

臺灣二〇〇三年國際科學展覽會

科 別：物理科

作品名稱：以二極體汲發之 Nd:YAG 雷射之探討

學 校：台北市立第一女子高級中學

作 者：陳韋帆

作者簡介



我熱愛在物理與哲學之間尋求偉大又微妙的關連，我相信我對物理的興趣來自於我深信它完美詮釋自然界的奧妙與偉大，並且使我能不斷地從自然科學與人文科學找到一種近似於辯證的統合。在探究知識與解決問題的過程之中，得到了一種純粹快意的真理使命。

以二極體汲發之 Nd:YAG 雷射之探討

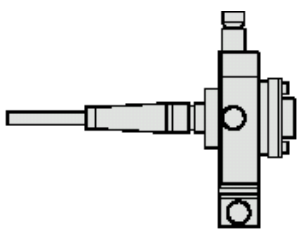
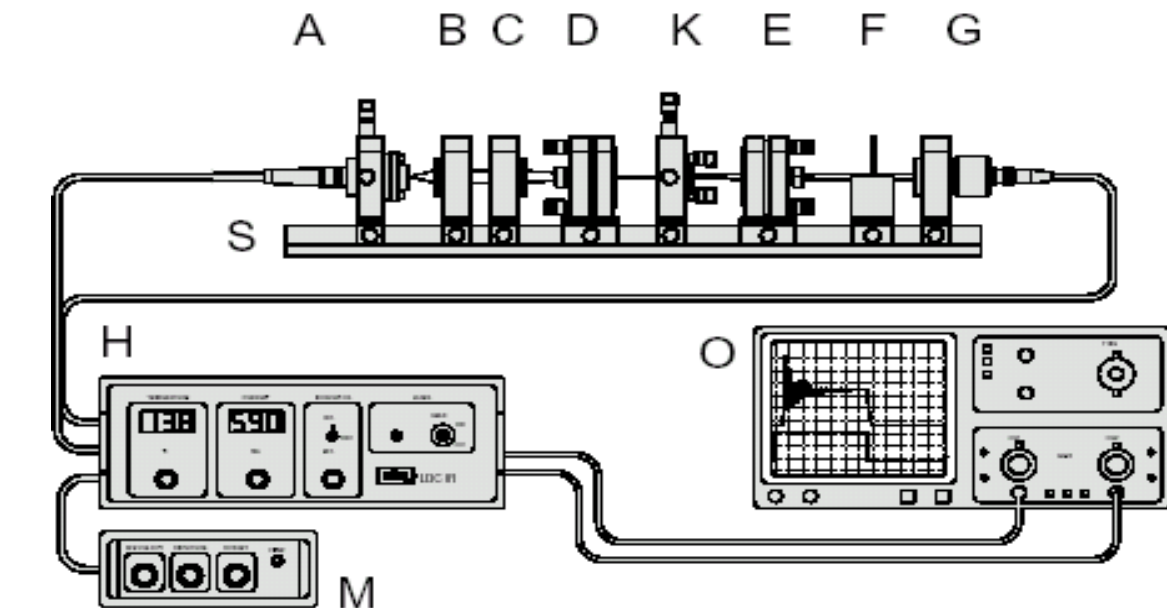
壹、研究動機

Nd-YAG Laser 是目前最常被用來當作 Pumping Source(汲發光源)，較早期是使用 discharge lamp pumping，但是閃光燈的發光頻率並非完全落在 Nd-YAG 晶體的吸收帶上，因此大量的能量轉變為熱能，十分的浪費能源，且增加冷卻系統的負荷。因為 discharge lamp pumping 是一種氣體放電的過程，每次放電的時間和能量都有很大的不穩定性。所以高效率、高穩定性的 Laserdiode 便成為 pumping source 的另一種選擇。在此實用價值下，便決心以一組 Laserdiode Pumped Nd-YAG Laser 的套件，使用 AlGaAs Laserdiode 作為 pumping source，來汲發 Nd-YAG 晶體，所有物件被固定在同一個 rail(軌道)上，從對光到汲發晶體(增益介質 Nd-YAG 晶體)，到產生 1,064nm 的紅外光雷射，及其倍頻 532nm 的綠光雷射，正可作為一完整的雷射訓練過程。

