

東海大學物理學系碩士論文

穩定 Q 開關鎖模摻釹釷酸釷和摻釹鎢酸鉀  
釷雷射之研究



**Stable Q-switch mode-locking of  
Nd:GdVO<sub>4</sub> and Nd:KGW lasers**

研究生：劉琬怡

指導教授：吳小華 教授

中華民國九十九年七月

## 誌謝

---

首先，我要先謝謝老師在我念研究所的這兩年給予我很多的幫助，從對大部分儀器的不熟悉、到可以獨立完成自己的論文，從只會紀錄數據、到學習如何分析數據，還有對於簡報的製作與口頭報告的技巧、解決問題的方法、同儕之間的相處、甚至是人生的方向都給予很多的關心。

除了老師的大力相助，還有同學的幫忙，在老師忙的時候會互相討論增進彼此的知識，也能對彼此的實驗有進一步的瞭解，也相當於對實驗室能有更多的瞭解。在研究所的課業上，也因為有同學的相助能更順利的學習。也多虧系辦裡的學姐們的幫助，不論是借儀器、或是大大小小行政上面的事務都盡心盡力的幫助我、提醒我，真的非常感謝！當然還有系上許多老師授課之餘也會提醒我很多課業以外的生活經驗。

在此，再一次感謝所有在我念研究所期間幫助過我的人，因為有你們，我才能夠順利畢業，謝謝大家。

## 中文摘要

### 穩定 Q 開關鎖模摻釹釩酸鈮和摻釹鎢酸鉀鈮雷射之研究

研究生：劉琬怡

指導教授：吳小華 教授

東海大學物理學系

#### 摘要

本論文研究Nd:GdVO<sub>4</sub>和Nd:KGW兩種雷射晶體如何在自由運轉和外加調制下產生穩定Q鎖模。在自由運轉下，可以藉由將雷射操作在單一基橫模的狀態時，增加輸入功率到臨界值以上來得到連續波鎖模，當輸入功率稍微減少時，就會產生Q鎖模。此時，Q鎖模的峰值功率在Nd:GdVO<sub>4</sub>雷射以及Nd:KGW雷射分別會高於連續波鎖模時的3倍以及3.75倍。在自由運轉下得到連續波鎖模，再外加增益調制使其接近鬆弛震盪頻率，就可以得到穩定Q鎖模。在Nd:GdVO<sub>4</sub>以及Nd:KGW雷射的脈衝寬度分別為9 ps以及5 ps，峰值功率可達550 W以及2970 W。

## 英文摘要

### Stable Q-switch mode-locking of Nd:GdVO<sub>4</sub> and Nd:KGW lasers

Student : Wan-I Liu

Advisor : Dr. Hsiao-Hua Wu

Department of Physics, Tunghai University

#### Abstract

In this thesis, stable Q-switched mode locking (QML) of free running and gain modulation in Nd:GdVO<sub>4</sub> and Nd:KGW lasers with semiconductor saturable absorber output coupler (SESAOC) is investigated. For free running case, the continuous wave mode locking (CWML) can be obtained by increasing the pump power to above a critical value and operating the laser at fundamental transverse mode. Stable QML takes place when pump power is slightly reduced. In this case, the maximum peak power of the QML is 1.15 times and 1.3 times higher than that of the CWML for the Nd:GdVO<sub>4</sub> laser and for the Nd:KGW laser, respectively. By operating the free running laser at CWML state and applying gain modulation at a rate around relaxation oscillation frequency, stable QML can also be realized. The peak power is as high as 550 W and 2970 W at pulse width of 9 ps and 5 ps, respectively, for the Nd:GdVO<sub>4</sub> laser and the Nd:KGW laser.



# 目錄

誌謝	-----	i
中文摘要	-----	ii
英文摘要	-----	iii
目錄	-----	iv
第一章 緒論	-----	1
第二章 理論	-----	6
2-1 穩定連續波鎖模之條件	-----	6
2-2 腔內光束分佈的計算	-----	8
2-3 鬆弛震盪之理論	-----	12
第三章 Nd:GdVO <sub>4</sub>	-----	14
3-1 實驗架構及方法	-----	14
3-2 自由運轉下的被動鎖模	-----	17
3-2-1 改變輸入電流之影響	-----	17
3-2-2 在自由運轉下產生 Q 鎖模	-----	21
3-3 外加調制下的被動鎖模	-----	23



3-3-1 連續波鎖模外加調制產生之穩定 Q 開關鎖模-----	23
3-3-2 調制振幅與頻率的效應 -----	27
3-4 結果與討論-----	34
第四章 Nd:KGW-----	36
4-1 實驗架構及方法-----	36
4-2 自由運轉下的被動鎖模-----	38
4-2-1 改變輸入電流之影響 -----	38
4-2-2 調制振幅與頻率的效應 -----	43
4-3 外加調制下的被動鎖模-----	45
4-3-1 連續波鎖模外加調制產生之穩定 Q 開關鎖模-----	45
4-3-2 調制振幅與頻率的效應 -----	49
4-4 結果與討論-----	56
第五章結論 -----	58
參考文獻-----	60
附錄 -----	61

## 第一章 緒論

雷射產業是光電產業的核心技術，1960年後，第一台紅寶石雷射被研發出來，雷射技術迅速的發展，以雷射為特色的光電子產業也迅速的崛起。雷射技術的發展主要在於雷射源技術和相關應用。固態雷射是根據其能量較大、峰值功率較高、體積較小、性能穩定等優點，而被廣範圍運用在工業、國防、醫療、科學研究等等方面，是目前發展最迅速且最理想的同調光源。

以實際運用來說，脈衝雷射可以得到比連續波輸出時更高的峰值功率，因此研究穩定且高功率輸出的脈衝雷射變成首要的工作。脈衝的能量其實是可以控制的，所以在處理某些事情的時候如果可以控制好能量，可以達到某些特別的結果，譬如說外科手術、醫學美容：脈衝光…等，脈衝雷射可以控制成一發一發的，脈波重複率可以控制到很低，每秒打出一個脈衝等。常被我們用來獲得超短脈衝的方法我們稱為鎖模，而產生鎖模的主要方式為兩種，一種是主動鎖模(Active mode-locking)，另一種是被動鎖模(Passive mode-locking)。

主動鎖模主要受到共振腔損失的週期調制與相位改變所影響，例如用聲光調制器、Mach-Zehnder 電光調制器，或是半導體電吸收調制器。如果調制與共振腔的 round trip time 同步，就能產生超短脈衝，通常

會伴隨產生皮秒(picoseconds)級的脈衝寬度。其作用可以看成是一種週期性的開關，由於週期性的能量損失，讓雷射光只能在損耗最小的那瞬間打出來，因此形成一個環繞共振腔且具有週期性的光脈衝。另一種方法：被動鎖模，藉由飽和吸收體來產生短脈衝，脈衝寬度可達飛秒(femtoseconds)級，基本上是藉由透過飽和吸收體產生短脈衝，因此能得到比電子調制器更快的調制共振腔的能量損失，若飽和吸收體有足夠的恢復時間，調制損失的越快，就可以得到越短的脈衝，且脈衝寬度可以遠遠低於吸收體的恢復時間。

產生被動鎖模有很多不同的方法，不一樣的方法有不一樣的結果、不一樣的要求、不一樣的性質，但目前最方便的是用飽和吸收鏡，因為只要在共振腔中擺一個飽和吸收鏡就能產生鎖模，所以很方便有效，放入飽和吸收體幾乎就保證能產生鎖模。不過經由理論[1]和經驗，用飽和吸收鏡來做鎖模很容易就會變成 Q 鎖模，共振腔調不好、產生高階模等等都會使鎖模不穩定，很容易有傾向會變成 QML。飽和吸收體是一種具有非線性吸收特性的光學元件，在強光時吸收少，在弱光時吸收多。也就是說，對光的吸收量會隨著光的強度增強而呈現非線性的減少。使用飽和吸收體產生的鎖模容易變成 Q 鎖模，所以一般來說在應用上比較不被喜歡的，因為 Q 鎖模在時序或是振幅上都是不穩定的，但是由於 Q 鎖模可以比連續波鎖模得到更高的峰值功率與能量，若可以讓這種 Q 鎖模的



振幅穩定，那麼 Q 鎖模就是一種可以提供高峰值功率與大能量脈衝輸出的一種方式。

在 2004 年，Prasanta Kumar Datta 等人，使用 Nd:YVO<sub>4</sub> 為非線性鏡來產生被動鎖模的實驗中，在共振腔內加入了一個聲光調制器，產生了一個穩定的主動 Q 開關鎖模，脈衝寬度 9 ps，且在輸入功率為 10W 時得到輸出功率為 341 kW 的峰值功率[2]。2005 年，Yonggang Wang 等人，在 Nd:YVO<sub>4</sub> 雷射中，使用一個低溫生長的 GaAs 飽和吸收體產生一個穩定的被動 Q 開關鎖模，重複率為 36 KHz，脈衝寬度為 10 ns，且在輸入功率為 6.9 W 時，可以得到輸出功率為 3.44 kW 的峰值功率[3]。2008 年，Ja-Jon Lin 等人，在 Nd<sup>3+</sup>:LuVO<sub>4</sub> 雷射中，使用 Cr<sup>4+</sup>:YAG 來當飽和吸收體，獲得一個穩定的 Q 開關鎖模，且 Q 開關鎖模的操作範圍比用 SESAM 或 NLM 更大，得到最高的脈衝能量完 77 μJ，且在輸入功率為 15 W 時，得到輸出功率為 200 kW 的峰值功率[4]。同年，M. Weitz 等人，在 Nd:YVO<sub>4</sub> 使用 SESAM 的被動鎖模雷射中，在共振腔中加入一個聲光調制器產生穩定的 Q 開關鎖模，其 Q 開關鎖模的峰值功率大約為連續波鎖模時的 5 倍左右[5]。在本實驗中不加調制產生 Q 鎖模的方式，就是先產生連續波鎖模(CWML)在降 Power 到理論預測的臨界值，低於臨界值就會變成 Q 鎖模，在實驗室的确驗證為這樣。外加調製的方式則是在電流緣上外加一個訊號產生器。

一般常見的共振腔有三種：多重折疊腔(Multiple-pass cavity)、三鏡式折疊腔、直腔。本實驗中使用的是直線的共振腔，用折疊腔的缺點是會產生像散，所以他的穩定區會錯開，這種系統不容易產生穩定的 Q 鎖模，因為本來就很難找到 CWML 的位置，而我們的系統可以調整在飽和吸收鏡和雷射晶體上的光點大小，可以很容易選到一個會產生 CWML 的光點大小與位置，可以調控光點大小，只要在產生 CWML 之後把 Power 降下去時，就會產生 Q 鎖模。

在本實驗中，我們選擇的晶體是 Nd:GdVO<sub>4</sub> 和 Nd:KGW。Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶體最早是在 1992 年被 Zagumennyi et al. [6] 拿來當作雷射晶體使用，而我們選擇 Nd:GdVO<sub>4</sub> 的原因是因為它具有高熱傳導率，所以非常適合用於高功率雷射。Nd:KGW 晶體是低雷射閾值、高效率雷射的物質，特別適合應用在雷射測距上。Nd:KGW 雷射的效率大約是 Nd:YAG 雷射的 3-5 倍，用 Nd:KGW 雷射介質來產生低泵浦能量(0.5-1J)雷射是最好的選擇之一 [7]。Nd:KGW 半衰期比較長，頻寬比較寬，較有潛力可以獲得更高的脈衝能量，以及產生更短的脈衝寬度。

本論文將在第二章介紹使用半導體飽和吸收體來產生 Q 開關鎖模和連續波鎖模的理論，以及共振腔中光束分佈的計算，在第三章中，將介紹以 GdVO<sub>4</sub> 為雷射晶體在未加調制下，改變輸入功率或改變共振腔組態時，Q 開關鎖模操作範圍的變化，並紀錄其輸出功率的變化；和外加一台訊號

產生器之後，產生的穩定 Q 開關鎖模並紀錄其輸出功率，以及增加的最大峰值功率。在第四章中，將介紹以 Nd:KGW 為雷射晶體在未加調制下，改變輸入功率或改變共振腔組態時，Q 開關鎖模操作範圍的變化，並紀錄其輸出功率的變化；和外加一台訊號產生器之後，產生的穩定 Q 開關鎖模並紀錄其輸出功率，以及增加的最大峰值功率。第五章將會做總結以及對為來的展望。



## 第二章 理論

被動鎖模可分成連續波鎖模(Continuous wave mode-locking, CWML)和 Q 開關鎖模 (Q-switching mode locking, QML)，這裡我們將介紹使用半導體飽和吸收鏡產生穩定連續波鎖模的基本理論以及相內光束分佈的分析。

### 2-1 穩定連續波鎖模之條件

穩定連續波鎖模之條件是由 Kärtner 等人發展出來的[8][9][10]。連續波鎖模是由雷射產生連續的相同振幅的穩定鎖模脈衝，如圖 2-1(a)；而 Q 開關鎖模則是脈衝能量受到 Q 開關的高峰直的穩定鎖模脈衝所調制的，如圖 2-1 (b)，兩者相比較之下，Q 開關鎖模比較不穩定，但是卻可以產生較高的峰值功率和能量。

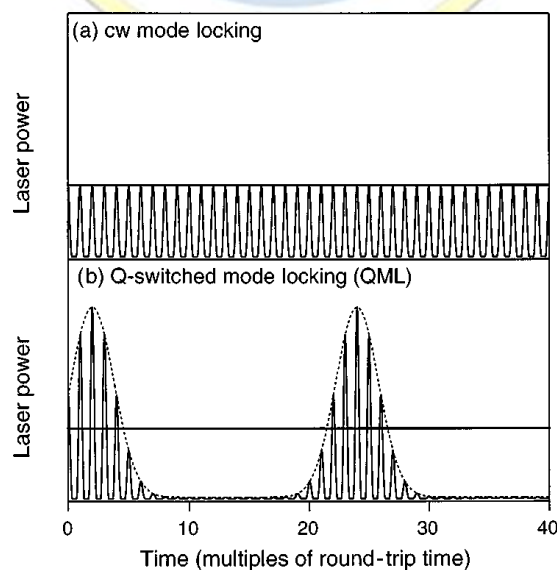


圖 2-1 瞬間和平均雷射功率對時間的作圖。(a) 穩定連續波鎖模雷射 (b) 不穩定 Q 開關鎖模雷射。

因此可以得到穩定連續波鎖模的條件：

$$E_P^2 > E_{sat,L} E_{sat,A} \Delta R \quad (2-1)$$

$$F_{P,A}^2 > F_{sat,L} F_{sat,A} \Delta R \frac{A_{eff,L}}{A_{eff,A}} \quad (2-2)$$

$$P^2 > F_{sat,L} F_{sat,A} \Delta R A_{eff,A} \frac{1}{T_R^2} \quad (2-3)$$

由 (2-1) 式可以得到產生連續波鎖模之腔內臨界功率的條件為：

$$E_{P,c} \equiv (E_{sat,L} E_{sat,A} \Delta R)^{1/2} = (F_{sat,L} A_{eff,L} F_{sat,A} A_{eff,A} \Delta R)^{1/2} \quad (2-4)$$

因此我們可以知道當腔內脈衝能量高於此臨界脈衝能量時，就可以得到連續波鎖模脈衝；當腔內脈衝能量低於此臨界脈衝能量時，則可以得到 Q 開鎖模脈衝。

從 (2-3) 式可以知道共振腔往返時間比需大，也就是說越長的共振腔越有利於產生連續波鎖模脈衝；而從 (2-4) 式可以知道如果想要得到連續波脈衝鎖模，雷射晶體與飽和吸收體的飽和強度、打在雷射晶體與飽和吸收鏡上的光點、飽和吸收鏡之調制深度都必須要小。因此在我們使用的晶體、腔長和飽和吸收鏡確定之後，也就是說  $F_{sat,L}$ 、 $F_{sat,A}$ 、 $T_R$  以及  $\Delta R$  的值都固定了，如果要產生連續波鎖模脈衝，我們所能改變的就是晶體與飽和吸收鏡上的光點大小。 $A_{eff,L}$  和  $A_{eff,A}$  和  $P^2$  成正比，即晶體和飽和吸收體上的光點越小，就越容易產生連續波鎖模。

## 2-2 腔內光束分佈的計算

利用半導體飽和吸收鏡產生的鎖模，與入射到飽和吸收鏡上的能量密度還有打在雷射晶體和飽和吸收鏡上的光點半徑  $\omega$  有關。在不考慮產生繞射損失的情況下，我們用 Ray Tracing 的方法來分析共振腔在只考慮近軸近似的條件下，光束在均勻介質中傳播一段距離為  $d$ ，所對應的轉移矩陣可表示為：

$$T = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其行列式值為：

$$\det T = \begin{vmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = 1$$



當光束射入一個焦距為  $f$  的薄凸透鏡時，轉移矩陣為：

$$T = \begin{bmatrix} 1 & d \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$$

其行列式值為：

$$\det T = \begin{vmatrix} 1 & d \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{vmatrix} = 1$$

因此我們可以得到光束在許多介質及薄凸透鏡傳播後的參數，再把各個對應矩陣相乘就可以得到我們所需要的轉移矩陣， $M$  即代表相乘之後的等效轉移矩陣。

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$

本實驗架構的等效傳輸矩陣為：從雷射晶體開始出發，至第一個薄凸透鏡，再到第二個薄凸透鏡，再到最後飽和吸收鏡；再延原路徑經第二個薄凸透鏡、第一個薄凸透鏡，再回到雷射晶體的整個過程；由圖(2-2)表示為：

