

東海大學物理學系碩士論文

具半導體飽和吸收輸出耦合鏡之
被動鎖模摻釷釷酸釷雷射中共振腔組態相關效應之
研究

**Resonator configuration dependent effects in a passively
mode-locked Nd:GdVO₄ laser with a semiconductor
saturable absorber output coupler**

研究生：侯仁翔
指導教授：吳小華 教授

中華民國九十七年六月

誌謝

這篇論文能夠完成，勢必要感謝很多人，首先一定先要感謝吳小華老師這幾年的指導，讓我對雷射物理有更深一步的了解，並培養我實驗、解決問題以及做簡報的能力，實驗室的同學和學弟也給了我許多的幫助和鼓勵，致上我的萬分謝意。

感謝 建勛從我入實驗室以來給予我許多基礎上的指導，在我遇到困難時，適時的幫助我解決問題以及給予意見；也感謝志遠學弟在快畢業前晚上還在實驗室的陪伴，與我聊天、跑步。

最要感謝的人，還是我的父母以及姐姐，感謝他們支持我完成研究所的學業，讓我能夠安心的讀完碩士兩年。

最後期盼大家都能順利完成學業，過得快樂，感謝大家。

2008 年於台中東海

目錄



誌謝	i
目錄	ii
圖表目錄	iii
中文摘要	vii
英文摘要	viii
第一章 序論	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	12
第三章 低閾值的連續波鎖模雷射	24
3.1 實驗架構與方法	24
3.2 實驗結果與討論	27
3.3 相同焦距透鏡不同腔長之影響	43
3.4 相同腔長下不同焦距透鏡之影響	49
第四章 最佳輸出功率的連續波鎖模雷射	53
4.1 相同焦距透鏡不同腔長之影響	53
4.2 相同腔長下不同焦距透鏡之影響	57
4.3 激發光束分佈對連續波鎖模雷射之影響	59
4.4 實驗結果與討論	61
第五章 結論與未來展望	62
5.1 結論	62
5.2 未來工作與展望	64
參考文獻	65
附錄 1 摻釹釩酸釷晶體(ND:GdVO ₄)參數	67
附錄 2 半導體飽和吸收輸出耦合鏡的參數	68
附錄 3 1.5 W 半導體雷射 輸入電流 VS 輸出功率表	69

圖表目錄

圖 2-1 連續波鎖模與 Q 開關鎖模之平均功率對時間的作圖-----	6
圖 2-2 60cm 腔長 2.5cm 透鏡固定 $L_3=2.5\text{cm}$ 光點大小對 L_1 作圖 -----	15
圖 2-3 60cm 腔長 2.5cm 透鏡固定 $L_1=2.135\text{cm}$ 光點大小對 L_3 作圖- -----	16
圖 2-4 120cm 腔長 2.5cm 透鏡固定 $L_3=2.5\text{cm}$ 光點大小對 L_1 作圖-- -----	17
圖 2-5 120cm 腔長 2.5cm 透鏡固定 $L_1=2.135\text{cm}$ 光點大小對 L_1 作圖- -----	18
圖 2-6 2.5cm 透鏡固定 $L_1=2.135\text{cm}$, $L_3=2.5\text{cm}$ 光點大小對 L_2 作圖 -----	19
圖 2-7 60cm 腔長 7.5cm 透鏡固定 $L_3=7.05\text{cm}$ 光點大小對 L_1 作圖- -----	20
圖 2-8 60cm 腔長 7.5cm 透鏡固定 $L_3=7.25\text{cm}$ 光點大小對 L_1 作圖- -----	21
圖 2-9 60cm 腔長 7.5cm 透鏡固定 $L_3=7.45\text{cm}$ 光點大小對 L_1 作圖- -----	21
圖 2-10 120cm 腔長 10cm 透鏡固定 $L_3=10.06\text{cm}$ 光點大小對 L_1 作圖 -----	23
圖 2-11 120cm 腔長 10cm 透鏡固定 $L_1=10.36\text{cm}$ 光點大小對 L_3 作圖 -----	23
圖 3-1 實驗裝置圖-----	24
圖 3-2 60cm 腔長 7.5cm 透鏡最低 CWML 閾值輸出功率 VS 輸入功率圖	