貳、研究目的

在此整套實驗過程中，發現成功的汲發相當的辛苦與不易，正因如此，我想探討其關鍵因素，其一是 Laser Mirror 要完全平行，這裡難度極高，因平行要求很高若差一點便無法汲發；再者便是 Collimator 的位置，稍一變動就有很大的數據變動，而一旦此兩關鍵掌握便能容易探討後面的問題，因此進展到單獨研究定性化探討聚焦位置，並攝影分析在不同位置上的 beam 強度與影像。

參、實驗器材



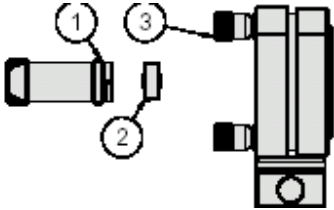
A. Diodelaser
用以產生來激發 Nd-YAG 的光



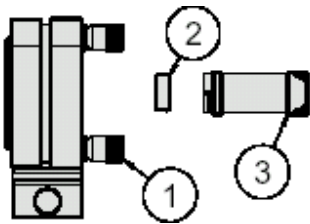
B. Collimator
用以使 A 所放出之光平行



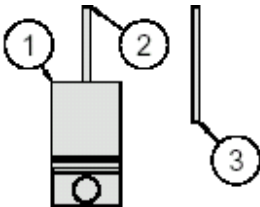
C. Focusing unit
用以聚焦透過 B 的光



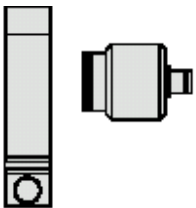
D. Laser Mirror Adjustment holder with Nd-YAG rod
Nd-YAG 晶體和調整器



E. Laser Mirror Adjustment holder
Laser Mirror 和調整器，即本實驗之共振腔



F. Filter Plate Holder
RG1000 Filter 濾掉波長大於 1000nm 者
BG39 濾掉除了波長為 532nm 者



G. Photo Detector
信息偵測器



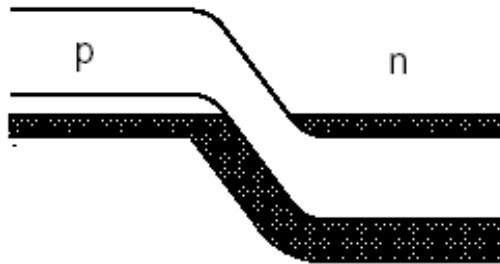
H. Controller Unit LDC01
二極體雷射控制器，控制二極體雷射之電流及溫度