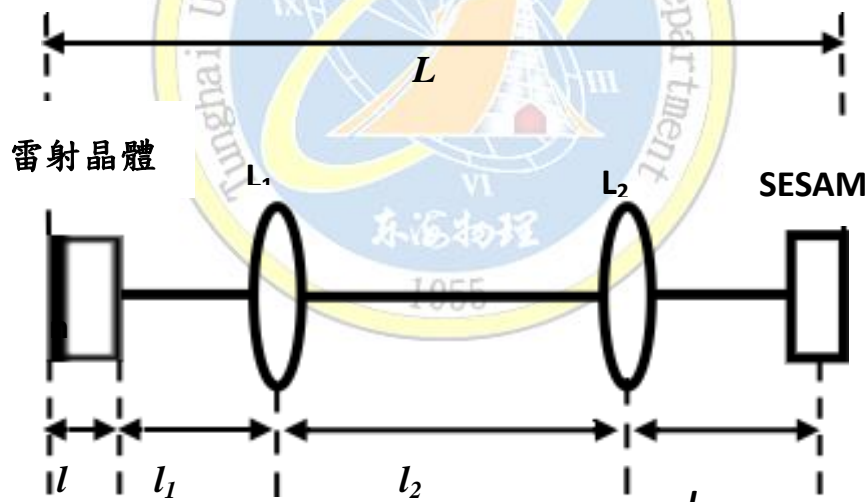


圖 2-2 本實驗架構之轉移矩陣路徑示意圖

因此從 SESAM 出發之等效轉移矩陣  $M$  可表示為：

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & n \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{l}{n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由上式可算出矩陣元素 A、B、C、D，再根據穩定條件  $\left| \frac{A+D}{2} \right| \leq 1$ ，可求出共振腔的穩定區以及飽和吸收鏡上的光點半徑  $\omega$ ：

$$\omega^2 = \frac{\lambda |B|}{\pi \sqrt{1 - \left( \frac{A+D}{2} \right)^2}}$$

再依據我們的實驗架構數據去計算光點與腔長的關係，如圖（2-3）：

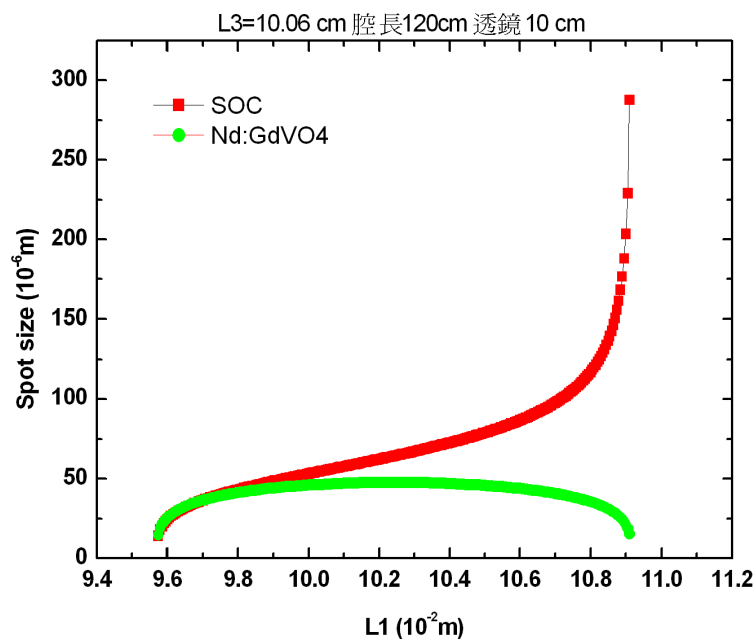


圖 2-3 改變 F1 透鏡到 Nd:GdVO<sub>4</sub> 的距離，計算光點大小在 Nd:GdVO<sub>4</sub> 和 SOC 上的變化，紅色是 SOC 上的光點大小，綠色是 Nd:GdVO<sub>4</sub> 上的光點大小，腔長 120 cm，L3 固定在 10.06 cm。



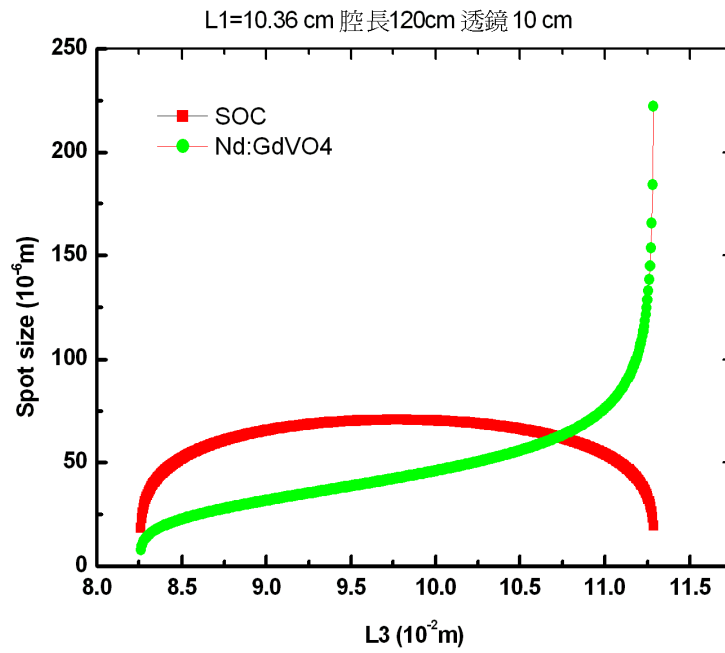


圖 2-4 改變 F2 透鏡到 SOC 的距離，計算光點大小在 Nd:GdVO<sub>4</sub> 和 SOC 上的變化，紅色是 SOC 上的光點大小，綠色是 Nd:GdVO<sub>4</sub> 上的光點大小，腔長 120 cm，L1 固定在 2.135cm。



## 2-3 鬆弛震盪之理論

根據由 K. J. Weingarten, B. Braun, and U. Keller 所研究的鬆弛震盪理論[12]，我們可以得到下列式子：

$$s_{1,2} = \frac{-2}{2\tau_2} \pm \left[ \left( \frac{r}{2\tau_2} \right)^2 - \frac{(r-1)}{\tau_2\tau_c} \right]^{1/2}$$

$$r = \delta_g / \delta_c$$

$\delta_g$ ：腔內往返未飽和係數

$\delta_c$ ：共振腔全損失係數（輸出耦合加上內部損失）

$\tau_2$ ：上能階的半衰期

$\tau_c = T_R / \delta_c$ ：冷腔的衰減時間

$T_R$ ：腔內往返的時間



當上式第二項大於第一項時，得到的根植會是複數，且是一個正弦曲線。發生的條件為：上能階的半衰期大於腔內衰減時間。

阻尼正弦曲線的頻率為鬆弛震盪頻率  $f_{r0}$ ，可表示為：

$$f_{r0} = \frac{1}{2\pi} \left[ \left( \frac{r-1}{\tau_c\tau_2} \right)^2 - \left( \frac{r}{2\tau_2} \right)^2 \right]^{1/2}$$

當  $\tau_2$  越大時，頻率  $f_{r0}$  值越小，因此在比較低的頻率達到共振時，可

以產生較大的脈衝。以本實驗中所使用的兩種晶體  $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$  以及  $\text{Nd}:\text{KGW}$  來說，半衰期越長，自發放射率越久，儲存能量的效果越好， $\text{Nd}:\text{KGW}$  半衰期比較長，而脈衝寬度短和頻寬有關係，頻寬比較寬的話脈衝越短，所以我們將使用這兩種晶體來比較，是否  $\text{Nd}:\text{KGW}$  能產生更高的峰值功率。



## 第三章 Nd:GdVO<sub>4</sub>

在這個章節中，我們將介紹以使用 Nd:GdVO<sub>4</sub> 為雷射晶體的被動鎖模雷射，分別在自由運轉下和外加調制下產生的被動鎖模做研究。

### 3-1 實驗架構及方法

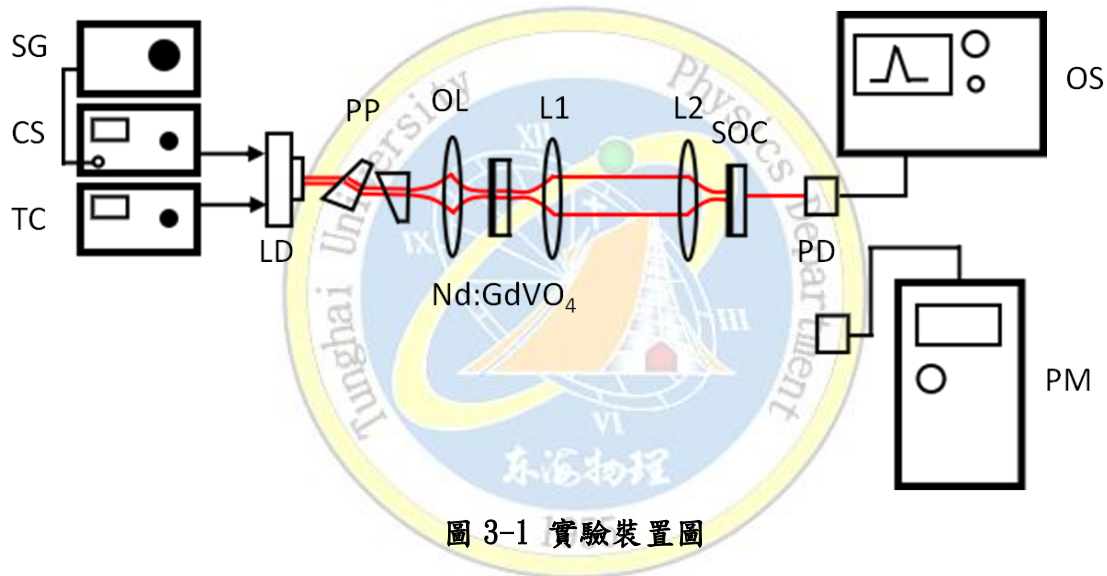


圖 3-1 實驗裝置圖

- |                   |         |                             |
|-------------------|---------|-----------------------------|
| TC: 溫控器           | CS: 電流源 | LD: 雷射二極體                   |
| PP: 菱鏡組           | OL: 物鏡  | Nd:GdVO <sub>4</sub> : 雷射晶體 |
| L1: 透鏡            | L2: 透鏡  | L3: 透鏡                      |
| SOC: 半導體飽和吸收輸出耦合鏡 |         |                             |
| PD: 光偵測器          | OS: 示波器 | PM: 功率偵測器                   |
| SG: 訊號產生器         |         |                             |

在本實驗中我們使用的雷射二極體之最大輸出功率為 1.5 W，操作時之峰值波長為 808 nm，電流源為雷射二極體電流源；並加上一個溫度控制器對雷射二極體作溫度控制，所使用的雷射晶體為  $4 \times 4 \times 8 \text{ mm}^3$  之半導體激發摻釹釷酸鈮 ( $\text{Nd:GdVO}_4$ )，摻釹量為 0.5%， $\text{Nd:GdVO}_4$  泵浦面為波長 808 nm 的抗反射鍍膜 (AR Coating) 以及波長為 1064 nm 的高反射鍍膜 (HR Coating) 以作為共振腔的端面鏡使用，在另一面為波長 1064 nm 的高穿透鍍膜 (HT Coating)，並切割成與光軸有 2 度的斜角。共振腔為四鏡式的直腔，共振腔中的透鏡在兩面皆鍍上對波長 808 nm 和 1064 nm 的抗反射鍍膜，半導體輸出耦合鏡則是用 BATOP 所生產之 SOC-1040-2-25.4 g 飽和吸收鏡，工作波長為 1064 nm，透射率為 2.1%，飽和吸收率為 2%，調制深度為 1.2%。

首先我們先固定好雷射晶體的位置，在晶體前的平移台上放置一面曲率半徑為 10 cm 的凹面鏡，將電流設在大約 1000 mA 左右，調整凹面鏡看打出來的反射光點是否在同一點上，確定有打回同一個位置之後，再做細微的調整或是推動平移台看使否有產生雷射，並且多次確認光點有無打回同一位置。若還是沒有產生雷射，可以在靠近短腔的位置、凹面鏡與輸出耦合鏡 (SOC) 中間放一個平面鏡來輔助。產生雷射之後盡量把光點調成圓形，此時晶體、凹面鏡和平面鏡中間會形成一光軸，如果晶體和平移台是平行的那麼光點就不會散開。此時將凹面鏡拆下來換回透鏡 (L1)，調整位置至光點呈現圓形，依照光路來擺 SOC 的位置，大約

對準 SOC 之後拆下平面鏡，接著推動靠近 L1 的平移台看看哪些位置會產生雷射，再在共振腔中靠近 SOC 的位置將透鏡 (L2) 架設在另一平移台上，調整之後就可以產生雷射，此時仔細固定腔內所有元件。共振腔大約架設完畢之後，再次確定平移台移動方向和雷射光軸是否平行，移動靠近 SOC 的平移台使輸出光點為一大且圓的光點，若光點於途中變形則於該位置微調晶體或 SOC 鏡座使輸出光點維持良好圓形，再移動平移台看整段過程中光點是否也都能維持良好圓形，重複上述步驟至確定平移台時光點都能維持圓形，接著微調整個系統讓輸出功率到達最大。



### 3-2 自由運轉下的被動鎖模

本章我們將在不加調制的情況下，研究如何產生穩定的 Q 鎖模。產生連續波鎖模的條件是由雷射產生連續的相同振幅的穩定鎖模脈衝，而 Q 開關鎖模則是脈衝能量受到 Q 開關的高峰值的穩定鎖模脈衝所調制，我們將在本章中印證由連續波鎖模產生穩定 Q 鎖模之理論。

#### 3-2-1 改變輸入電流之影響

隨著輸入功率的增加，會到達第一臨界功率開始產生雷射光 (CW)，再稍微增加輸入功率可以觀察到不穩定的 Q 鎖模 (UQML)，持續增加輸入功率 Q 鎖模會趨向穩定 (SQML)，再繼續增加輸入功率時，會到達第二臨界功率得到連續波鎖模 (CWML)。此與理論：當腔內脈衝能量高於臨界脈衝能量時，即可獲得連續波鎖模吻合，如圖 3-2，典型的不穩定 Q 鎖模如圖 3-3，典型穩定的 Q 鎖模如圖 3-4，典型穩定的連續波鎖模如圖 3-5。

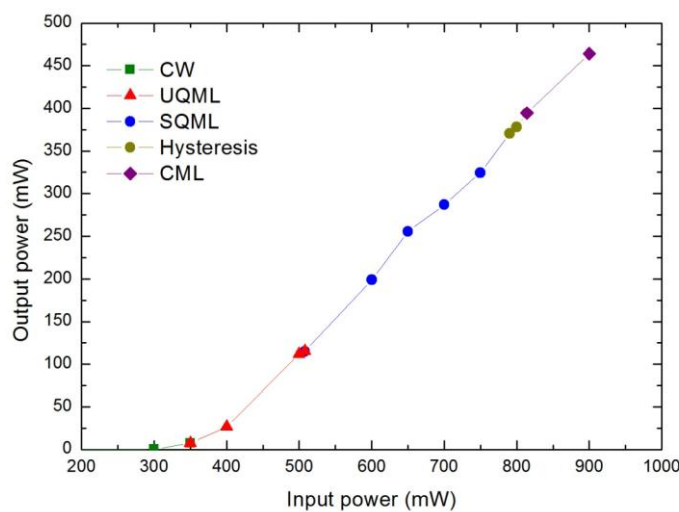
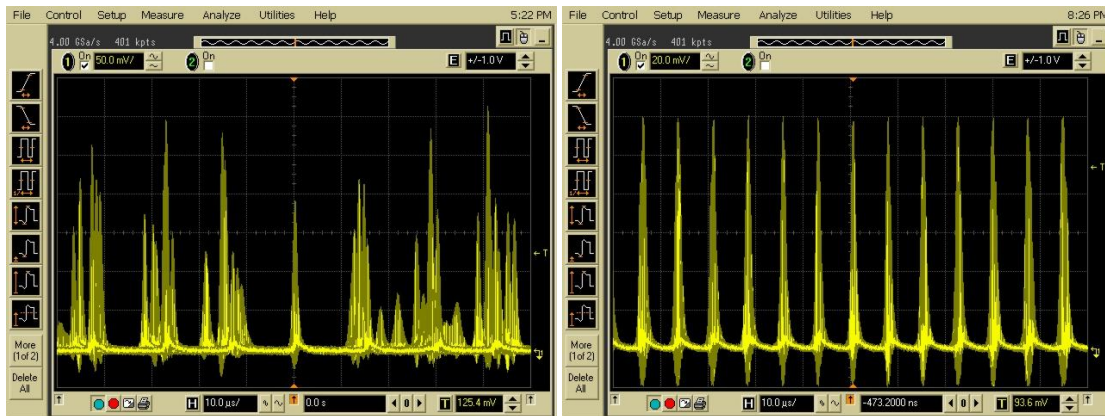
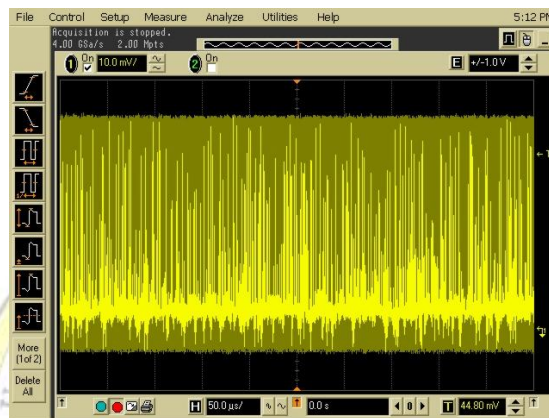


圖 3-2 輸入功率與輸出功率之關係圖



(a)

(b)



(c)