圖 3-3 共振腔組態示意圖-----	29
圖 3-4 158.2mW 移動 F1 透鏡輸出功率與位置關係圖-----	29
圖 3-5 158.2mW 移動 F1 透鏡光點大小對 L1 作圖-----	30
圖 3-6 158.2mW 移動 SOC 輸出功率與位置關係圖-----	31
圖 3-7 158.2mW 移動 SOC 光點大小對 L3 作圖-----	32
圖 3-8 111.5mW 移動 F1 透鏡輸出功率與位置關係圖-----	33
圖 3-9 111.5mW 移動 F1 透鏡光點大小對 L1 作圖-----	34
圖 3-10 111.5mW 移動 SOC 輸出功率與位置關係圖-----	35
圖 3-11 111.5mW 移動 SOC 光點大小對 L3 作圖-----	36
圖 3-12 使用 Autocorrelator 在示波器上之示意圖-----	37
圖 3-13 連續波在示波器上示意圖-2ns -----	38
圖 3-14 連續波在示波器上示意圖-200 μ s -----	38
圖 3-15 連續波在示波器上示意圖-5 μ s -----	39
圖 3-16 Q 開關鎖模在示波器上示意圖-50 μ s -----	39
圖 3-17 Q 開關鎖模在示波器上示意圖-2 μ s -----	40
圖 3-18 Q 開關鎖模在示波器上示意圖-200ns -----	40
圖 3-19 連續波鎖模在示波器上示意圖-10 μ s -----	41
圖 3-20 連續波鎖模在示波器上示意圖-200ns -----	41
圖 3-21 連續波鎖模在示波器上示意圖-5ns -----	42
圖 3-22 焦距 2.5cm 透鏡不同腔長下輸出功率與輸入功率關係圖--	43
圖 3-23 焦距 2.5cm 透鏡 60cm 腔長下連續波鎖模波形圖-2ns ----	44
圖 3-24 焦距 2.5cm 透鏡 60cm 腔長下連續波鎖模波形圖-2 μ s ---	44
圖 3-25 焦距 2.5cm 透鏡 120cm 腔長下連續波鎖模波形圖-2ns ---	44
圖 3-26 焦距 2.5cm 透鏡 120cm 腔長下連續波鎖模波形圖-20 μ s --	44



圖 3-27	焦距 7.5cm 透鏡不同腔長下輸出功率與輸入功率關係圖	45
圖 3-28	焦距 7.5cm 透鏡 60cm 腔長下連續波鎖模波形圖-2ns	46
圖 3-29	焦距 7.5cm 透鏡 60cm 腔長下連續波鎖模波形圖-200ns	46
圖 3-30	焦距 7.5cm 透鏡 120cm 腔長下連續波鎖模波形圖-2ns	46
圖 3-31	焦距 7.5cm 透鏡 120cm 腔長下連續波鎖模波形圖-200 μ s	46
圖 3-32	焦距 10cm 透鏡不同腔長下輸出功率與輸入功率關係圖	47
圖 3-33	焦距 10cm 透鏡 60cm 腔長下連續波鎖模波形圖-2ns	48
圖 3-34	焦距 10cm 透鏡 60cm 腔長下連續波鎖模波形圖-200ns	48
圖 3-35	焦距 10cm 透鏡 120cm 腔長下連續波鎖模波形圖-2ns	48
圖 3-36	焦距 10cm 透鏡 120cm 腔長下連續波鎖模波形圖-2 μ s	48
圖 3-37	120cm 腔長不同焦距透鏡下輸出功率與輸入功率關係圖	49
圖 3-38	焦距 2.5cm 透鏡 120cm 腔長下 QSML 波形圖-20 μ s	50
圖 3-39	焦距 2.5cm 透鏡 120cm 腔長下 QSML 波形圖-200ns	50
圖 3-40	焦距 10cm 透鏡 120cm 腔長下連續波鎖模波形圖-10ns	50
圖 3-41	焦距 10cm 透鏡 120cm 腔長下連續波鎖模波形圖-2ms	50
圖 3-42	60cm 腔長不同焦距透鏡下輸出功率與輸入功率關係圖	51
圖 3-43	焦距 7.5cm 透鏡 60cm 腔長下 QSML 波形圖-2 μ s	52
圖 3-44	焦距 7.5cm 透鏡 60cm 腔長下 QSML 波形圖-200ns	52
圖 3-45	焦距 7.5cm 透鏡 60cm 腔長下連續波鎖模波形圖-200ns	52
圖 3-46	焦距 7.5cm 透鏡 60cm 腔長下連續波鎖模波形圖-2ns	52
圖 4-1	焦距 2.5cm 透鏡不同腔長下輸出功率與輸入功率關係圖	53
圖 4-2	焦距 2.5cm 透鏡 60cm 腔長下 QSML 波形圖-100ns	54
圖 4-3	焦距 2.5cm 透鏡 60cm 腔長下 QSML 波形圖-500ns	54
圖 4-4	焦距 2.5cm 透鏡 60cm 腔長下連續波鎖模波形圖-2ns	54
圖 4-5	焦距 2.5cm 透鏡 60cm 腔長下連續波鎖模波形圖-2 μ s	54



