\perp} 、 $\theta_{//}$ 。

(1) 設定 LD 工作溫度為 20°C，驅動電流為 80mA，光偵測器前套上 0.3 mm 微孔罩。

(2) 移開平凸集光透鏡，移動 XY 平移台，使微孔罩前沿與 LD 相距 15mm，調整 XY 平移台上 XY 旋鈕，使光度計讀值最大，記錄 X_0 、 Y_0 、 Z_0 、 I_0 。

(3) 轉動 XY 平移台上 X 旋鈕（垂直桌面），直至光度計讀值 $< \frac{I_0}{10}$ 止，以此為起點，每次移動 0.5 mm，記錄光度計讀值，直到光度計讀值再次 $< \frac{I_0}{10}$ 止。

(4) 將 X 移回 X_0 ，轉動 XY 平移台上 Y 旋鈕（平行桌面），直至光度計讀值 $< \frac{I_0}{10}$ 止，以此為起點，每次移動 0.5 mm，記錄光度計讀值，直到光度計讀值再次 $< \frac{I_0}{10}$ 止。

(5) 分別以 X、Y 為橫軸，光度計讀值 I 為縱軸作圖，繪出 $I-X$ 和 $I-Y$ 分布曲線圖，再由圖形估算出此 LD 在快軸與慢軸上的發散角 θ_{\perp} 、 $\theta_{//}$ 。

$$\theta_{\perp} = 2 \cdot \tan^{-1} \frac{(X_1 - X_2)}{Z_0}, \quad \theta_{//} = 2 \cdot \tan^{-1} \frac{(Y_1 - Y_2)}{Z_0}$$
$$I(X_1) = I(X_2) = I(Y_1) = I(Y_2) = \frac{I_0}{2}$$

【問題】

1. 何謂居量反轉 (population inversion) ?
2. 如何判斷光學共振腔的穩定性?
3. 雷射光與普通光源 (如白熾燈、日光燈) 所發出的光波比較，有何特性?
4. 二極體雷射之工作電流與工作溫度如何影響雷射輸出波長? 何者影響較大?

【參考資料】

1. 雷射原理與量測概論，楊國輝、黃宏彥編著，台北市，五南圖書出版股份有限公司，2008 年 12 月，CH 3-10、5-4-2、5-4-5、5-4-6。
2. 雷射光腔之設計研究，薛琥翰、蔡少弘、黃偉誠、朱顯府著，郎宏德老師指導，東南科技大學電子工程系畢業實務專題報告，中華民國 101 年 12 月。
3. Optics, by Eugene Hecht, 4th Edition, Ch 13.1。