I. CCD Camera
肆、研究過程與方法

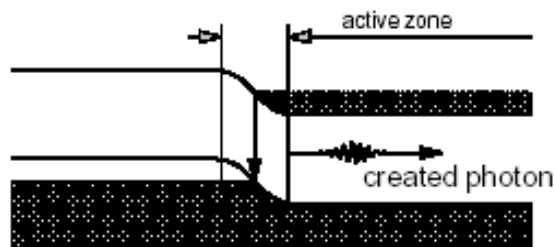
一、二極體雷射

二極體雷射產生原理如下圖示

1. 加電場前

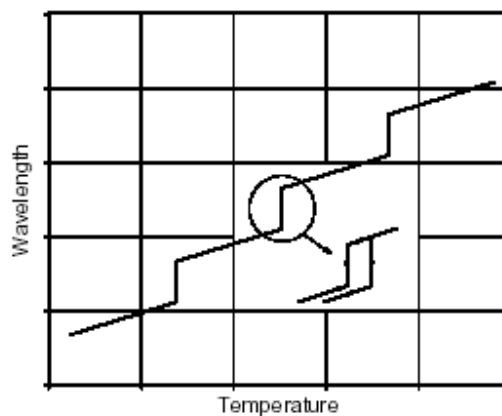


2. 加電場後



在外加順向電壓後，原來在 n 型導電帶區的電子會掉入 p 型價電子區與電洞結合而發出光來，故它不需要光學汲發，這就是二極體雷射的工作原理。

而因為溫度會改變晶體表面的反射率和它產生雷射光的區域大小，所以雷射光波長會隨溫度而改變，如下圖所示：



且雷射光強度會隨所加之電流大小而改變，電流太小則 n 小，所以此時主要是自發雷射，故雷射光較弱，而電流大時則 n 大，此時以誘發雷射為主，所以雷射較強。所以有一個 threshold value 存在。

二、傳統雷射

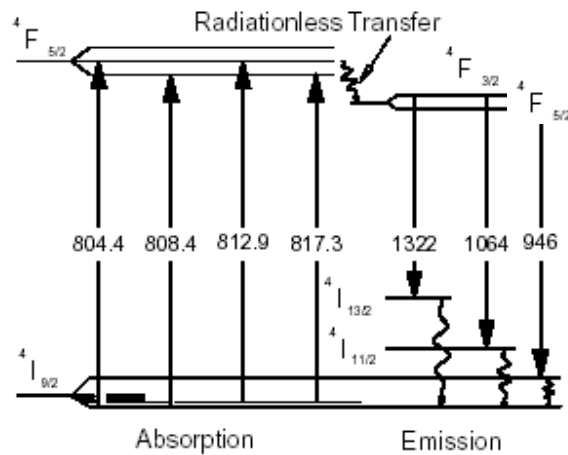
傳統雷射光指的是需要有光學共振腔來收集所汲發出來的光，以減少損耗。

Nd-YAG Laser，其中 Nd 指的是化學元素汝，是鏷系元素，原子序 60。

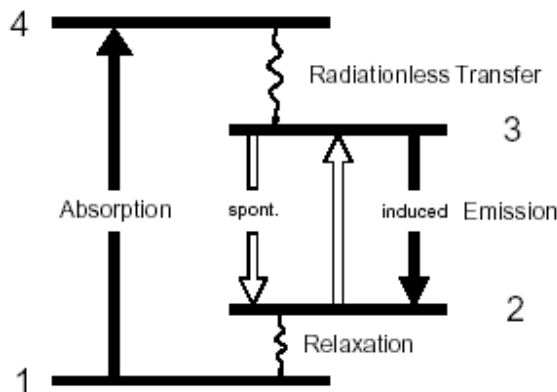
YAG 是 $Y_3Al_5O_{12}$ ，鈮鋁石榴石晶體。

Nd 原子被植入 YAG 晶體後游離化為+3 價，形成 Nd-YAG，它是四能階系統，優點是汲發率高且雷射光強。

關於本實驗其主要能階圖如下所示:



因為Nd原子在YAG晶體內，其能階為 $4F_{5/2}$ 及 $4I_{9/2}$ ，於是有四個頻率可以激發，增大了激發率，節省能量。其能階在 $4I_{9/2}$ 的原子吸收躍遷至能階 $4F_{5/2}$ 後，並不留在 $4F_{5/2}$ 。很快地轉變至 $4F_{3/2}$ 。並不釋放出光子，能量轉變為熱能，接下來能階 $4F_{3/2}$ 轉至 $4I_{11/2}$ 所放射的光有波長1064nm，即本實驗所要的雷射光，最後Nd原子也不停留在能階 $4I_{11/2}$ ，而很快地轉變至能階 $4I_{9/2}$ ，整個過程類似於下圖的理想狀態:



故可由一個 rate equational model 來描述

$$dN_3/dt = W_p N_1 - \Gamma N_3 - k_p (N_3 - N_2) \quad \text{式一}$$

$$dp/dt = k_p (N_3 - N_2) - p/\tau_{ph} \quad \text{式二}$$

- 其中 N_1 =the density of the atoms in the state 1
- N_2 =the density of the atoms in the state 2
- N_3 =the density of the atoms in the state 3
- p =the density of photons

式一的左半部即 N_3 隨時間變化，因為能階 1 的電子數若多於激發到能階 3 的也就多，故

有右式第一項，而在能階 3 愈多電子也愈易使得其自發發射，故有右式第二項，第三項則是汲發所造成 N_3 減少。

式二左邊即發射出的光子密度隨時間的變化，我們可知其當然正比於式一的最後一項，但其還會損失，且正比於 p ，故有最後一項。

現在我們將上面二式變形一下，改寫成 n, p 的方程式，因總原子數 N_0 守恆，所以 $N_0 = N_1 + N_2 + N_3 + N_4$ 。令數 $n = N_3 - N_2$ ，稱此為反轉數，population inversion number，忽略 N_2 與 N_4 ，代換去掉 N_1 及 N_3 可以得到

$$\frac{dn}{dt} = W_P(N_0 - n) - \Gamma n - kpn \quad \text{式三}$$

$$\frac{dp}{dt} = kpn - p/\tau_{ph} \quad \text{式四}$$

由上面式四中可看出因為其右式中有正比於 $-p$ 的項，故知 photon 數會隨著放射出去而快速衰減，故為維持雷射光的強度，我們必須使用光學共振腔。

此方程式有兩個 time independent solution

$$n = (W_P N_0) / (\Gamma + W_P) \quad p = 0$$

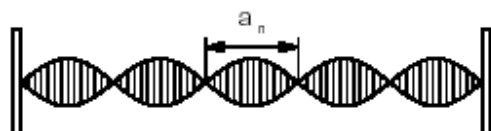
$$n = 1/k\tau_{ph} \quad p = W_P N_0 \tau_{ph} - (\Gamma + W_P)/k \quad \text{到達此平衡態之前會有 spiking 現象}$$

三、光學共振腔

光在共振腔內可避免能量損失，雷射光即利用此來增強強度。

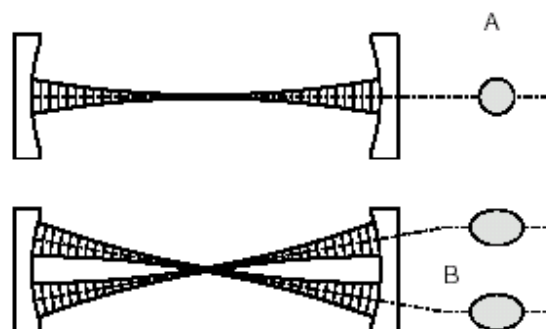
雷射光在共振腔內會形成各種模式分為

Longitudinal Modes



Transverse Modes

由於雷射光在共振腔內經過多重反射，互相干涉，因而造成場強的空間分佈，橫向截面的分佈狀況我們用 TEM_{mnq} (Transverse Electromagnetic Modes) 表示， m 是 X 軸方向上的亮點數減一， n 是 Y 方向上的亮點數減一， q 是共振腔內的節點數。如下圖所示：



本實驗所用的共振腔為半球面鏡共振腔。

一平面鏡的曲率半徑 $r_1 = \infty$ ， $g_1 = 1$ ，另一球面鏡曲率半徑 r_2 ， $g_2 = 1 - L/r_2$ ，即 $g_1 g_2 = 1 - L/r_2$ (注意其中 g 的定義為 $1 - L/r$ ，當兩反射鏡的 g 介於 0,1 之間才可以使雷射光穩定的來回反射不跑出去) 故我們需要調 L 使 L 小於或等於 r_2 。