圖 4-6 焦距 7.5cm 透鏡不同腔長下輸出功率與輸入功率關係圖---55

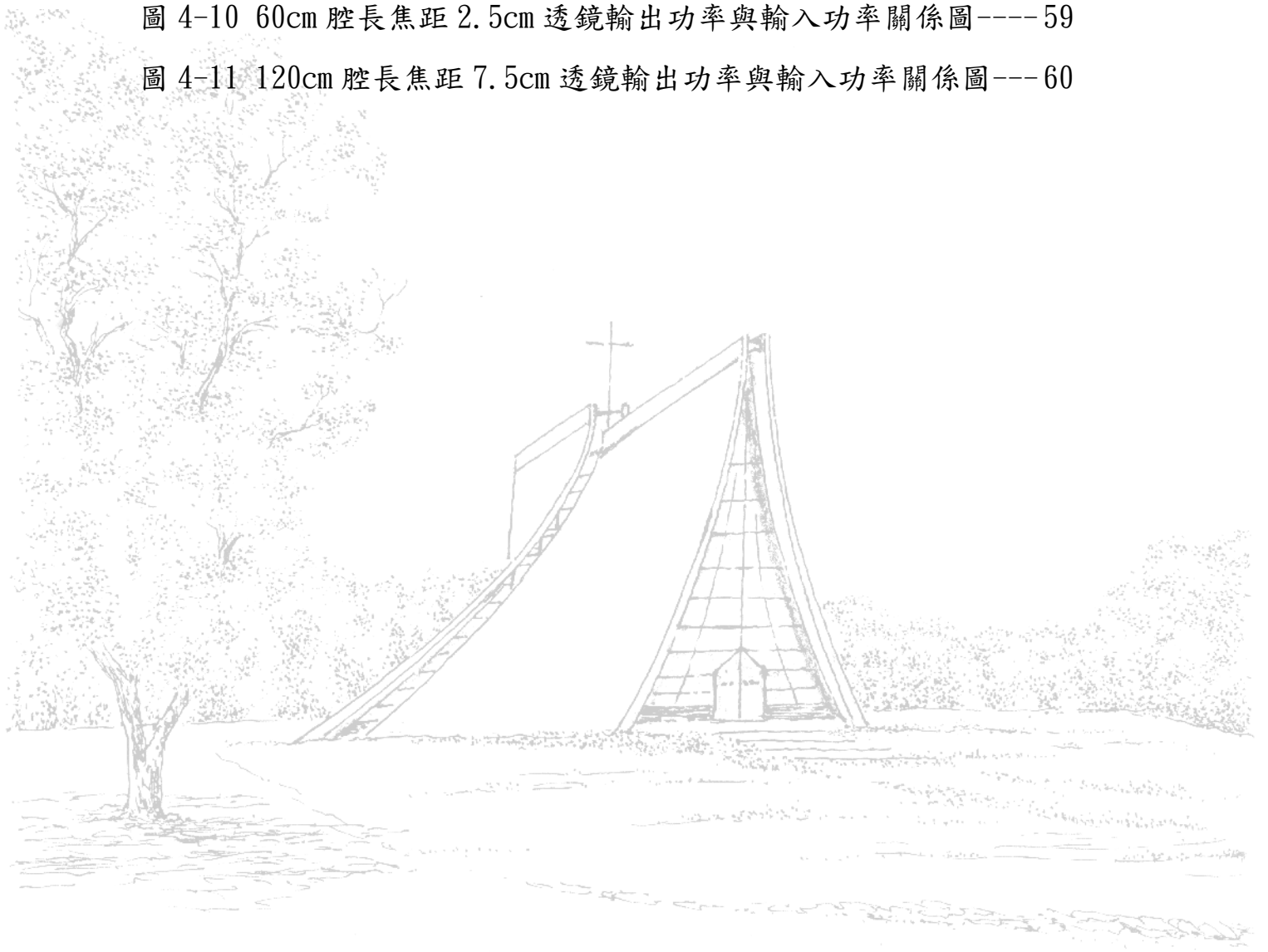
圖 4-7 焦距 10cm 透鏡不同腔長下輸出功率與輸入功率關係圖----56

圖 4-8 120cm 腔長不同焦距透鏡下輸出功率與輸入功率關係圖--- 57

圖 4-9 60cm 腔長不同焦距透鏡下輸出功率與輸入功率關係圖---- 58

圖 4-10 60cm 腔長焦距 2.5cm 透鏡輸出功率與輸入功率關係圖---- 59

圖 4-11 120cm 腔長焦距 7.5cm 透鏡輸出功率與輸入功率關係圖--- 60



具半導體飽和吸收輸出耦合鏡之 被動鎖模摻釹釷酸釷雷射中共振腔組態相關效應之 研究

研究生:侯仁翔

指導教授:吳小華 教授

東海大學物理學系

摘要

本論文採用半導體飽和吸收輸出耦合鏡與摻釹釷酸釷雷射架構被動鎖模雷射。共振腔採用四鏡式直腔包含兩個透鏡和兩個面鏡。四鏡式直腔的設計相當適合用來控制在晶體與半導體飽和吸收輸出耦合鏡上的光點大小，從而在不同腔長以極低的輸入功率下獲得連續波鎖模雷射。因此，我們在 60cm 與 120cm 腔長獲得脈衝寬度約 8 ps 的連續波鎖模，並在一極低的幫浦功率 73.6mW 時獲得連續波鎖模雷射。另外，在輸入功率為 922mW 時，獲得的最高平均輸出功率為 218mW 以及峰值功率 200 W 左右。

Resonator configuration dependent effects in a passively mode-locked Nd:GdVO₄ laser with a semiconductor saturable absorber output coupler

Student: Jen-Hsiang Hou

Advisor: Dr.Hsiao-Hua Wu

Department of Physics, Tunghai University

Abstract

In this thesis, we have constructed a passively mode-locked Nd:GdVO₄ laser by using a semiconductor saturable absorber output coupler (SESAOC) with a linear cavity consists of two lenses and two mirrors . The four element cavity is a very convenient resonator design for controlling the mode size in the laser crystal and on the SESAOC such that continuous wave (CW) mode locking can be achieved at different cavity length as well as at low pump power. Accordingly, CW mode locking with pulse width of about 8 ps was carried out at cavity length 60 and 120 cm and at pump power as low as 73.6mW. The highest average output power of 218mW and corresponding peak power of 200 W was also obtained with pump power of 922mW.