圖 3-3 Nd:GdVO<sub>4</sub> (a)典型不穩定 Q 鎖模 (b) 典型穩定 Q 開關(c) 典型連續波鎖模在示波器上的圖形。

在產生穩定 Q 鎖模到連續波鎖模的過程中，會有類似磁滯的現象，當從較高輸入電流往回慢慢減少時，本來應該是穩定 Q 鎖模的區域會維持在連續波鎖模的型態，且持續一段區域，我們稱這個區域為磁滯區。如圖 3-4。

我們先找到磁滯區的两邊端點位置：253 mW - 276 mW。輸入功率 253 mW 為產生穩定 Q 鎖模的位置，如果從這個位置開始增加輸入電流便會進入磁滯區，一直到 276 mW 時會產生連續波鎖模。圖中黑色三角形是從 Q 鎖模開始到產生連續波鎖模。從輸入功率為 253 mW 開始會先維持在 Q 鎖



模的狀態，其振幅為產生連續波鎖模後振幅的 2.816 倍；接著在輸入功率 260 mW 時，仍是為持在 Q 鎖模，其振幅的倍數為 2.956 倍；在輸入功率 267 mW 時，振幅倍數為 3.08 倍；在輸入功率 272 mW 時，振幅倍數為 3.176 倍；在輸入功率 276 mW 時，會由 Q 鎖模變成連續波鎖模，此時的振幅我們設為 1 倍。而紅色三角形為自連續波鎖模開始到產生 Q 鎖模，從輸入功率 276 mW 開始，會維持在連續波鎖模的狀態，其振幅為 1 倍，在輸入功率 272 mW 時，仍然維持在連續波鎖模，其振幅為 1.058 倍；在輸入功率為 267 mW 時，其振幅為 1.116 倍；在輸入功率為 260 mW 時，其振幅為 1.17 倍；在輸入功率為 253 時，會由連續波鎖模變成 Q 鎖模，此時的振幅為 1 倍。

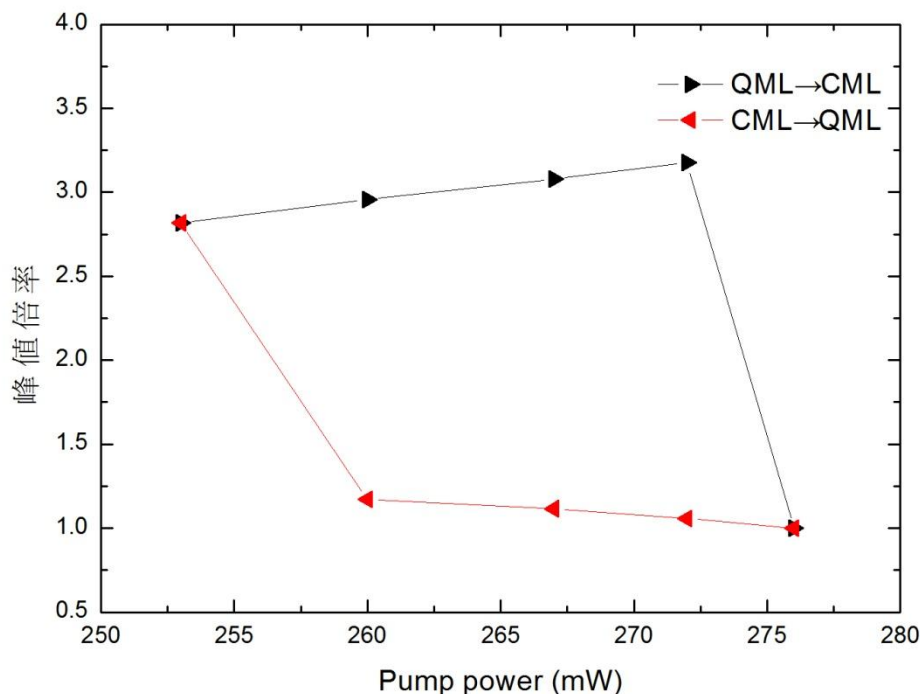
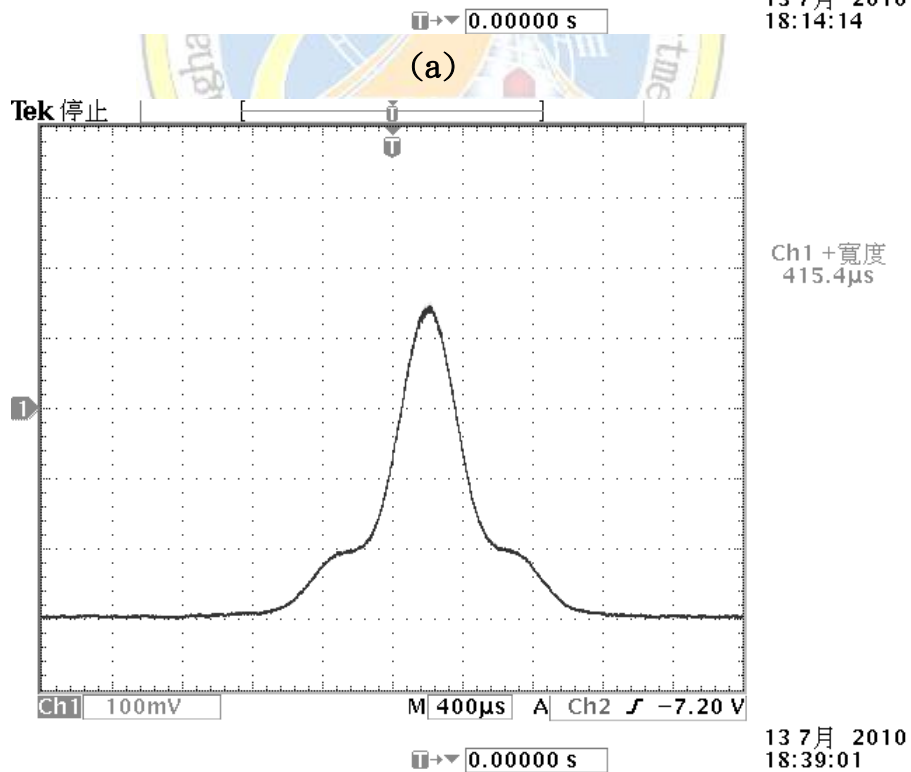
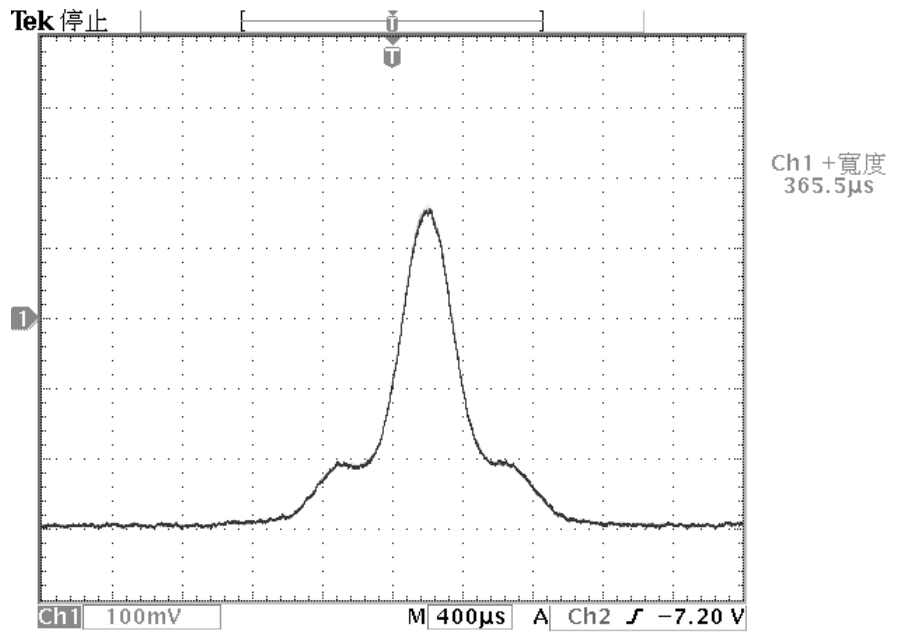


圖 3-4 輸入功率對磁滯現象關係圖

我們使用 COHERENT 公司所出產的自相關干涉儀來測量脈衝寬度，型號：FR103 Autocorrelator，採用非線性的方法量測雷射的脈衝寬度，以下是在示波器的圖形。



(b)

圖 3-5 在腔長 120 cm 腔長下使用兩焦距 7.5 cm 的透鏡，輸入功率為 554 mW，(a) 連續波鎖模，換算後所得到之脈衝寬度為 8.176 ps。(b)Q 鎖模，脈衝寬度為 9 ps。

### 3-2-2 在自由運轉下產生 Q 鎖模

在這部份我們是在自由運轉 (Free running, 即在不外加調制的情況) 下, 輸入電流 1300 mA, 先調整共振腔, 使其產生單一基橫模獲得連續波鎖模時, 再降低輸入電流降至 747 mA 所產生的穩定 Q 鎖模, 可以將振幅增加約 2.7 倍。

自由運轉下, 輸入電流 1300 mA, 平均輸出功率為 102.4 mW, 連續波鎖模在示波器上的圖形, 我們將連續波鎖模的振幅調為 20 mV, 恰為示波器上的一大格, 以此為一個單位, 再依據此單位對 Q 鎖模之振幅做比較, 如圖 3-5 (a) 產生連續波鎖模之後, 再將電流下降至 747 mA 時, 所獲得的穩定 Q 鎖模在示波器上的圖形, 平均輸出功率為 46.3 mW, 與圖 3-5 (a) 比較之後, 可以看出 Q 鎖模的振幅比連續波鎖模高約 2.75 倍, 如圖 3-5 (b)

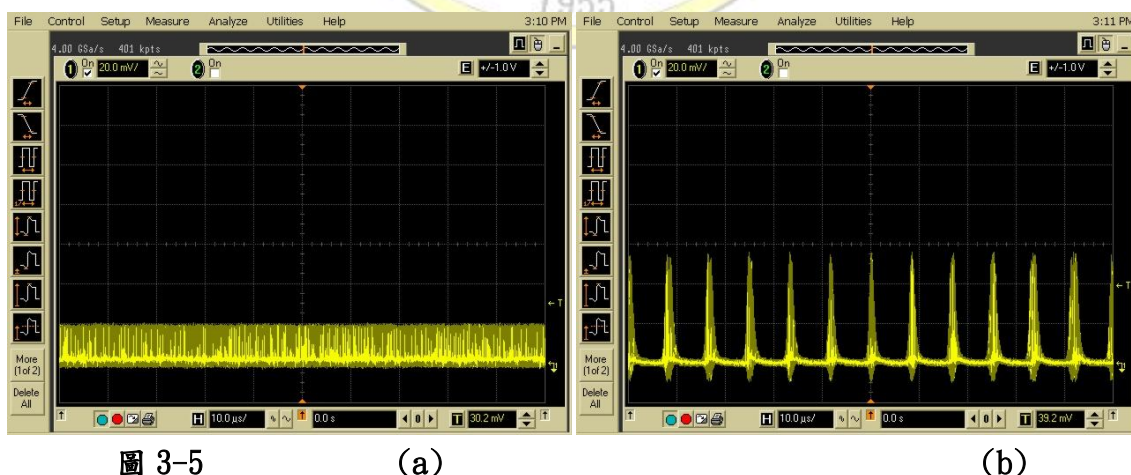


圖 3-5 (a) 在自由運轉下電流 1300 mA 時產生的連續波鎖模在示波器上顯示的圖形, 平均輸出功率為 102.4 mW。(b) 將電流降至 747 mA 時產生穩定的 Q 開關鎖模, 平均輸出功率為 46.3 mW。

當高階橫模或多橫模被激發時，就無法得到穩定的 Q 鎖模。我們在輸入電流 1300 mA 產生連續波鎖模時，將輸入電流降至 508 mA 卻得不到穩定 Q 鎖模。

自由運轉下，輸入電流 1300 mA，平均輸出功率 100 mW 時，連續波鎖模在示波器上的圖形，我們將連續波鎖模的振幅調為 20 mV，恰為示波器上的兩大格，以此為一個單位，再依據此單位對 Q 鎖模之振幅做比較，如圖 3-6 (a)。產生連續波鎖模之後，再將電流下降至 508 mA 時，所獲得的不穩定 Q 鎖模在示波器上的圖形，平均輸出功率為 30.4 mW。由於 Q 鎖模圖形不穩定，故無法比較，如圖 3-6 (b)。

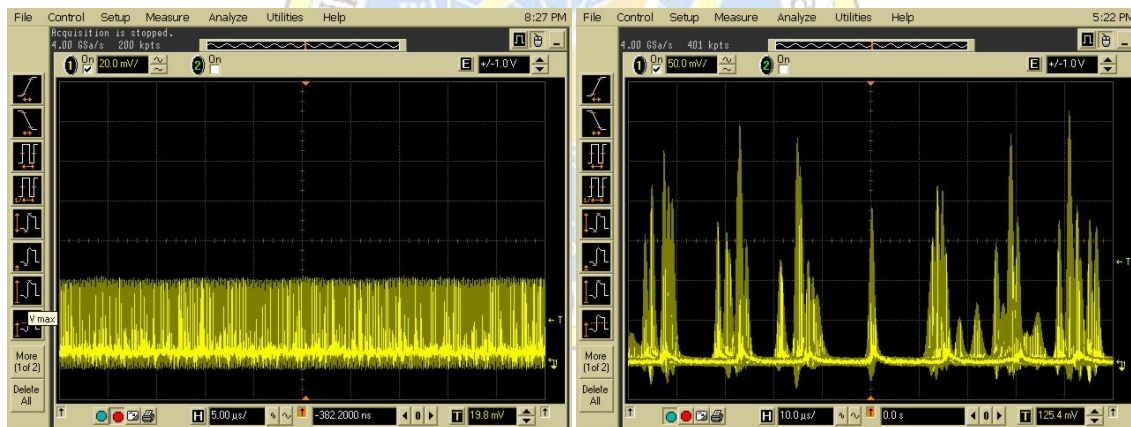


圖 3-6 (a) (b)

圖 3-6 (a)在自由運轉下電流 1300 mA 時產生的連續波鎖模在示波器上顯示的圖形，平均輸出功率為 100 mW。(b) 將電流降至 508 mA 時產生了穩定的 Q 開關鎖模，平均輸出功率為 30.4 mW。

### 3-3 外加調制下的被動鎖模

#### 3-3-1 連續波鎖模外加調制產生之穩定 Q 開關鎖模

在自由運轉下，先調制共振腔使其產生基橫模，獲得連續波鎖模之後，再外加增益調制，當調制頻率跟系統的自然頻率共振時，就會產生穩定 Q 鎖模。

外加調制時，輸入電流 900 mA 至 1300 mA，每增加 100 mA 量測一次，從連續波鎖模變成穩定 Q 鎖模所需要的調制頻率對振幅改變的關係。900 mA 時從連續波鎖模變成 Q 鎖模之振幅倍數增加最多，振幅約為連續波鎖模時的 8.5 倍；1000 mA 時，約為連續波鎖模的 6.5 倍；1100 mA 時，約為連續波鎖模的 5 倍；1200 mA 時，約為連續波鎖模的 4.5 倍；1300 mA 時，約為連續波鎖模的 4 倍。如圖 3-7。

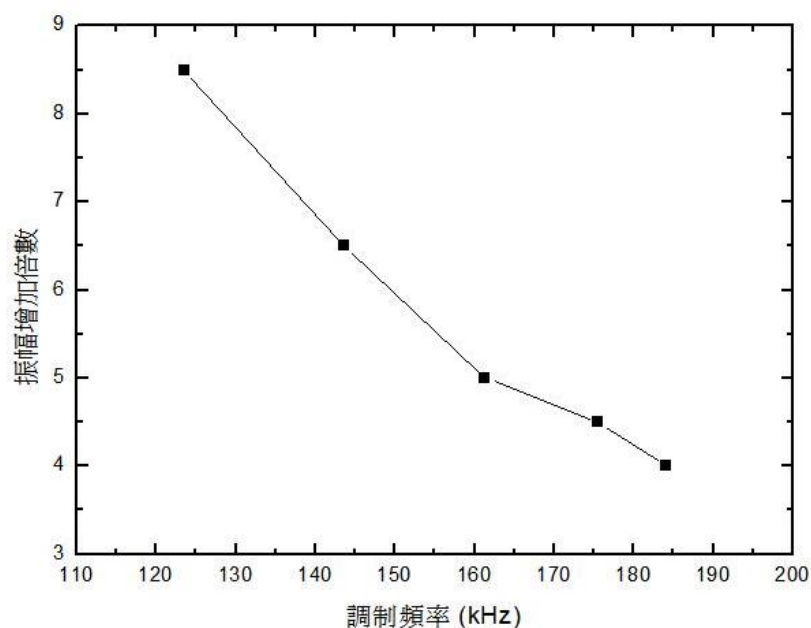


圖 3-7 調制頻率與振幅增加倍數之關係圖

自由運轉下，輸入電流 900 mA，平均輸出功率 60.4 mW 時，連續波鎖模在示波器上的圖形，我們將連續波鎖模的振幅調為 10 mV，恰為示波器上的兩小格，以此為一個單位，再依據此單位對加調制之後得到的 Q 鎖模振幅做比較，如圖 3-8 (a)。在自由運轉下產生連續波鎖模之後，外加調制振幅 2.5 V，調制頻率 123.5 kHz 時，所獲得的穩定 Q 鎖模在示波器上的圖形，平均輸出功率為 55.7 mW，與圖 3-8 (a) 比較之後，可以看出 Q 鎖模的振幅比連續波鎖模高約 8.5 倍，經由計算之後得知調制深度為 69.61 %，圖 3-8 (b)。自由運轉下，輸入電流 1000 mA，平均輸出功率 68mW 時，外加調制振幅 2.5 V，調制頻率 143.6 kHz，與圖 3-8 (a) 比較之後，可以看出 Q 鎖模的振幅比連續波鎖模高約 6.5 倍，經由計算之後得知調制深度為 54.94 %，如圖 3-8 (c)。自由運轉下，輸入電流 1100 mA，平均輸出功率 77.8mW 時，外加調制振幅 2.5 V，調制頻率 123.5 kHz，與圖 3-8(a) 比較之後，可以看出 Q 鎖模的振幅比連續波鎖模高約 5 倍，經由計算之後得知調制深度為 69.61 %，如圖 3-8 (d)。自由運轉下，輸入電流 1200 mA，平均輸出功率 84.1 mW 時，外加調制振幅 2.5 V，調制頻率 175.5 kHz，與圖 3-8 (a) 比較之後，可以看出 Q 鎖模的振幅比連續波鎖模高約 4.5 倍，經由計算之後得知調制深度為 41.82 %，如圖 3-8 (e)。自由運轉下，輸入電流 1300 mA，平均輸出功率 92.7 mW 時，外加調制振幅 2.5 V，調制頻率 184.1 kHz，與圖 3-8 (a) 比較之後，可以看出 Q 鎖模的振幅比連續波鎖模高約 4 倍，經由計算之後得知調制深度為 38.98 %，如圖 3-8 (e)。