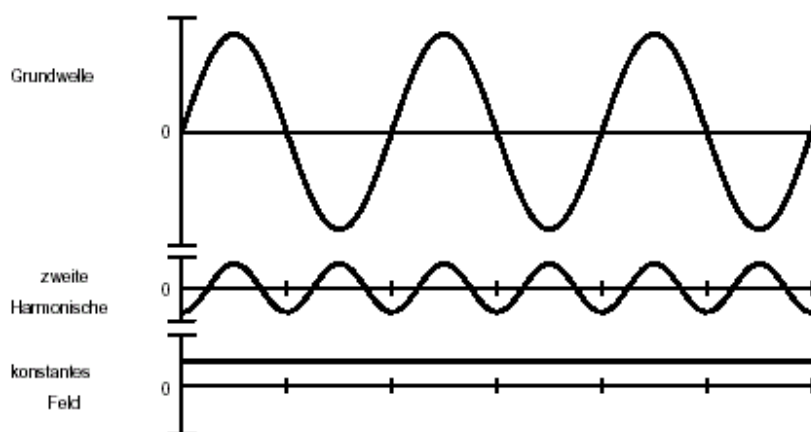
四、非線性光學

在入射光不強時，我們知道極化強度 p 是與電場成正比的，但若入射光強時(如雷射)，則此時 p 、 E 關係如下所示

A. 原波形



B. Fourier(富立葉)分析後

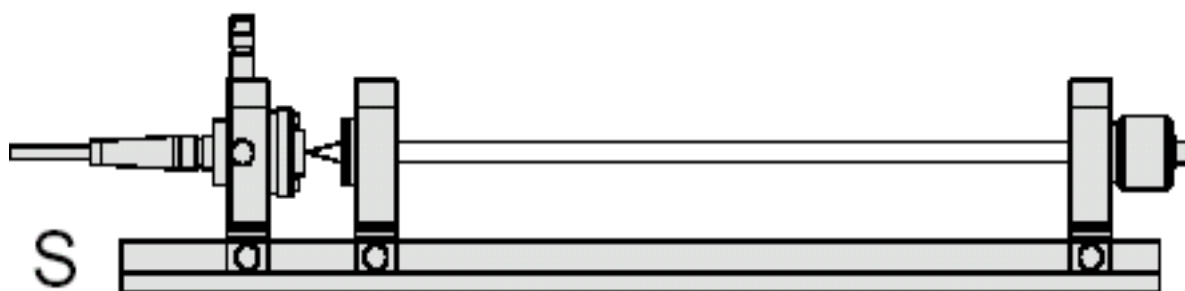


利用富立葉分析可發現除了原頻率外，尚有倍頻的成分。

伍、研究步驟

一、定性化探討聚焦位置

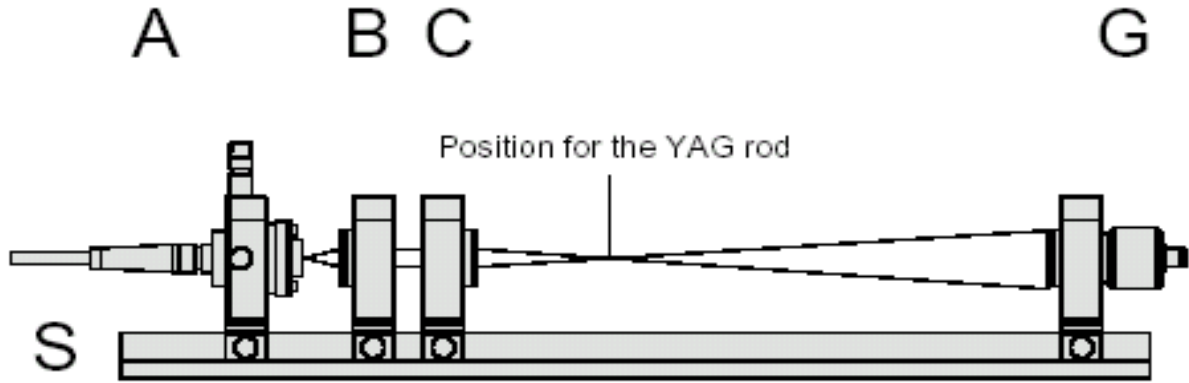
Collimate the Laserdiode beam



1. 將 collimator 安置在 laserdiode 前 1-2mm

- 2.在軌道上移動屏幕觀察其平行
- 3.調整 laserdiode 入射位置

Inserting focusing unit



- 1.在 collimator 前安置 focusing unit 且使光正好由其中通過
- 2.調整 focusing unit 位置,在光軌後方固定 CCD Camera 並連接至電腦(在此固定 focusing unit 與 CCD camera 之間距離)