第一章 序論



雷射發展至今，已廣泛地應用於各種方面，工業、精確的微構造製程與醫療外科手術上，為了使其應用更廣泛，成本降低以及精簡雷射體積，增加攜帶方便之可行性，我們期望在低的幫浦功率及架構簡單的條件下，使用半導體雷射就能獲得高輸出功率。

而其中較為常用的是脈衝雷射，脈衝雷射能夠獲得比連續波輸出時更高的峰值功率，科學家們一直在研究產生更短脈衝的雷射，為了產生超短脈衝雷射，我們常使用所謂鎖模(mode locking)的方法。脈衝雷射主要可分為兩種，一是累積共振腔內的能量，使之暫時性地只有小部分能量損失，然後集中釋出，使成能量較高之脈衝，即所謂的 Q 開關(Q-switch)雷射。另一則為控制共振腔內各種不同的共振模態，使共振模的振幅、模距與相位不隨時間變化，且擁有相同之相位關係，即所謂的鎖模(Mode-locked)雷射。產生鎖模的方法主要可分為兩類：主動鎖模(active mode-locking)與被動鎖模(passive mode-locking)。

主動鎖模最普遍的方法是在共振腔中加入一聲光調制器(acousto-optic modulator)來調制振幅。調制週期設定成在共振腔中走一週程的時間(round trip time)。它的作用就像是一個週期性的開關，形成週期性的損耗，而雷射光只能在損耗最小的瞬間存活下來，因此形成環繞雷射共振腔的光脈衝，而雷射的輸出即具有週期性的光脈衝。

另外一種方法則是相位調制(phase modulation-FM)，使用電光調制器(electro-optic modulator)來調制相位。第三種方法是增益調變(synchronous pumping)，使用已鎖模之雷射當輸入源來調制雷射產生週期

性脈衝。一般主動鎖模雷射的脈衝輸出脈衝寬度較寬，而被動鎖模雷射輸出脈衝較窄。

被動鎖模雷射是利用飽和吸收體(saturable absorber)作為脈衝形成元件。使用飽和吸收體是由於其具有非線性的吸收特性，它對光的吸收量隨著光強度變強而呈現非線性地變弱，如此即可使雷射腔內最後僅存脈衝形態的分佈。飽和吸收體可分為慢速飽和吸收體和快速飽和吸收體。慢速飽和吸收體的激發態鬆弛時間(relaxation time)遠長於脈衝寬度。利用慢速飽和吸收體作鎖模，增益值必須在吸收體飽和後隨之飽和，這樣才能造成飽和吸收消滅脈衝前緣而飽和增益消滅脈衝後緣的脈衝壓縮效果。快速飽和吸收體的激發態鬆弛時間遠短於脈衝寬度，於是脈衝兩翼遭快速飽和吸收體消滅而導致脈衝變窄。

飽和吸收體可以是有機染料或是半導體及其他材料。以有機染料為飽和吸收體最成功的例子是脈衝碰撞鎖模(CPM, collide-pulse mode locking)。另外，也可以使用能產生相同效果的非線性光學元件來替代飽和吸收體，即所謂等效飽和吸收體，例如 Kerr 透鏡式鎖模(KLM, Kerr lens mode locking) 和加成式脈衝鎖模(APM, additive pulse mode locking)。**KLM:**利用非線性自聚焦效應(強光更強，弱光更弱)，當光欄(aperture)擺在共振腔適當位置，可以將光徑(spot size)較大的連續波模(CW mode)過濾掉，而光徑較小的 KLM 模被放大存活。這個通過真實光欄以損耗機制達成振幅調變稱為實光欄效應(Hard aperturing)，屬於較老的設計。此外在增益介質中，若激發光束與腔內光束重合得好的話，接近激發光束中心光徑較小的 KLM 模可以得到比光徑較大的 CW 模要高的增益，即中心光束較不適合產生 CW 模，透過增益選擇而達成振幅調制以產生脈衝，這效應稱為軟