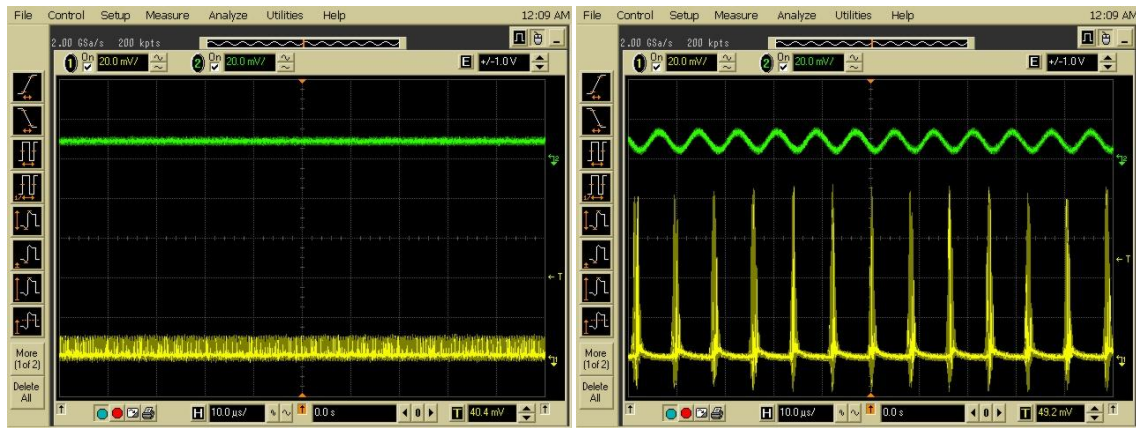
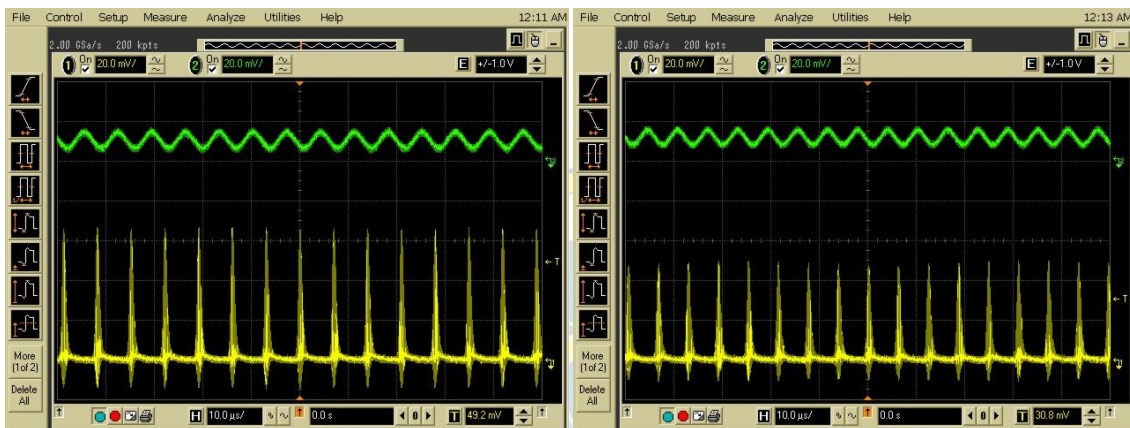


圖 3-8

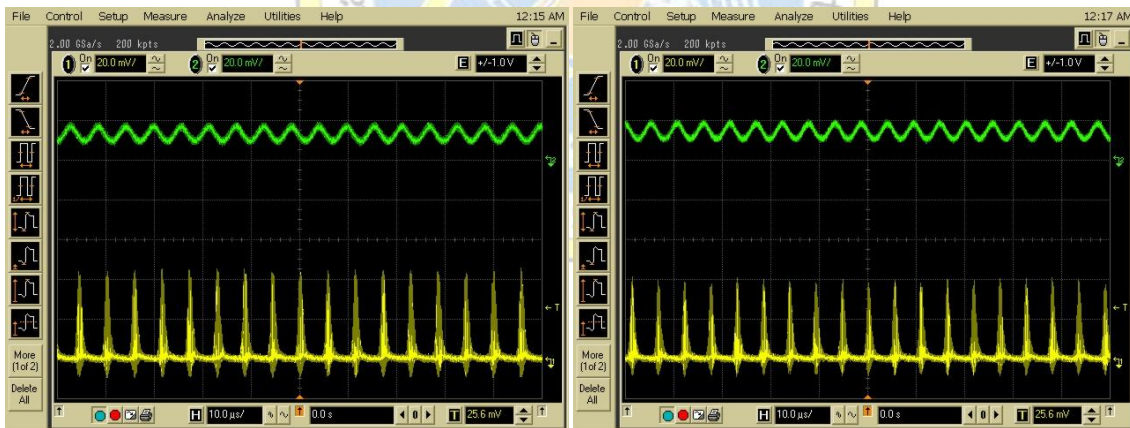
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

圖 3-9 (a) 900 mA 時為加調制時的在示波器上顯示的連續波鎖模圖形，平均輸出功率為 60.4 mW。(b) 調制振幅為 2.5 V，調制頻率為 123.5 kHz，調制深度為 69.61%，平均輸出功率為 55.7 mW。(c) 調制頻率為 143.6 kHz，調制深度為 54.94%，平均輸出功率為 66.16 mW。(d) 調制頻率為 175.5 kHz，調制深度為 41.82%，平均輸出功率為 82.7 mW。(e) 調制頻率為 175.5 kHz，調制深度為 41.82%，平均輸出功率為 82.7 mW。(f) 調制頻率為 184.1 kHz，調制深度為 38.98%，平均輸出功率為 91.8 mW。

依以上數據可簡化成表 3-1：

表 3-1

電流 (mA)	Ampl (V)	Freq (kHz)	未加調制		加調制		$\frac{A/2}{B}$ 調制深度 (%)	輸出功率 (mW)		振幅 增加倍 數
			Channel 1 $V_{max}$	Channel 2 $V_{max}(B)$	Channel1 $V_{max}$	Channel 2 $V_{p-p}(A)$		未加 調制	加調制	
900	2.5	123.5	11.65	9.84	64.20	13.70	69.61	60.4	55.7	8.5
1000	2.5	143.6	11.59	11.33	66.07	12.45	54.94	68	66.1	6.5
1100	2.5	161.3	11.03	12.68	48.86	11.58	45.66	77.8	76.1	5
1200	2.5	175.5	11.45	13.89	43.92	11.62	41.82	84.1	82.7	4.5
1300	2.5	184.1	11.86	15.3	40.61	11.93	38.98	92.7	91.8	4

由表中可以看出隨著輸入電流的增加，振幅增加倍數越少，達共振所需的調制頻率越高，調制深度越低。





### 3-3-2 調制振幅與頻率的效應

我們將藉由在固定輸入電流與調制振幅時，改變頻率與振幅改變的關係。若將電流固定為 1100 mA，在不同調制振幅下，產生穩定 Q 鎖模時，把當時的 Q 鎖模振幅設為 1 倍，隨著調制頻率的增加，振幅從 1 倍改變為：0.75 倍、0.5 倍和 0.25 倍，由圖中可以看出來隨著調制振幅的增加，所需要的調制頻率越低。如圖 3-10。

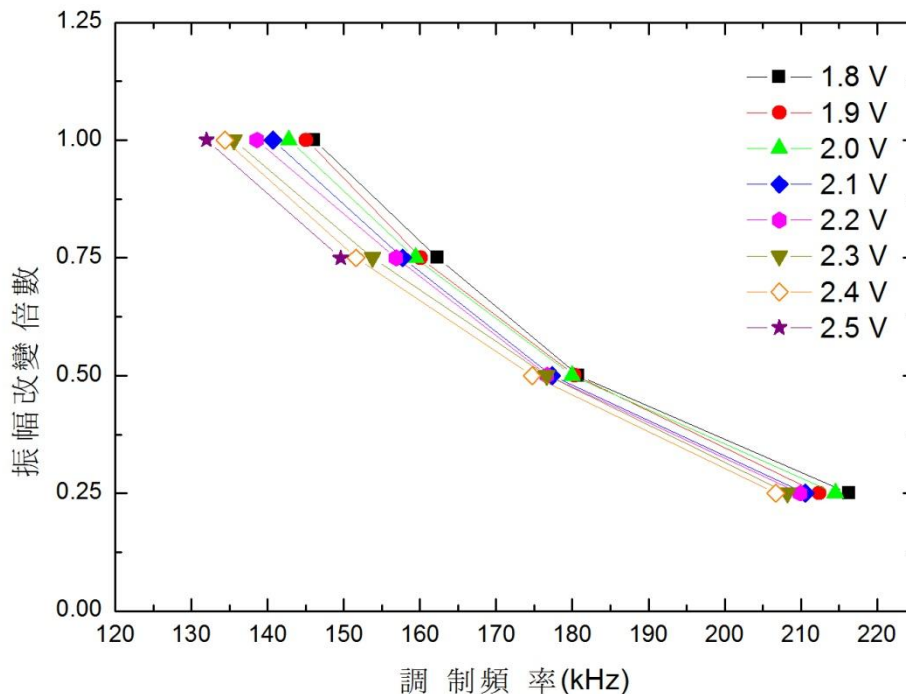


圖 3-10 固定不同振幅下改變調制頻率的影響。

電流固定為 1100 mA，我們在系統中獲得連續波鎖模之後，加上調制振幅為 1.5 V，調制頻率 153.5kHz 的時候會得到穩定 Q 鎖模。圖 3-11(a) 為調制頻率 150.1 kHz 時即將變成穩定 Q 鎖模的狀態；圖 3-11 (b) 為調制頻率 153.5 kHz 時，從連續波鎖模到產生穩定 Q 鎖模的圖形。

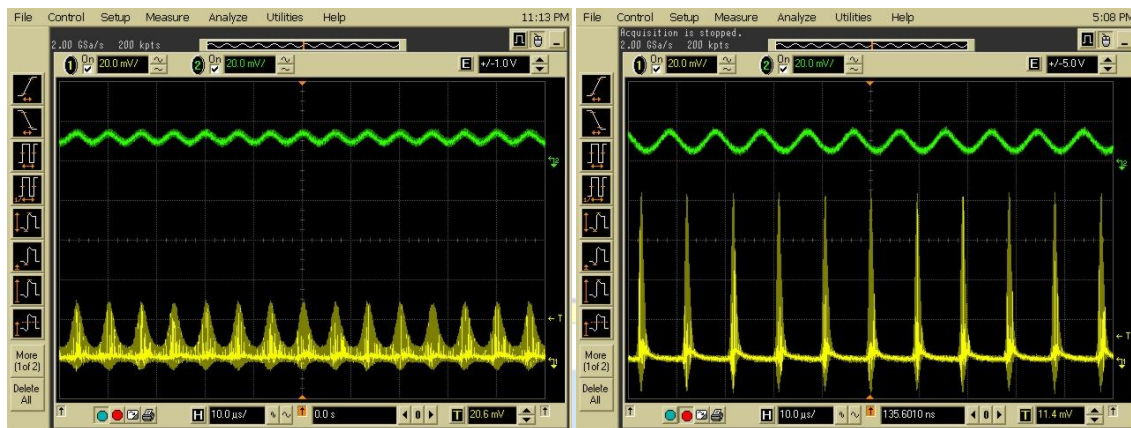


圖 3-11 (a) 調制頻率 150.1 kHz 時在示波器上的圖形；(b) 調制頻率 153.5 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開關鎖模圖形。

我們先把調制頻率在增加到 155.1kHz 產生穩定 Q 鎖模之後，在將調制頻率由 155.1 kHz 往低改變，我們發現在 155.1 kHz 至 119.4kHz 中間有類似磁滯的現象；當從調制頻率低到高的情況下，在 120 kHz 時應該還不是穩定 Q 鎖模，但如果已經產生穩定 Q 鎖模之後在將調制頻率降至 120 kHz 時，卻發現圖形還維持在穩定 Q 鎖模的狀態。下圖為調制頻率同為 120 kHz，卻因為磁滯現象導致不同狀態的圖形如下：

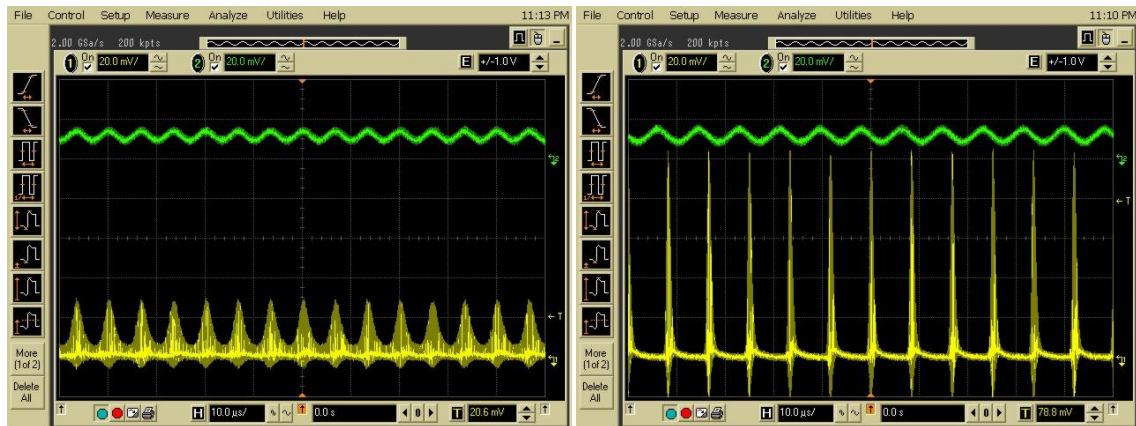


圖 3-12 (a) (b)

圖 3-12 (a) 調制頻率 120 kHz 時在示波器上的圖形；(b) 調制頻率 120 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開關鎖模圖形。

我們先把調制頻率增加到 155.1 kHz 產生穩定 Q 鎖模之後，再將調制頻率往下降至 119.4 kHz（此調制頻率包含在磁滯區中），我們發現 Q 鎖模的振幅會增加，而且 Q 鎖模也更穩定；但是如果此時將增益調制拿掉在同樣調制頻率 119.4 kHz 接回去時，並不會得到圖 3-13 (a) 的圖形，要得到此振幅必須使用先使系統得到穩定 Q 鎖模之後，在將調制頻率下降的方法才能得到。

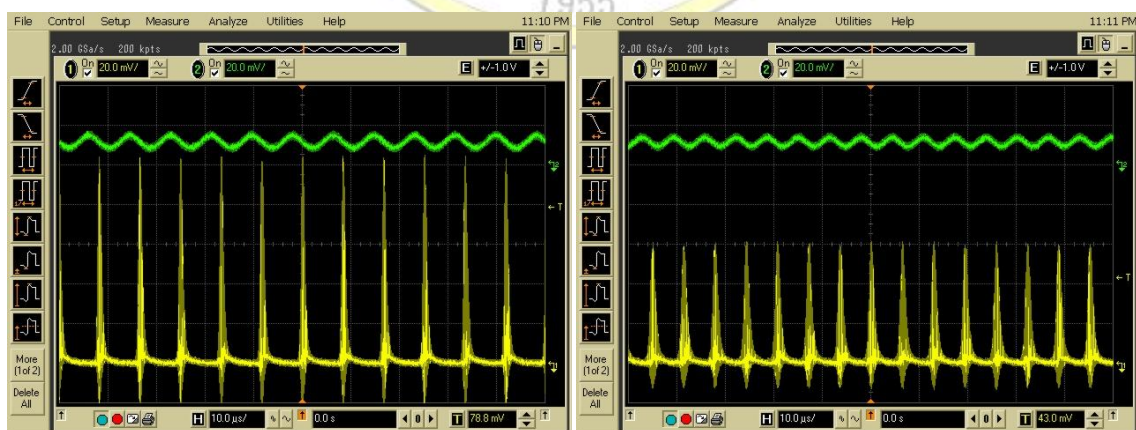


圖 3-13 (a) (b)

圖 3-13 (a) 調制頻率 119.4 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開關鎖模圖形。(b) 調制頻率 155.1 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開關鎖模圖形。

當我們在調制振幅 1.5 V，調制頻率 153.5 kHz 得到穩定 Q 鎖模之後，發現再繼續增加調制頻率時，會有一段 Q 鎖模的穩定區，在這一段調制頻率的 Q 鎖模圖形會很穩定，幾乎不會跳動。圖 3-14 (a) 為 155.1 kHz 時的圖形，圖 3-14 (b) 為 160 kHz 時的圖形，振幅幾乎沒有改變。