Searching for the position for the YAG rod

- 1.由 CCD Camera 攝影到的影像作強度分析
- 2.參見圖 1-12

二、成功以二極體雷射激發 Nd:YAG 後探討

Nd-YAG 的吸收率

- 1.固定電流,改變溫度,記錄溫度與所量得的電壓值,可得雷射發光功率與溫度的關係。參見表 1。
- 2.將 Nd-YAG 晶體置於焦點處,調整 D 的旋扭,以避免雷射光反射回 A 內,而改變 diodelaser 之電流-強度的關係。
- 3.逐一改變溫度與步驟 10 一致,記錄透過 D 後的雷射光強度 V_t ,則吸收率為 $1-V_t/V_i$,做一吸收率-溫度圖。由於 A 所發射的雷射光波長會隨溫度而增大,已知 Nd-YAG 在 804.4nm 與 808.4nm 有最大吸收率,故可找出對應的溫度。
- 4.參見表 1。

調整共振腔產生雷射

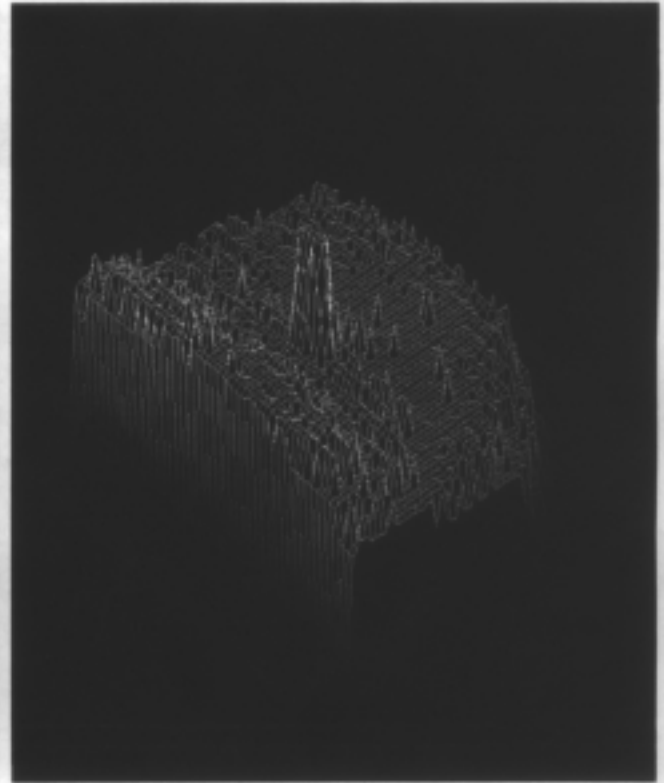
- 1.將 F、G 往右移,加入 E, D、E 之間的距離要小於 E 上面凹面鏡的曲率半徑,約為 100mm,用示波器觀察。
- 2.調整 E 的旋扭,使反射鏡垂直光軸(使其反射光點落回原處,調整 E 的位置,使示波器上看到的 spiking 現象為最大,表示產生的 Nd-YAG 雷射為最強。)