光欄效應(soft sperturing)。APM 則是利用兩光脈衝干涉疊加造成。由於外共振腔(external cavity)中的自相位調變(self-phase modulation)使得在外共振腔的脈衝獲得了非線性相位延遲，若調整外共振腔長，使從外共振腔回到耦合器(coupler)的脈衝與主共振腔的脈衝重疊，造成脈衝中央部份為建設性干涉而兩翼部分為破壞性干涉，如此產生脈衝壓縮效應。因此 KLM 與 APM 兩機制都產生與快速飽和吸收體相同的效果而稱之為等效飽和吸收體。

半導體飽和吸收體一般利用半導體製程將反射鏡結構與量子井長於晶片上稱為半導體飽和吸收反射鏡(SESAM, semiconductor saturable absorber mirror)，其鎖模機制是利用量子井的非線性光學吸收，即對強光吸收少、反射率高，對弱光吸收多、反射率低。一般 SESAM 的基本結構就是把反射鏡與吸收體結合在一起，下層一般為半導體反射鏡，其上生長一層半導體可飽和吸收體薄膜，最上層可能生長一層反射鏡或直接利用半導體與空氣的介面作為反射鏡。此上下兩個反射鏡就形成了一個法布里-珀羅腔(Fabry-Pérot cavity)。改變吸收體的厚度以及兩反射鏡的反射率，可以調節吸收體的調製深度(Modulation depth)和反射鏡的帶寬。而由於飽和吸收體之工作波長、吸收截面積、載子生命期可彈性設計，且提供與共振腔結構無關的脈衝起動力量，使此類型元件起動的超短脈衝雷射達到更穩定的要求。

最早將飽和吸收鏡(SESAM)使用於共振腔內做出被動鎖模的為 U. Keller[1]等人在 1992 年發表，在腔內引入了反共振的法布里-珀羅飽和吸收體(Antiresonant Fabry-Perot Saturable Absorber, AFPSA)，即 SESAM；以鈦藍寶石(Ti:Sapphire)雷射激發摻釹氟鈮鋰(Nd:YLF)雷射晶



體，實現了 Nd:YLF 自發性被動鎖模，獲得了脈衝寬度 3.3ps。1996 年，R. Fluck 等人[2]在 Nd:YLF 和 Nd:YVO₄ 使用 SESAM 的被動鎖模雷射中，分別獲得 4.6ps 和 5.7ps，波長 1.3 μ m 的超短脈衝雷射。1997 年瑞士 B. Braun[3]等人在 Nd:YVO₄ 薄片雷射用 SESAM 實現了被動 Q 開關，脈衝寬度最短達到 56ps，重覆率為 27kHz。2003 年 Bingyuan Zhang[4]等人使用 Nd:GdVO₄ 和自己長晶的 SESAM(In_{0.25}Ga_{0.75}As)採用 4 鏡式直腔，在 4W 的輸入功率作出連續波鎖模，獲得 600mW 的輸出功率，脈衝寬度 8ps。2004 年 Sanjun Zhang[5]等人採用折疊腔和使用 Nd:GdVO₄ 和 SESAM 有很高的輸出效率(33.4%)，但連續波鎖模閾值高達 13W。在 2005 年 Bingyuan Zhang[6]等人同樣使用 Nd:GdVO₄ 和自己長晶的 SESAM 之 4 鏡式直腔，在 3.4W 時獲得穩定的連續波鎖模，重複率 146-MHz，脈衝寬度 16ps，在 6W 的輸入功率則獲得 120mW 之最大輸出功率。G. J. Spuhler 等人和 U. Keller[9]於 2001 年作了半導體飽和吸收輸出耦合反射鏡(SESAM)和半導體飽和吸收輸出耦合鏡(SOC)比較，選用 SOC 可簡化實驗架構。