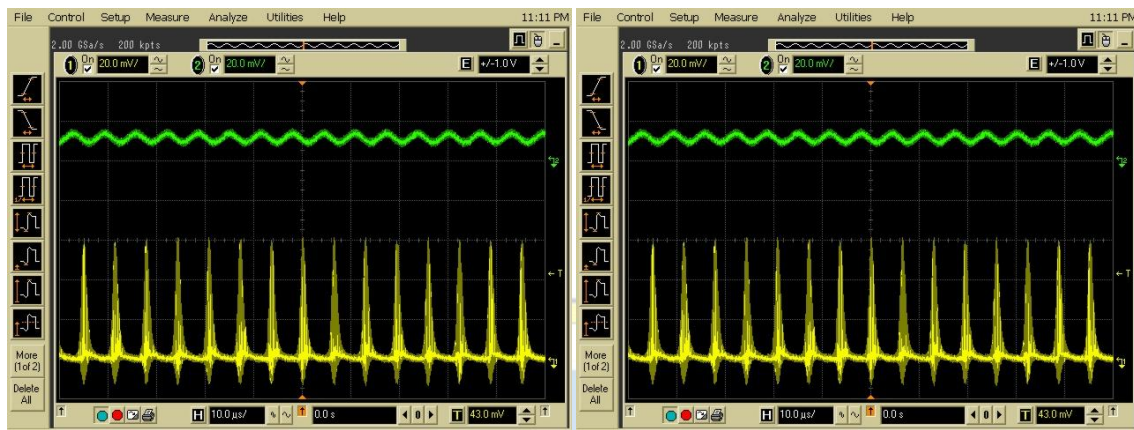


圖 3-14 (a) (b)  
圖 3-14 (a) 為 155.1 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開關鎖模圖形。(b) 160 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開關鎖模圖形。

輸入電流 1100 mA，在自由運轉下得到連續波鎖模之後，將調制振幅設為 1.8 V 時，可以在 146.1 kHz 時得到穩定 Q 鎖模，並將振幅調為 80 mV，恰為示波器上的四大格，此時我們將由 146.1 kHz 增加至 162.3 kHz 時，穩定 Q 鎖模的振幅降為原本的 0.75 倍，也就是示波器上的 3 大格左右。



圖 3-15 (a) (b)  
圖 3-15 為 (a) 為 105.4 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開關鎖模圖形。(b) 為 131.8 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開關鎖模圖形。

得到圖 3-16 的結果之後，我們繼續將調制頻率由 162.3 kHz 增加至 180.8 kHz 時，穩定 Q 鎖模的振幅降得更低，降為原本的 0.5 倍如圖 3-16 (b)，也就是示波器上約兩大格。

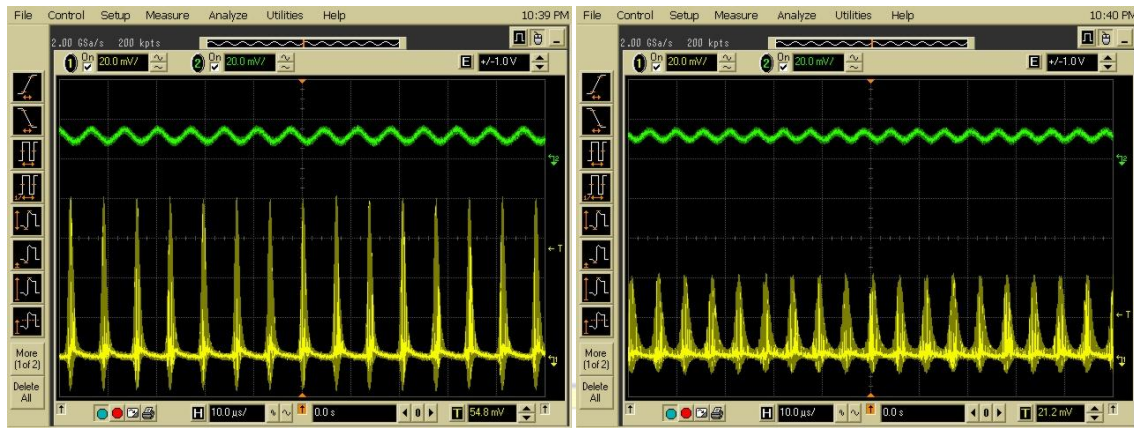


圖 3-16 (a) (b)  
 圖 3-16 (a) 調制頻率 105.4 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開鎖模圖形。(b) 調制頻率 152 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開鎖模圖形。

得到圖 3-21 的結果之後，我們繼續將調制頻率由 180.8 kHz 增加至 216.3 kHz 時，穩定 Q 鎖模振幅持續下降，降為原本的 0.25 倍如圖 3-17 (b)，也就是在示波器上約一大格。

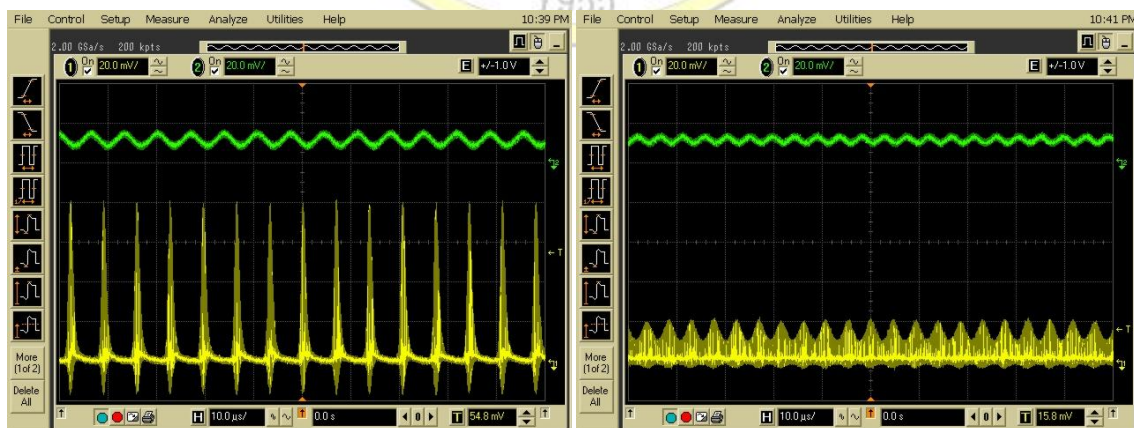


圖 3-17 (a) (b)  
 圖 3-17 (a) 調制頻率 105.4 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開鎖模圖形。(b) 調制頻率 180 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開鎖模圖形。

我們將上述磁滯現象作成峰值倍率對調制頻率之關係圖，如圖 3-18。

我們先找到磁滯區的兩邊端點位置：95 kHz - 125 kHz。調制頻率 125 kHz 為產生穩定 Q 鎖模的位置，如果從這個位置開始降低調制頻率便會進入磁滯區，一直到 95 kHz 時會產生連續波鎖模。圖中黑色三角形是從 Q 鎖模開始到產生連續波鎖模。從調制頻率 125 kHz 開始會先維持在 Q 鎖模的狀態，其振幅為產生連續波鎖模後振幅的 2.963 倍；接著在調制頻率 112 kHz 時，仍是維持在 Q 鎖模，其振幅的倍數為 3.583 倍；在調制頻率 109 kHz 時，振幅倍數為 3.753 倍；在調制頻率 102 kHz 時，振幅倍數為 3.995 倍；在調制頻率 95 kHz 時，會由 Q 鎖模變成連續波鎖模，此時的振幅我們設為 1 倍。而紅色三角形為自連續波鎖模開始到產生 Q 鎖模，從調制頻率 95 kHz 開始，會維持在連續波鎖模的狀態，其振幅為 1 倍，在調制頻率 102 kHz 時，仍然維持在連續波鎖模，其振幅為 1.013 倍；在調制頻率為 109 kHz 時，其振幅為 1.024 倍；在調制頻率為 112 kHz 時，其振幅為 1.046 倍；在調制頻率為 125 kHz 時，會由連續波鎖模變成 Q 鎖模，此時的振幅為 2.963 倍。

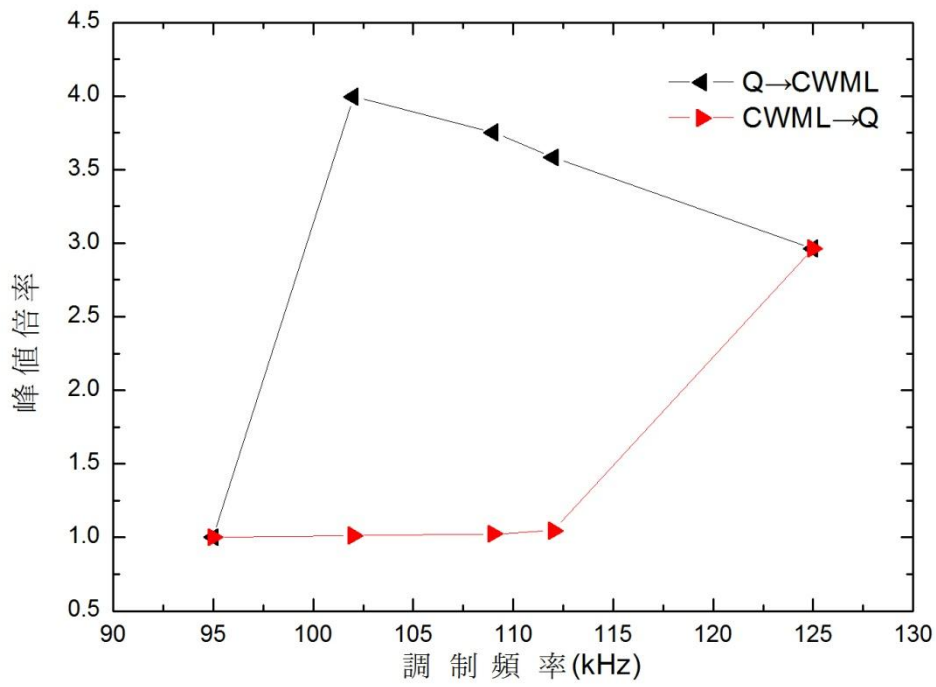


圖 3-18 輸入功率對磁滯現象關係圖



### 3-4 結果與討論

隨著輸入功率的增加，會到達第一臨界功率開始產生雷射光，再稍微增加輸入功率可以觀察到不穩定的 Q 鎖模，持續增加輸入功率 Q 鎖模會趨向穩定，再繼續增加輸入功率時，會到達第二臨界功率得到連續波鎖模。在產生穩定 Q 鎖模到連續波鎖模的過程中，會有類似磁滯的現象，當從較高輸入電流往回慢慢減少時，本來應該是穩定 Q 鎖模的區域會維持在連續波鎖模的型態，且持續一段區域，我們稱這個區域為磁滯區。在大部分的狀況下，只要是單一基橫模，產生連續波鎖模之後把輸入功率稍微往下降之後就能產生穩定的 Q 鎖模，且在更低的輸入功率時才會開始不穩定，很接近連續波鎖模時是穩定的 Q 鎖模。這種方法必須在很低的輸入功率下才能得到 Q 鎖模，並不實用。例如連續波鎖模通常產生在 700、800 mA 以上，所以能得到的倍數有限，約 2、3 倍；但如果能在 1300mA 時加上訊號產生器來做調制，就可以得到更高的峰值功率。

而在外加調制的部份，輸入電流的增加，振幅增加倍數越少，達共振所需的調制頻率越高，調制深度越低。在我們實驗數據的部份，最佳調制結果是輸入電流 900 mA、調制振幅 2.5 V 時，調制頻率為 123.5 kHz，調制深度為 69.61%，振幅增加的倍數為 8.5 倍，峰值功率約可達到 550 W。另一方面我們在固定輸入電流時，設定的調制振幅越大，由連續波鎖模產生穩定 Q 開鎖模所需要的調制頻率就越低。使用加調制的方法從連續波鎖模產生穩定 Q 開鎖模的過程中，會產生類似磁滯的現象，而且



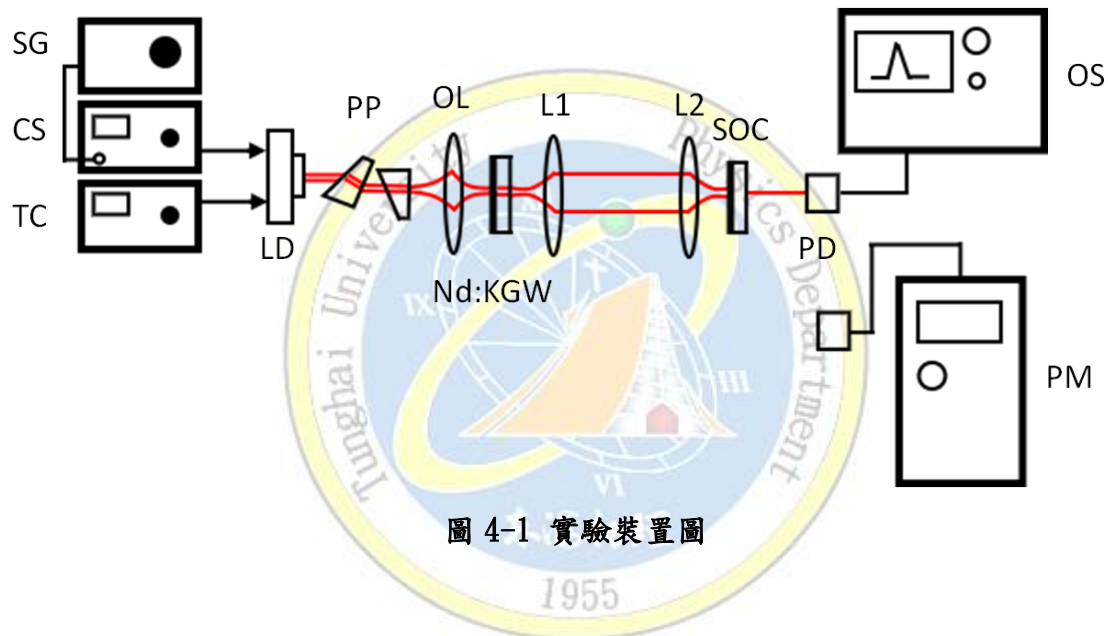
當調制頻率從較高往回降時，得到 Q 開關鎖模的振幅會比沒有往回降的  
振幅更高一些，鎖模狀態也更穩定。



## 第四章 Nd:KGW

在這個章節中，我們把雷射晶體由  $\text{Nd:GdVO}_4$  改為  $\text{Nd:KGW}$ ，分別在自由運轉下和外加調制下產生的被動鎖模做研究。

### 4-1 實驗架構及方法



- |                   |         |              |
|-------------------|---------|--------------|
| TC: 溫控器           | CS: 電流源 | LD: 雷射二極體    |
| PP: 菱鏡組           | OL: 物鏡  | Nd:KGW: 雷射晶體 |
| L1: 透鏡            | L2: 透鏡  | L3: 透鏡       |
| SOC: 半導體飽和吸收輸出耦合鏡 |         |              |
| PD: 光偵測器          | OS: 示波器 | PM: 功率偵測器    |
| SG: 訊號產生器         |         |              |

在這個部份中，把雷射晶體改為 $4 \times 4 \times 8 \text{ mm}^3$ 之半導體激發摻釹鎢酸鉀釷 (Nd:KGW)，摻釹量為 3%，Nd:KGW 泵浦面為波長 1067 nm 的抗反射鍍膜 (AR Coating) 以及波長為 1067 nm 的高反射鍍膜 (HR Coating) 以作為共振腔的端面鏡使用，在另一面為波長 810 nm 的高穿透鍍膜 (HT Coating)，進行第三章一樣的步驟。



## 4-2 自由運轉下的被動鎖模

本章我們將在不加調制的情況下，研究如何產生穩定的 Q 鎖模。產生連續波鎖模的條件是由雷射產生連續的相同振幅的穩定鎖模脈衝，而 Q 開關鎖模則是脈衝能量受到 Q 開關的高峰值的穩定鎖模脈衝所調制，我們將在本章中印證由連續波鎖模產生穩定 Q 鎖模之理論。

### 4-2-1 改變輸入電流之影響

隨著輸入功率的增加，會到達第一臨界功率開始產生雷射光 (CW)，再稍微增加輸入功率可以觀察到不穩定的 Q 鎖模 (UQML)，持續增加輸入功率 Q 鎖模 (QML) 會趨向穩定，再繼續增加輸入功率時，會到達第二臨界功率得到連續波鎖模 (CWML)。此與理論：當腔內脈衝能量高於臨界脈衝能量時，即可獲得連續波鎖模吻合，此外還有一個雙穩區，其狀態會在 Q 鎖模與連續波鎖模之間跳動不定，接下來才會變成連續波鎖模，這種情況在 Nd:GdVO<sub>4</sub> 時較不明顯。如圖 4-2，典型的不穩定 Q 鎖模、典型穩定的 Q 鎖模、典型穩定的連續波鎖模如圖 4-3。