陸、實驗結果

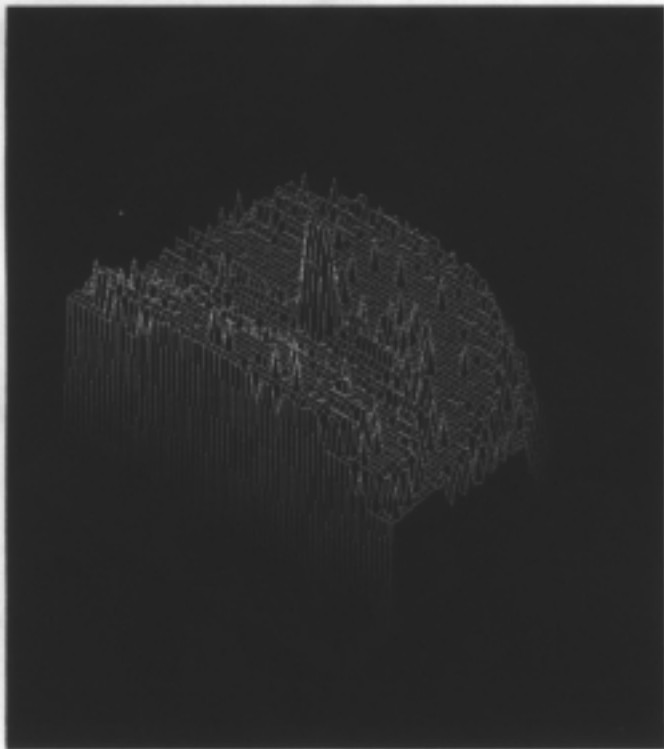
一、圖一至圖六



圖一 Peak Intensity 149.6



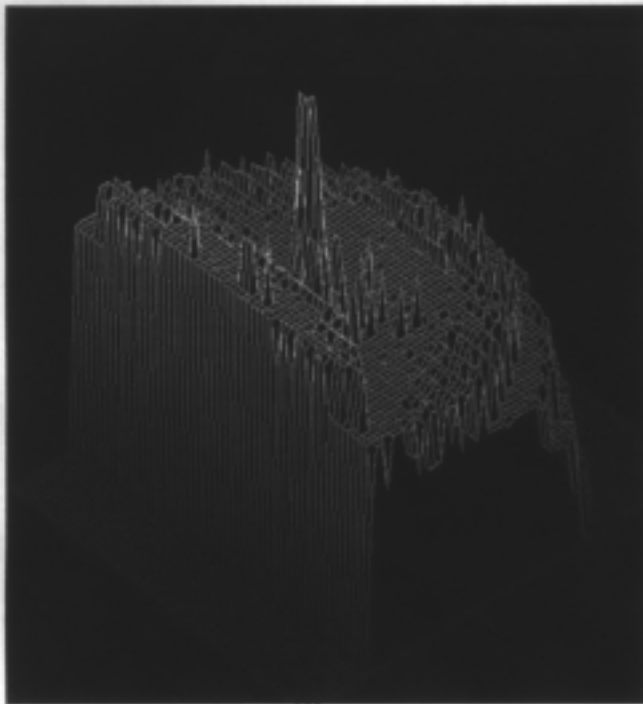
圖二 Peak Intensity 149.6



圖三 Peak Intensity 150.9



圖四 Peak Intensity 156.3



圖五 Peak Intensity 151.80



圖六 Peak Intensity 139.60

二、表一二極體雷射功率與溫度的關係

T(C)	600mA			625mA			575mA		
	V_t mV	V_i mV	$1-V_t/V_i$	V_t mV	V_i mV	$1-V_t/V_i$	V_t mV	V_i mV	$1-V_t/V_i$
9.2	115.8	196.5	0.4107	126.9	216	0.4125	110.4	179.6	0.3853
10	116.3	194.4	0.4033	128.2	214.4	0.4021	110.8	178	0.3775
12	115.9	191.1	0.3960	127.2	210.6	0.3960	110.4	164.4	0.3670
14	107.3	186.8	0.4256	116.8	206.0	0.4330	104.7	170.0	0.3841
16	92.0	183.1	0.4975	98.3	201.9	0.5131	92.4	166.1	0.4437
18	73.8	178.5	0.5866	77.1	197.5	0.6096	75.4	161.7	0.5337
20	57.8	174.4	0.6686	61.4	193.5	0.6827	61.5	157.4	0.6093
22	52.0	171.0	0.6969	57.4	189.3	0.6968	53.6	153.0	0.6497
24	53.0	167.0	0.6826	59.2	185.1	0.6802	53.4	149.2	0.6421
26	55.3	162.8	0.6603	61.6	182.4	0.6623	55.0	145.0	0.6207
28	54.3	158.4	0.6572	59.4	177.8	0.6659	54.6	141.0	0.6128
30	51.4	154.0	0.6662	55.5	173.1	0.6794	52.5	137.0	0.6168
32	47.3	150.0	0.6874	50.5	168.4	0.7001	49.2	132.8	0.6295
33	45.9	147.8	0.6894	49.0	166.4	0.7055	47.6	131.0	0.6366
34	44.4	145.7	0.6953	47.6	164.3	0.7097	45.2	128.4	0.6480
35	44.4	143.2	0.6899	49.1	161.5	0.6960	44.5	126.0	0.6468
36	45.0	140.4	0.6795	51.3	159.9	0.6792	44.0	123.4	0.6434
37	45.2	138.2	0.6729	55.8	157.4	0.6455	46.1	121.1	0.6193
38	50.0	135.7	0.6315	59.0	154.2	0.6174	49.4	118.2	0.5821
40	57.0	130.5	0.5632	71.2	149.3	0.5231	54.4	113.7	0.5215

41.6	64.7	126.6	0.4889	76.0	145.2	0.4766	61.0	109.7	0.4439
------	------	-------	--------	------	-------	--------	------	-------	--------

V_t 未加 Nd-YAG 之功率
 V_i 加 Nd-YAG 之功率
 $1-V_t/V_i$ Nd-YAG 之吸收率
 此數據皆為有加對光靶的結果

柒、結果討論

- 一、在單獨探討 Laserdiode Beam 特性前，每次整套實驗都極不易汲發，因此攝影在焦點附近不同位置上的 beam 影像，並輸入電腦作影像數位處理，作出強度的 3D 圖。
- 二、由圖一至十發現一個接近再遠離焦點的過程，其中的 Peak Intensity 卻未必有一定關係原因是，基本上，由之前豐富的操作整套實驗知道，Intensity 與溫度有關，尋求焦點時，我們所最注意的是其 beam 的圖形，是否是集中一小點，表示最多 laserdiode 的光集中的所在，這才是 the position for the YAG rod，擺設晶體的地方。圖五與六相對看起來極為可能是焦點所在。
- 三、之後我作了一些相關的檢驗，在知道焦點位置，成功激發率大為提昇。
- 四、測量最大吸收率的溫度，由表一可見，在定電流 600mA 下有二個吸收帶：
 1. 22 度(804.4nm)
 2. 34 度(808.4nm)

捌、參考文獻

- 一、Sam's Laser FAQ, Copyright 1994-2001, Samuel M. Goldwasser
 1. Sub-Table of contents
 2. Basic Characteristics, Structure, Safety, and Common Types
- 二、Principles of Lasers (3rd edition) Orazio Svelto
- 三、普通物理學 第四冊 歐亞出版社
- 四、基礎物理學 Halliday, Resnick, Walker 曉園出版社
- 五、科學月刊 第三十二卷第十二期 p1039~1044
- 六、Diode Pumped Nd:YAG-Laser Manual By Dr.W. Luhs and W. Schubert
MEOS Gmbbl 79291 Merdigen June 1992
- 七、雷射概論 國興編輯部 黎明書局
- 八、雷射(基本原理與應用) 馬英俊 譯 by Prof. K.p. Meyer 術氏基金會出版

玖、感謝

- 一、北一女中劉時通老師的指導
- 二、北一女中特教組長于曉平老師的行政支援