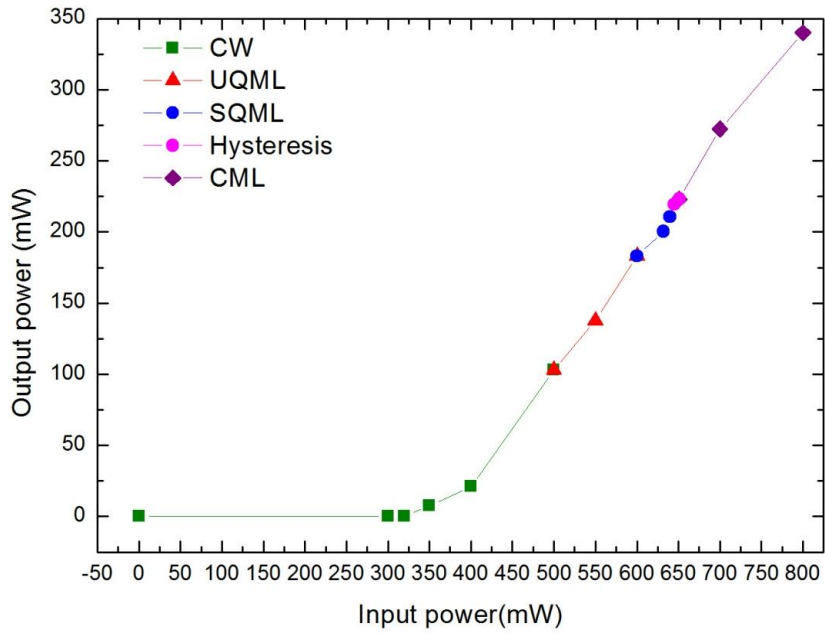
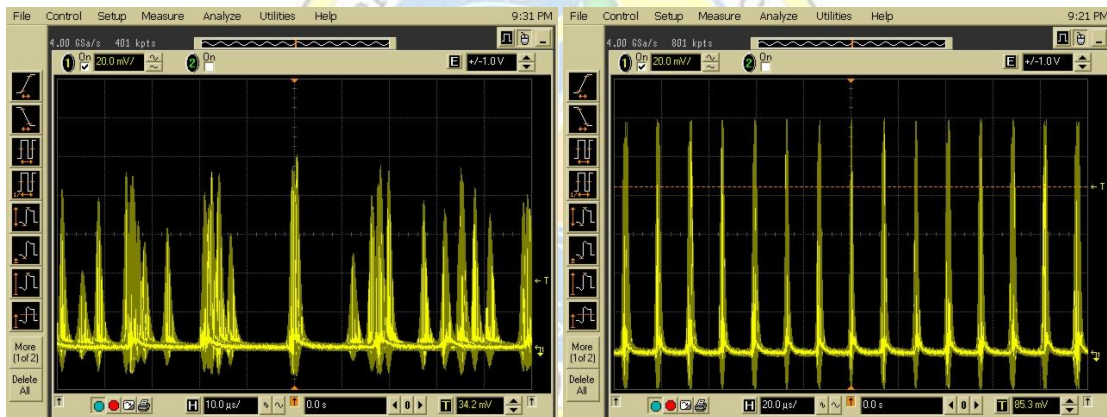
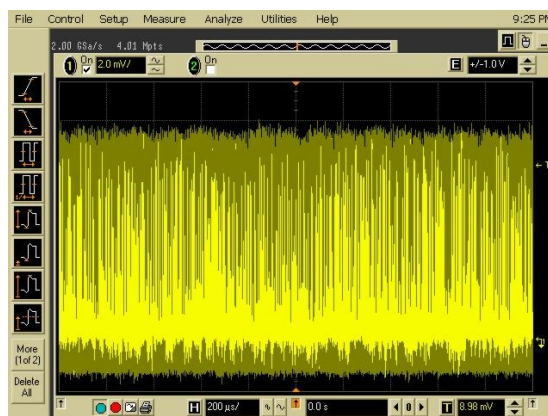


圖 4-2 輸入功率與輸出功率之關係圖



(a)

(b)



(c)

圖 4-3 Nd:KGW (a)典型不穩定 Q 鎖模 (b) 典型穩定 Q 開關 (c) 典型穩定 Q 開關在示波器上的圖形。

在產生穩定 Q 鎖模到連續波鎖模的過程中，會有類似磁滯的現象，當從較高輸入電流往回慢慢減少時，本來應該是穩定 Q 鎖模的區域會維持在連續波鎖模的型態，且持續一段區域，我們稱這個區域為磁滯區。如圖 4-4。

我們先找到磁滯區的兩邊端點位置：359 mW - 384 mW。輸入功率 359 mW 為產生穩定 Q 鎖模的位置，如果從這個位置開始增加輸入電流便會進入磁滯區，一直到 384 mW 時會產生連續波鎖模。圖中黑色三角形是從 Q 鎖模開始到產生連續波鎖模。一開始會先維持在 Q 鎖模的狀態，其振幅為產生連續波鎖模後振幅的 4.375 倍；接著在輸入功率 365 mW 時，仍是為持在 Q 鎖模，其振幅的倍數為 4.124 倍；在輸入功率 371 mW 時，振幅倍數為 3.899 倍；在輸入功率 376 mW 時，振幅倍數為 3.673 倍；在輸入功率 384 mW 時，會由 Q 鎖模變成連續波鎖模，此時的振幅我們設為 1 倍。而紅色三角形為，從輸入功率 384 mW 開始，會維持在連續波鎖模的狀態，其振幅為 1 倍，在輸入功率 376 mW 時，仍然維持在連續波鎖模，其振幅為 0.909 倍；在輸入功率為 371 mW 時，其振幅為 0.765 倍；在輸入功率為 365 mW 時，其振幅為 0.663 倍；在輸入功率為 359 時，會由連續波鎖模變成 Q 鎖模，此時的振幅為 4.375 倍。

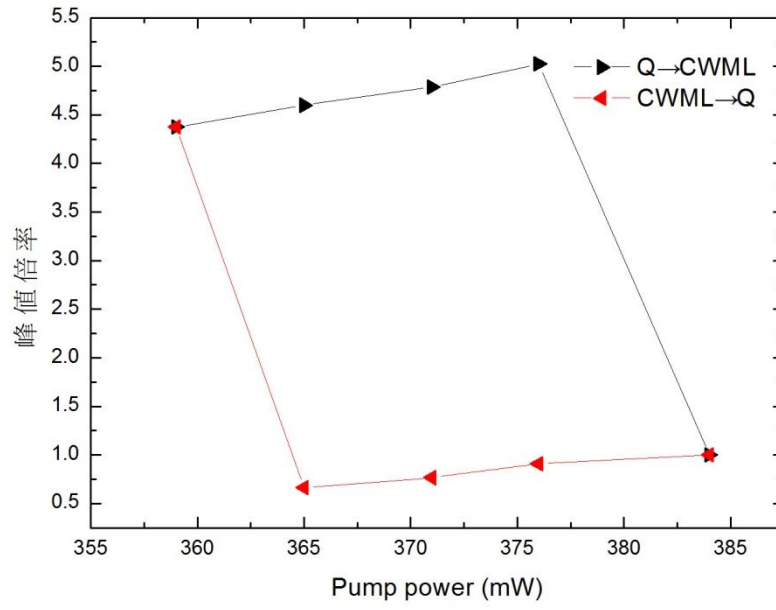


圖 4-4 輸入功率對磁滯現象關係圖



我們使用 COHERENT 公司所出產的自相關干涉儀來測量脈衝寬度，型號：FR103 Autocorrelator，採用非線性的方法量測雷射的脈衝寬度，以下是在示波器的圖形：

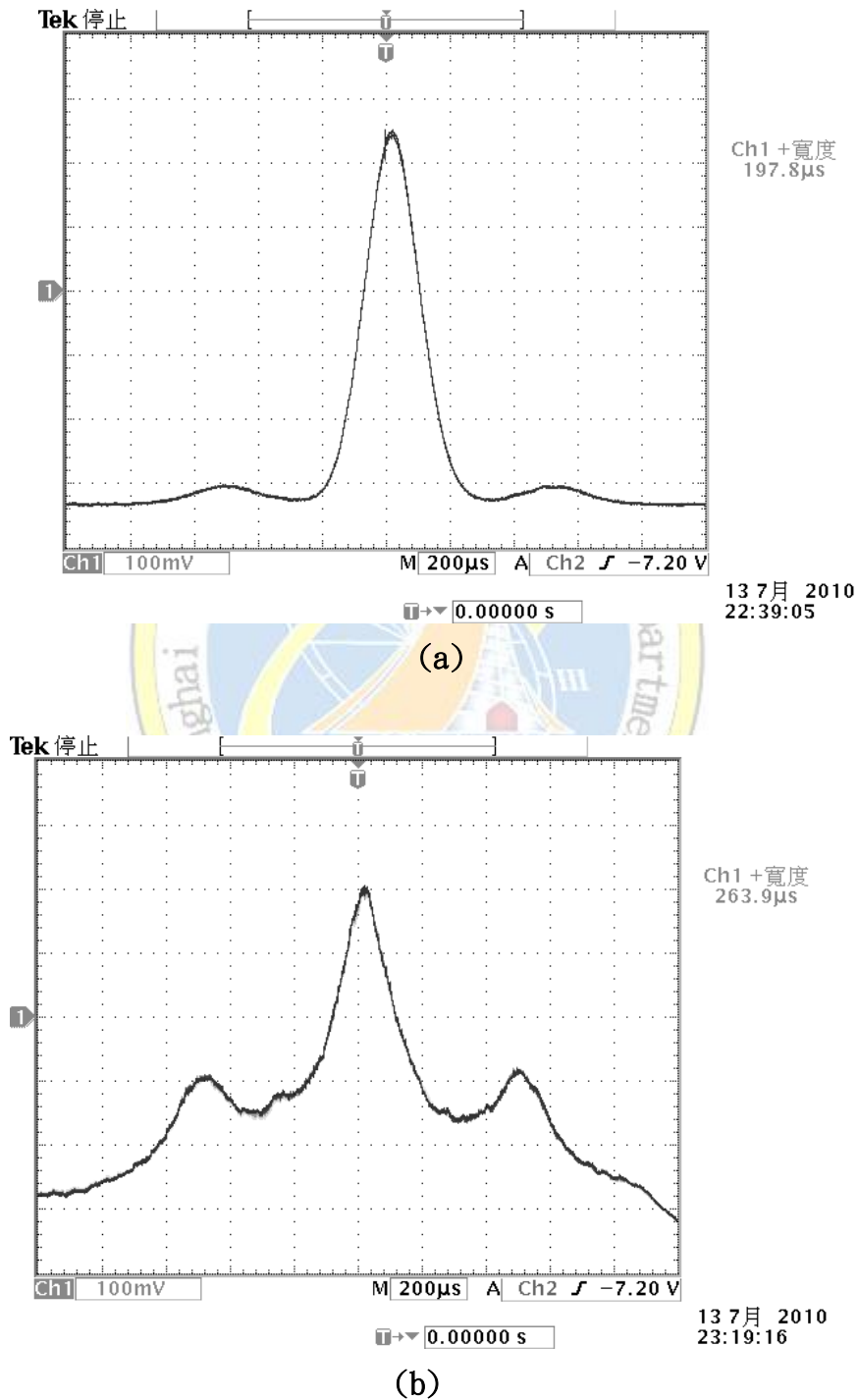


圖 4-5 是在腔長 120 cm 腔腸下使用兩焦距 7.5 cm 的透鏡，輸入功率為 660mW，(a) 連續波鎖模，換算後所得到之脈衝寬度為 4.41 ps。(b)Q 鎖模，脈衝寬度為 5 ps。



#### 4-2-2 調制振幅與頻率的效應

在這部份我們是在自由運轉 (Free running) 下，輸入電流 1300 mA，先調整共振腔，使其產生單一基橫模獲得連續波鎖模時，再降低輸入電流降至 632 mA 所產生的穩定 Q 鎖模，可以將振幅增加約 3 倍。

自由運轉下，輸入電流 1300 mA，平均輸出功率為 159.6 mW，連續波鎖模在示波器上的圖形，我們將連續波鎖模的振幅調為 20 mV，恰為示波器上的兩大格，以此為一個單位，再依據此單位對 Q 鎖模之振幅做比較，如圖 4-6 (a)。產生連續波鎖模之後，再將電流下降至 632 mA 時，所獲得的穩定 Q 鎖模在示波器上的圖形，平均輸出功率為 32.5 mW，與圖 4-6 (a) 比較之後，可以看出 Q 鎖模的振幅比連續波鎖模高約 3 倍，如圖 4-6 (b)。

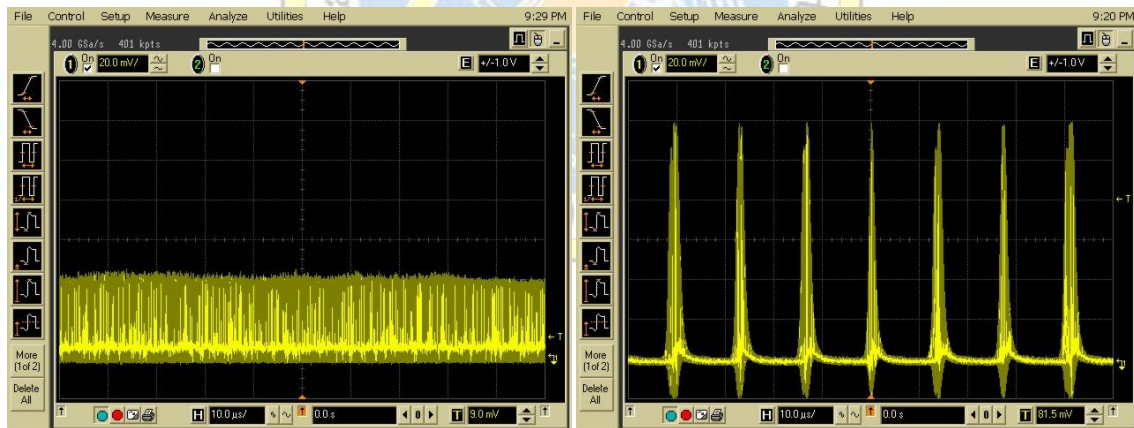


圖 4-6 (a) (b)

圖 4-6 (a) 在自由運轉下電流 1300 mA 時產生的連續波鎖模在示波器上顯示的圖形，平均輸出功率為 159.6 mW。(b) 將電流降至 632 mA 時產生穩定的 Q 開關鎖模，平均輸出功率為 32.5 mW。

當高階橫模或多橫模被激發時，就無法得到穩定的 Q 鎖模。我們在輸入電流 1300 mA 產生連續波鎖模時，將輸入電流降至 719 mA 卻得到不穩定 Q 鎖模。

自由運轉下，輸入電流 1300 mA，平均輸出功率 109.5 mW 時，連續波鎖模在示波器上的圖形，我們將連續波鎖模的振幅調為 20 mV，恰為示波器上的一大格，以此為一個單位，再依據此單位對 Q 鎖模之振幅做比較，如圖 3-7 (a)。產生連續波鎖模之後，再將電流下降至 719 mA 時，所獲得的不穩定 Q 鎖模在示波器上的圖形，平均輸出功率為 28.6 mW。由於 Q 鎖模圖形不穩定，故無法比較，如圖 4-7 (b)。

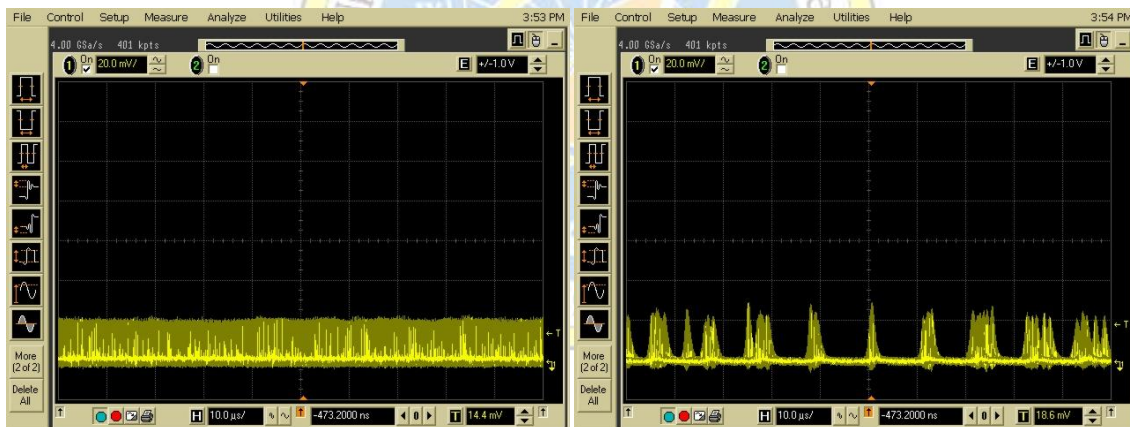


圖 4-7 (a) (b)

圖 4-7 (a)在自由運轉下電流 1300 mA 時產生的連續波鎖模在示波器上顯示的圖形，平均輸出功率為 109.5 mW。(b) 將電流降至 719 mA 時產生了穩定的 Q 開關鎖模，平均輸出功率為 28.6 mW。

## 4-3 外加調制下的被動鎖模

### 4-3-1 連續波鎖模外加調制產生之穩定 Q 開關鎖模

在自由運轉下，先調制共振腔使其產生基橫模，獲得連續波鎖模之後，再外加增益調制，當調制頻率跟系統的自然頻率共振時，就會產生穩定 Q 鎖模。

外加調制時，輸入電流 900 mA 至 1300 mA，每增加 100 mA 量測一次，從連續波鎖模變成穩定 Q 鎖模所需要的調制頻率對振幅改變的關係。900 mA 時從連續波鎖模變成 Q 鎖模之振幅倍數增加最多，振幅約為連續波鎖模時的 12 倍；1000 mA 時，約為連續波鎖模的 11.7 倍；1100 mA 時，約為連續波鎖模的 8.4 倍；1200 mA 時，約為連續波鎖模的 8.3 倍；1300 mA 時，約為連續波鎖模的 6 倍。如圖 4-8。

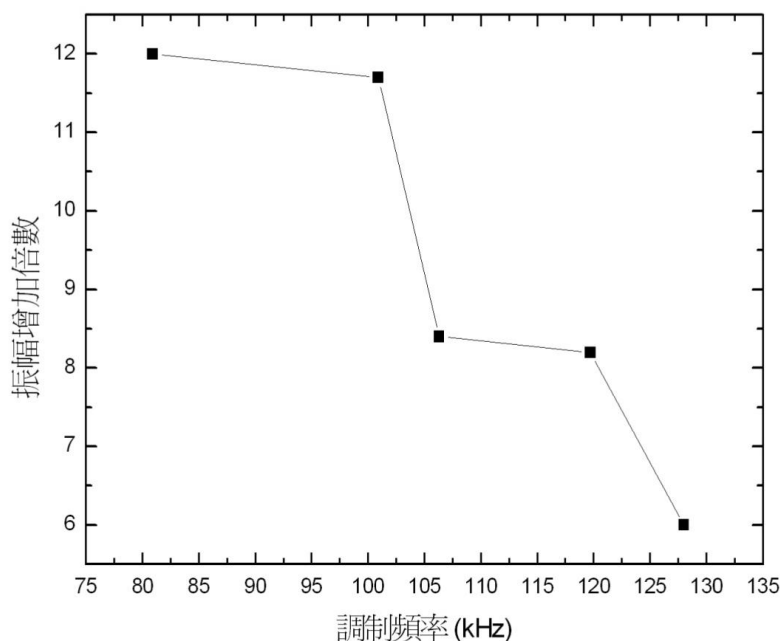


圖 4-8 調制頻率與振幅增加倍數之關係圖

自由運轉下，輸入電流 900 mA，平均輸出功率 79.8 mW 時，連續波鎖模在示波器上的圖形，我們將連續波鎖模的振幅調為 10 mV，恰為示波器上的兩小格，以此為一個單位，再依據此單位對加調制之後得到的 Q 鎖模振幅做比較，如圖 4-9 (a)。在自由運轉下產生連續波鎖模之後，外加調制振幅 2.0 V，調制頻率 80.9 kHz 時，所獲得的穩定 Q 鎖模在示波器上的圖形，平均輸出功率為 82.8 mW，與圖 4-9 (a) 比較之後，可以看出 Q 鎖模的振幅比連續波鎖模高約 12 倍，經由計算之後得知調制深度為 72.9 %，如圖 4-10 (b)。自由運轉下，輸入電流 1000 mA，平均輸出功率 95.1 mW 時，外加調制振幅 2.5 V，調制頻率 100.9 kHz，與圖 4-9 (a) 比較之後，可以看出 Q 鎖模的振幅比連續波鎖模高約 11.7 倍，經由計算之後得知調制深度為 72.5 %，如圖 4-9 (c)。自由運轉下，輸入電流 1100 mA，平均輸出功率 114.1 mW 時，外加調制振幅 2.5 V，調制頻率 106.3 kHz，與圖 4-9 (a) 比較之後，可以看出 Q 鎖模的振幅比連續波鎖模高約 8.4 倍，經由計算之後得知調制深度為 66.4 %，如圖 4-9 (d)。自由運轉下，輸入電流 1200 mA，平均輸出功率 134.6 mW 時，外加調制振幅 2.5 V，調制頻率 119.7 kHz，與圖 4-9 (a) 比較之後，可以看出 Q 鎖模的振幅比連續波鎖模高約 8.3 倍，經由計算之後得知調制深度為 59.8 %，如圖 4-9 (e)。自由運轉下，輸入電流 1300 mA，平均輸出功率 150.9 mW 時，外加調制振幅 2.5 V，調制頻率 128 kHz，與圖 4-9 (a) 比較之後，可以看出 Q 鎖模的振幅比連續波鎖模高約 6 倍，經由計算之後得知調制深度為 53.5 %，如圖 4-9 (e)。

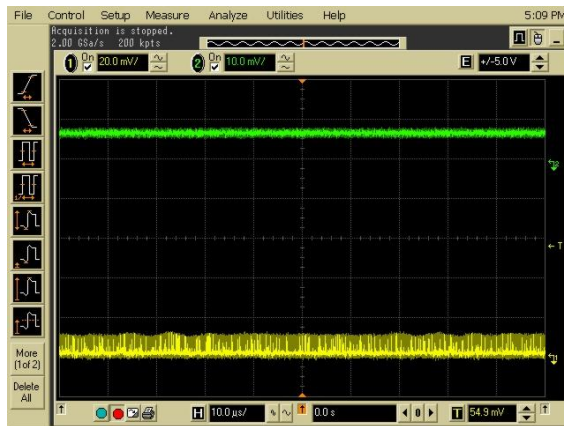
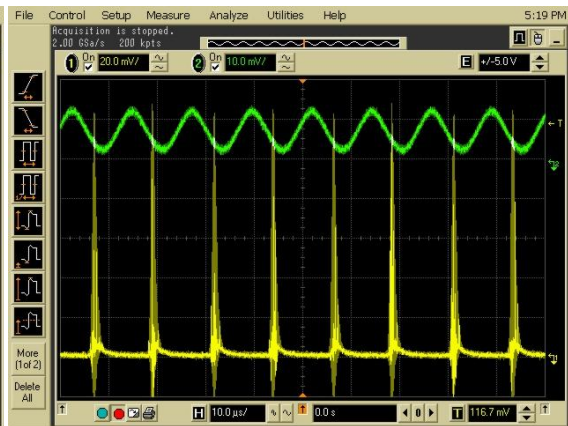
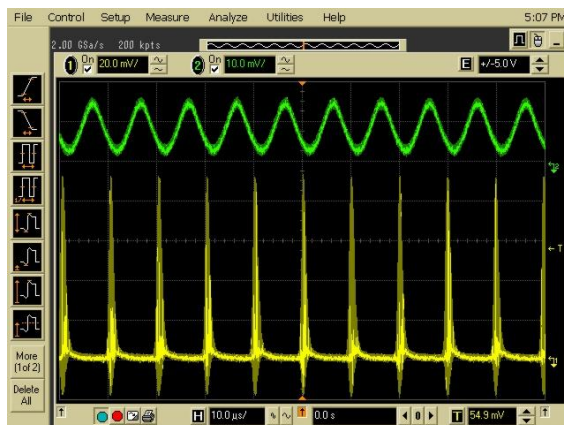


圖 4-9

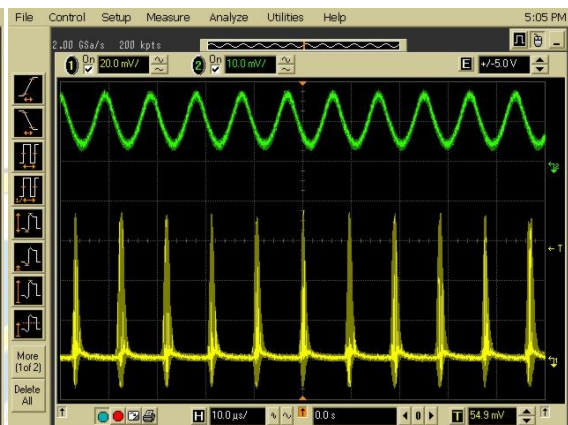
(a)



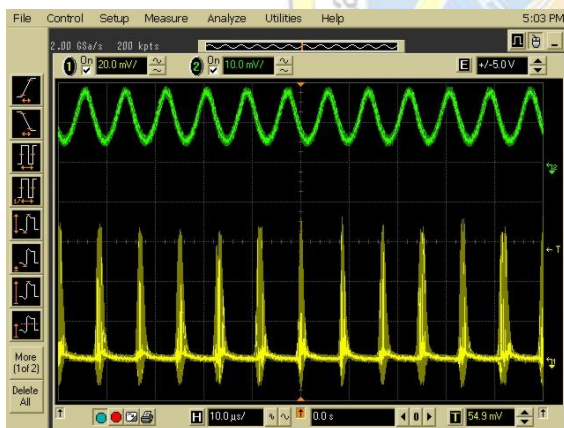
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

圖 4-9 (a) 為 900 mA 時為加調制時的在示波器上顯示的連續波鎖模圖形，平均輸出功率為 79.8 mW。(b) 調制振幅為 2.0 V，調制頻率為 80.9 kHz，調制深度為 72.9%，平均輸出功率為 82.8 mW。(c) 調制振幅為 2.5 V，調制頻率為 100.9 kHz，調制深度為 72.5%，平均輸出功率為 98.6 mW。(d) 調制頻率為 106.3 kHz，調制深度為 66.4%，平均輸出功率為 115 mW。(e) 調制頻率為 119.7 kHz，調制深度為 59.8%，平均輸出功率為 135.2 mW。(f) 調制頻率為 128 kHz，調制深度為 53.5%，平均輸出功率為 152 mW。

依以上數據可簡化成表 4-1：

表 4-1

電流 (mA)	Ampl (V)	Freq (kHz)	未加調制		加調制		$\frac{A/2}{B}$ 調制深度 (%)	輸出功率 (mW)		振幅 增加倍 數
			Channel1 $V_{max}$	Channel2 $V_{max}(B)$	Channel1 $V_{max}$	Channel2 $V_{p-p}(A)$		未加調 制	加調制	
900	2.0	82.9	11.42	8.73	114	12.63	72.3	80.6	83.6	12
1000	2.5	86.1	11.9	10.16	135.6	15.75	77.5	96.4	98	11.7
1100	2.5	106.7	11.18	11.51	93.2	15.23	66.15	116.3	117.5	8.4
1200	2.5	120	11.39	13	86.2	15.37	59.11	135.4	136.4	8.3
1300	2.5	141.7	11.5	13.9	69.7	14.27	51.3	155.6	158.4	6

由表中可以看出隨著輸入電流的增加，振幅增加倍數越少，達共振所需的調制頻率越高，調制深度越低。



### 4-3-2 調制振幅與頻率的效應

我們將藉由在固定輸入電流與調制振幅時，改變頻率與振幅改變的關係。將電流固定為 1100 mA，在固定不同調制振幅下，產生穩定 Q 鎖模之後，藉由調制頻率的改變，振幅倍數改變為：1 倍、0.75 倍、0.5 倍和 0.25 倍時的趨勢，由圖中可以看出來隨著調制振幅的增加，所需要的調制頻率越低，在調制振幅 2.4 V 和 2.5 V 時，調制頻率下降的比例比其他調制振幅時更明顯。如圖 4-10。

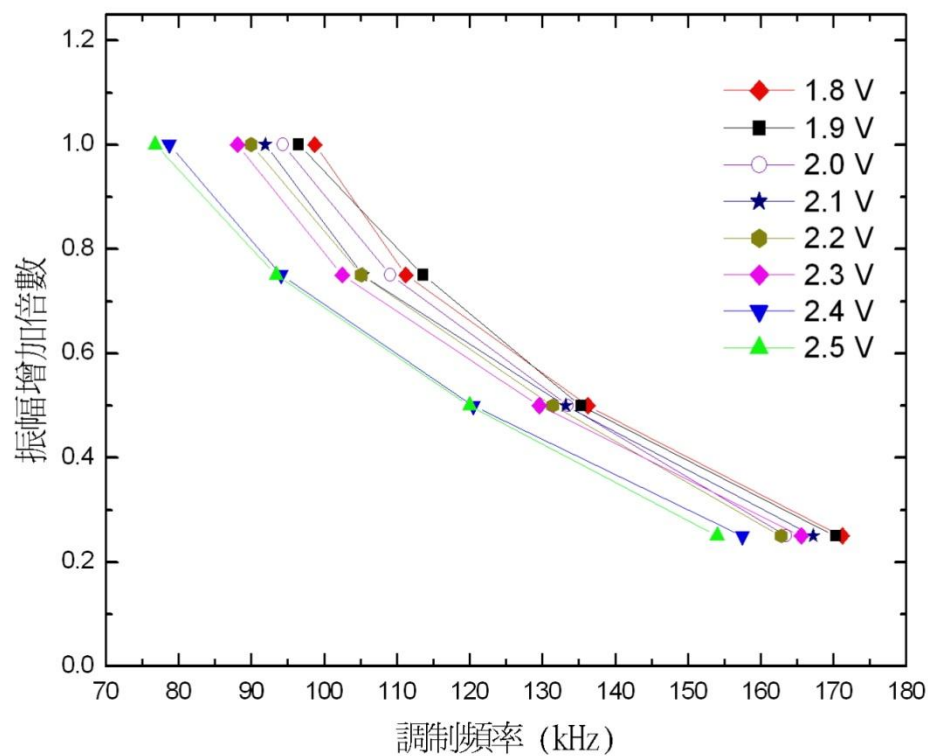


圖 4-10 固定不同振幅下改變調制頻率的影響。

電流固定為 1100 mA，我們在系統中獲得連續波鎖模之後，加上調制振幅為 1.5 V，調制頻率 105.4kHz 的時候會得到穩定 Q 鎖模。圖 4-11(a) 為調制頻率 90 kHz 時即將變成穩定 Q 鎖模的狀態；圖 4-11 (b) 為調制頻率 105.4 kHz 時，從連續波鎖模到產生穩定 Q 鎖模的圖形。

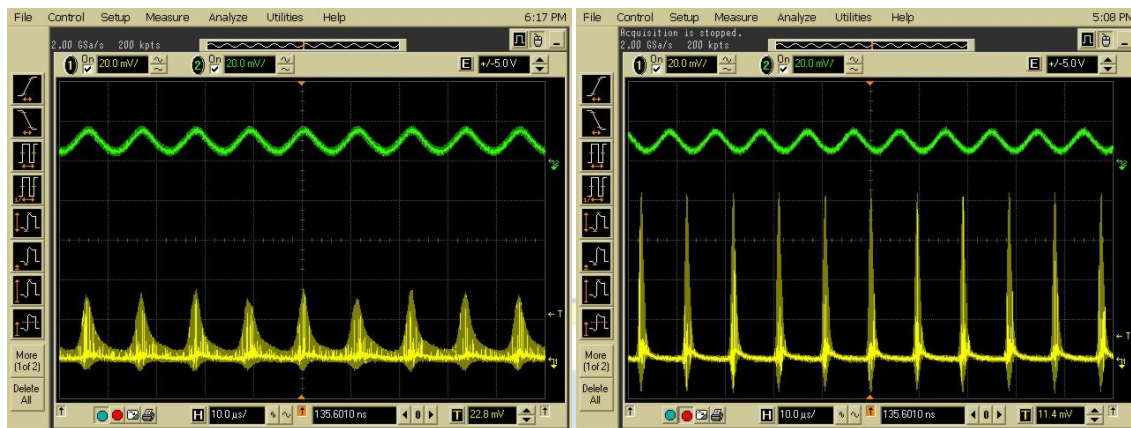


圖 4-11 (a) 調制頻率 90 kHz 時在示波器上的圖形；(b) 調制頻率 105.4 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開關鎖模圖形。

我們先把調制頻率在增加到 105.4kHz 產生穩定 Q 鎖模之後，在將調制頻率由 105.4 kHz 往低改變，我們發現在 105.4 kHz 至 90 kHz 中間有類似磁滯的現象；當從調制頻率低到高的情況下，在 92.3 kHz 時應該還不是穩定 Q 鎖模，但如果已經產生穩定 Q 鎖模之後在將調制頻率降至 92.3 kHz 時，卻發現圖形還維持在穩定 Q 鎖模的狀態。下圖為調制頻率同為 92.3 kHz，卻因為磁滯現象導致不同狀態的圖形如下：



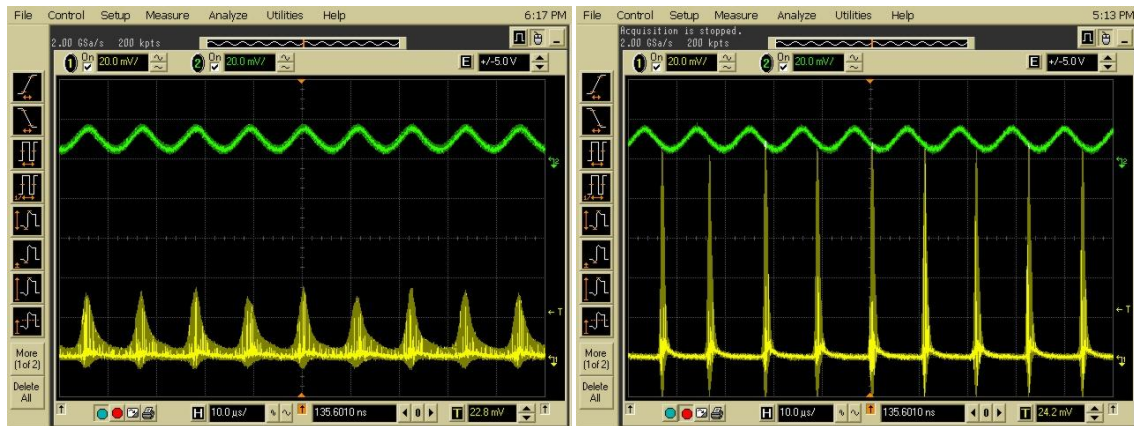


圖 4-12 (a) (b)

圖 4-12 (a) 調制頻率 92.3 kHz 時在示波器上的圖形；(b) 調制頻率 92.3 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開關鎖模圖形。

我們先把調制頻率增加到 105.4kHz 產生穩定 Q 鎖模之後，再將調制頻率往下降至 92.3 kHz（此調制頻率包含在磁滯區中），我們發現 Q 鎖模的振幅會增加，而且 Q 鎖模也更穩定；但是如果此時將增益調制拿掉在同樣調制頻率 92.3 kHz 接回去時，並不會得到圖 4-13 (a) 的圖形，要得到此振幅必須使用先使系統得到穩定 Q 鎖模之後，在將調制頻率下降的方法才能得到。



圖 4-13 (a) (b)

圖 4-13 (a) 調制頻率 92.3 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開關鎖模圖形。(b) 調制頻率 105.4 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開關鎖模圖形。

當我們在調制振幅 1.5 V，調制頻率 105.4 kHz 得到穩定 Q 鎖模之後，發現再繼續增加調制頻率時，會有一段 Q 鎖模的穩定區，在這一段調制頻率的 Q 鎖模圖形會很穩定，幾乎不會跳動。圖 4-14 (a) 為 155.1 kHz 時的圖形，圖 4-14 (b) 為 111.6 kHz 時的圖形，振幅幾乎沒有改變。



圖 4-14 (a) (b)  
圖 4-14 (a) 為 105.4 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開關鎖模圖形。(b) 111.6 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開關鎖模圖形。

輸入電流 1100 mA，在自由運轉下得到連續波鎖模之後，將調制振幅設為 1.5 V 時，可以在 105.4 kHz 時得到穩定 Q 鎖模，並將振幅調為 80 mV，恰為示波器上的四大格，此時我們將由 105.4 kHz 增加至 131.8 kHz 時，穩定 Q 鎖模的振幅降為原本的 0.75 倍，也就是示波器上的 3 大格左右。



圖 4-15 (a) (b)  
圖 4-15 為 (a) 為 105.4 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開關鎖模圖形。(b) 為 131.8 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開關鎖模圖形。

得到圖 4-20 的結果之後，我們繼續將調制頻率由 131.8 kHz 增加至 152 kHz 時，穩定 Q 鎖模的振幅降得更低，降為原本的 0.5 倍如圖 4-16 (b)，也就是示波器上約兩大格。



圖 4-16 (a) 調制頻率 105.4 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開關鎖模圖形。(b) 調制頻率 152 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開關鎖模圖形。

得到圖 4-21 的結果之後，我們繼續將調制頻率由 152 kHz 增加至 180 kHz 時，穩定 Q 鎖模振幅持續下降，降為原本的 0.25 倍如圖 4-17 (b)，也就是在示波器上約一大格。

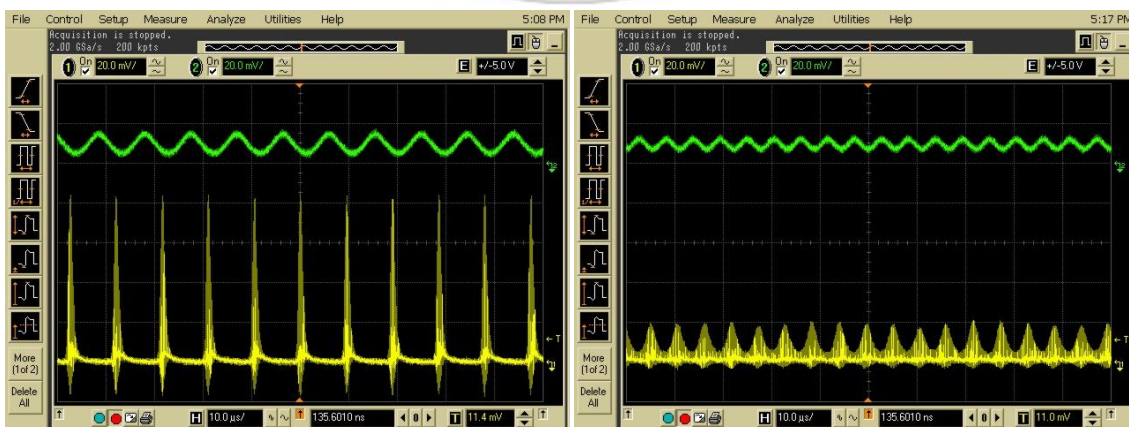


圖 4-17 (a) 調制頻率 105.4 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開關鎖模圖形。(b) 調制頻率 180 kHz 時在示波器上的穩定 Q 開關鎖模圖形。

我們將上述磁滯現象作成峰值倍率對調制頻率之關係圖，如圖 4-18。

我們先找到磁滯區的兩邊端點位置：100 kHz - 126 kHz。調制頻率 126 kHz 為產生穩定 Q 鎖模的位置，如果從這個位置開始降低調制頻率便會進入磁滯區，一直到 100 kHz 時會產生連續波鎖模。圖中黑色三角形是從 Q 鎖模開始到產生連續波鎖模。從調制頻率 126 kHz 開始會先維持在 Q 鎖模的狀態，其振幅為產生連續波鎖模後振幅的 2.069 倍；接著在調制頻率 124 kHz 時，仍是維持在 Q 鎖模，其振幅的倍數為 2.14 倍；在調制頻率 116 kHz 時，振幅倍數為 2.334 倍；在調制頻率 108 kHz 時，振幅倍數為 2.673 倍；在調制頻率 100 kHz 時，會由 Q 鎖模變成連續波鎖模，此時的振幅我們設為 1 倍。而紅色三角形為自連續波鎖模開始到產生 Q 鎖模，從調制頻率 100 kHz 開始，會維持在連續波鎖模的狀態，其振幅為 1 倍，在調制頻率 108 kHz 時，仍然維持在連續波鎖模，其振幅為 1.003 倍；在調制頻率為 116 kHz 時，其振幅為 1.028 倍；在調制頻率為 124 kHz 時，其振幅為 1.052 倍；在調制頻率為 125 kHz 時，會由連續波鎖模變成 Q 鎖模，此時的振幅為 2.069 倍。

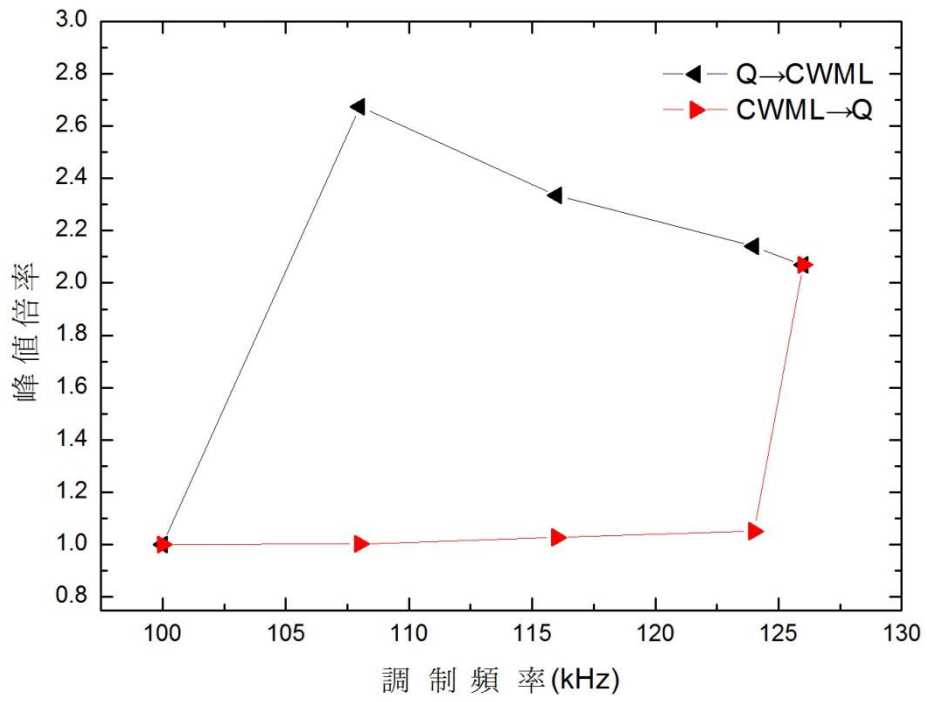


圖 4-18 輸入功率對磁滯現象關係圖



## 4-4 結果與討論

隨著輸入功率的增加，會到達第一臨界功率開始產生雷射光，再稍微增加輸入功率可以觀察到不穩定的 Q 鎖模，持續增加輸入功率 Q 鎖模會趨向穩定，再繼續增加輸入功率時，會到達第二臨界功率得到連續波鎖模。在產生穩定 Q 鎖模到連續波鎖模的過程中，會有類似磁滯的現象，當從較高輸入電流往回慢慢減少時，本來應該是穩定 Q 鎖模的區域會維持在連續波鎖模的型態，且持續一段區域，我們稱這個區域為磁滯區。在大部分的狀況下，只要是單一基橫模，產生連續波鎖模之後把輸入功率稍微往下降之後就能產生穩定的 Q 鎖模，且在更低的輸入功率時才會開始不穩定，很接近連續波鎖模時是穩定的 Q 鎖模。這種方法必須在很低的輸入功率下才能得到 Q 鎖模，並不實用。例如連續波鎖模通常產生在 700、800 mA 以上，所以能得到的倍數有限，約 2、3 倍；但如果能在 1300mA 時加上訊號產生器來做調制，就可以得到更高的峰值功率。

而在調制的部份，輸入電流的增加，振幅增加倍數越少，達共振所需的調制頻率越高，調制深度越低。實驗結果之最佳調制為輸入電流 1100 mA、調制振幅 2.0 V 時，調制頻率為 80.9 kHz，調制深度為 72.9%，振幅增加的倍數為 12 倍，峰值功率約可達到 2970 W。和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶體特性類似的：在固定輸入電流時，設定的調制振幅越大，由連續波鎖模產生穩定 Q 開關鎖模所需要的調制頻率越低；使用加調制的方法從連續波鎖模產生穩定 Q 開關鎖模的過程中，也有類似磁滯的現象；調制頻率從較

高往回降時，得到 Q 開關鎖模的振幅會比沒有往回降的振幅更高一些，鎖模狀態也更穩定。



## 第五章結論

---

我們由兩面焦距 7.5 公分的透鏡，一個飽和吸收 2%、調制深度 1.2%、透射率 2.1 %飽和吸收輸出耦合鏡(SOC)，和雷射晶體組成四鏡式直腔，我們分別使用鎖模摻釹釷酸釷( $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ )和摻釹鎢酸鉀釷( $\text{Nd}:\text{KGW}$ )雷射晶體來在自由運轉下產生穩定 Q 鎖模，以及在外加調制的條件下來產生穩定 Q 鎖模。

在自由運轉下，我們先調整共振腔，使其產生單一基橫模獲得連續波鎖模時，再藉由調降輸入功率的方式來產生 Q 開關，但是這種方法必須在輸入功率較低的情況下才能得到 Q 鎖模， $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 在自由運轉下由連續波鎖模調降功率的方式得到的 Q 鎖模，振幅僅增加 3 倍，峰值功率約為 194 W， $\text{Nd}:\text{KGW}$  僅增加 3.75 倍，峰值功率約為 927.8 W，所以比較之後並不實用。

而在外加調制的情況下，我們改變頻率到接近其自由運轉時 Q 開關鎖模的鬆弛震盪頻率時，在一個調變頻寬下可以得到穩定的 Q 鎖模，我們發現無論是  $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$  或  $\text{Nd}:\text{KGW}$ ，其輸入功率越高，調制振幅增加的倍數越少；調變振幅的增大有利於調變頻寬的增加。 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 最佳調制為輸入電流 900 mA、調制振幅 2.5 V 時，調制頻率為 123.5 kHz，調制深度為 69.61%，振幅增加的倍數為 8.5 倍，峰值功率約可達到 550 W； $\text{Nd}:\text{KGW}$



最佳調制為輸入電流 1100 mA、調制振幅 2.0 V 時，調制頻率為 80.9 kHz，調制深度為 72.9%，振幅增加的倍數為 12 倍，峰值功率約可達到 2970 W，以實驗結果來看，Nd:KGW 的調制頻率可以比 Nd:GdVO<sub>4</sub> 的低很多。而在固定輸入電流時，Nd:GdVO<sub>4</sub> 和 Nd:KGW 的某些情況類似，其設定的調制振幅越大，由連續波鎖模產生穩定 Q 開關鎖模所需要的調制頻率越低；使用加調制的方法從連續波鎖模產生穩定 Q 開關鎖模的過程中，也都有類似磁滯的現象；調制頻率從較高往回降時，得到 Q 開關鎖模的振幅會比沒有往回降的振幅更高一些，Q 鎖模狀態也更穩定。

根據理論我們知道雷射晶體的頻寬以及上能階半衰期分別和其所產生的脈衝寬度以及脈衝能量有關。頻寬越寬，可產生越短的脈衝，半衰期越長，儲存能量的效果越好，脈衝能量越高，鬆弛震盪頻率越小。從實驗可以驗證，由於 Nd:KGW 晶體的頻寬較寬、上能階半衰期較長，可產生較短的光脈衝，以及更高的峰值功率。

和其他產生穩定 Q 開關鎖模的實驗相比，我們能在低功率之同調光源下，以及利用外加一個訊號產生器增益調制來產生穩定 Q 開關鎖模，我們的方法架構簡單且方便有效。也許將來可以再對透鏡的色散進行補償，使脈衝寬度能更接近飛秒級 (femtosecond)，以在實際應用和研究上都能有更大的幫助。

## 参 考 文 献

- 
- [1] Hönninger et al., “Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking.” J. Opt. Soc. Am. B/ Vol. 16, No. 1/January 1999.
- [2] Prasanta Kumar Datta et al., “Enhancement of stability and efficiency of a nonlinear mirror mode locked Nd:YVO<sub>4</sub> oscillator by an active Q-switch.” 23 August 2004/Vol. 12, No. 17/OPTICS EXPRESS 4042.
- [3] Yonggang Wang et al., “Passively Q-switched and mode-locked diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser with LT-GaAs output coupler.” Optics Communications 261(2006) 332-335.
- [4] Ja-Jon Lin et al., “Stable Q-switched mode-locked Nd<sup>3+</sup>:LuVO<sub>4</sub> laser by Cr<sup>4+</sup>:YAG crystal.” 13 October 2008/Vol. 16, No.21/OPTICS EXPRESS 16538.
- [5] M.Weitz et al., “Stable Q-switch mode-locking of Nd:YVO<sub>4</sub> laser with semiconductor saturable absorber.” Appl. Phys. B 92, 1-3(2008)
- [6] A. I. Zagumennyi, V. G. Ostroumov, I. A. Shcherbarkov, T. Jensen, J. P. Meyn, and G. Huber, “The Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal: a new material for diode-pumped lasers.” Sov. J. Quantum Electron. 22, 1071 (1992).
- [7] Th. Graf and J. E. Balmer, “Lasing Properties of Diode Laser-Pumped Nd:KGW.” Institute of Applied Physics, University of Bern, 3012 Bern, Switzerland.
- [8] HERMANN A.HAUS et al., Parameter Ranges for CW Passive Mode Locking. IEEE J. Quantum Electronics, Vol. QE-12 March 197.
- [9] Shu Namiki et al., Energy rate equations for mode-locked laser. J. Opt. Soc. Am. B, 2099-2111(1997).
- [10] C. Hönninger et al., Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking. J. Opt. Soc. Am. B/Vol. 16, No.1/January 1999.
- [11] F.X. Kärtner, L. R. Brovelli, D. Kopf, M. Kamp, I. Calasso, and U. Keller, “Control of solid-state laser dynamics by semiconductor devices.” Opt. Eng. 34, 2024-2036(1995).
- [12] K. J. Weingarten, B. Braun, and U. Keller., In situ small-signal gain of solid-state lasers determined from relaxation oscillation frequency measurements. OPTICS LETTERS / Vol. 19, No. 15 / August 1, 1994.
- [13] <http://www.newlightphotonics.com/KGW.html>
- [14] <http://www.alphas.com/products/laser-components/laser-crystals.html>
- [15] [http://www.batop.de/products/overview/SOC\\_flyer.pdf](http://www.batop.de/products/overview/SOC_flyer.pdf)

## 附錄

兩種晶體參數特性比較表[13][14]：

Formula	Nd:GdVO <sub>4</sub>	Nd:KGW
Gain Bandwidth	0.8 nm @ 1064 nm	2.73 nm
Absorption Coefficient [cm <sup>-1</sup> ] @ doping 1%	74.0 @ 810 nm ( $\pi, e$ )	4.5
Pump Wavelength	808.4 nm	811 nm
Absorption Line Width [nm]	3 ( $\pi, e$ )	12
Lattice Constants	a:0.721 b:0.635	a=8.10, b=10.43, c=7.60, $\beta=94.4$
Melting Point	1780 °C	1075 °C
Hardness, Mohs	4.6 – 5	4
Density	5.48 g/cm <sup>3</sup>	7.27g/cm <sup>3</sup>
Thermal Conductivity	11.7 W/m/K	2.8[100]; 2.2[010]; 3.5[001] W/m/K
Fluorescent Lifetime	~ 95 $\mu$ s	110 $\mu$ s (3% doping), 90 $\mu$ s ( 8% doping)
Thermal Expansion	$a_a=1.5 \times 10^{-6}/K$ $a_c=7.3 \times 10^{-6}/K$	4.0[100]; 3.5[010]; 8.5[001] 10 <sup>-6</sup> /K
Emission Cross Section	$7.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$	$4.3 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
Lasing Wavelength	1062.9 nm	1067.2 snm
Absorption Linewidth (FWHM)	3 nm	4.5nm
Absorption coefficient ( 3% Nd)	$57 \text{ cm}^{-1}$ (1% Nd)	$20 \text{ cm}^{-1}$ ( 3% Nd)

半導體飽和吸收輸出耦合鏡 (SOC) 參數[15] :

Parameters	SOC
Chip area	5 mm × 5 mm
Chip thickness	400 μm
Laser wavelength	$\lambda = 1040 \text{ nm}$
Transmittance	3%(1040 nm), 2.1%(1064 nm)
Absorptance	$A_0 = 2\%$
Modulation depth	$\Delta R = 1.2\%$
Non-saturable loss	$A_{ns} = 0.8\%$
Saturation fluence	$90 \mu\text{J}/\text{cm}^2$
Relaxation time constant	$t \leq 10 \text{ ps}$