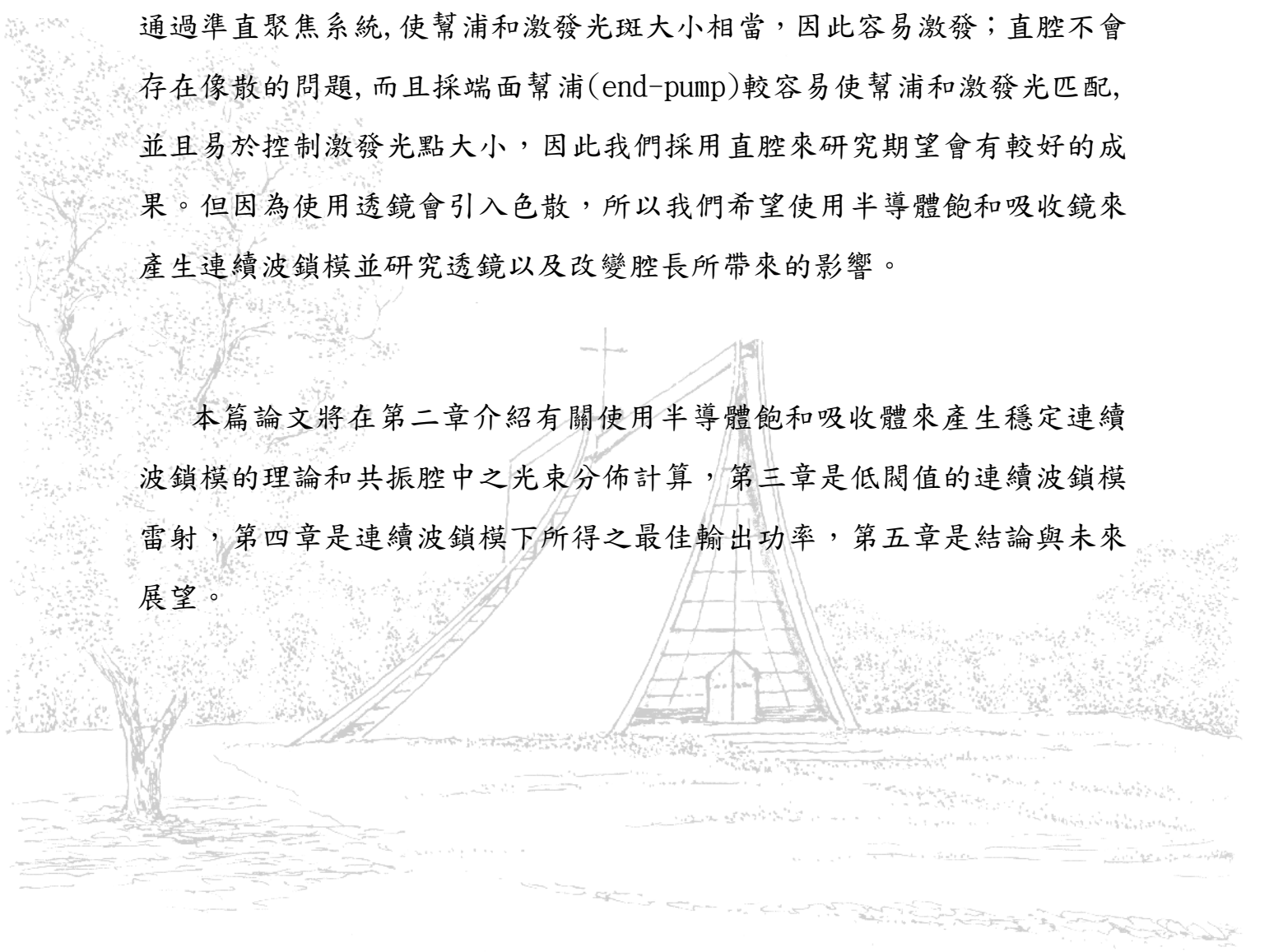
在我們使用的雷射晶體方面，之前已有許多使用如 Nd:YAG，Nd:YVO₄ 以及 Nd:YLF 和 SESAM 完成鎖模的實驗。Nd:GdVO₄ 晶體最早是由 Zagumennyi *et al.* 在 1992 年被拿來當雷射晶體[7]。我們的實驗即是使用摻釹釩酸釷(Nd:GdVO₄)晶體，因為它具有優異的物理性質：由於其高熱傳導率，使得 Nd:GdVO₄ 相當適合應用於高功率雷射；較大的吸收係數，使之適合用於二極體幫浦雷射工作波長。Nd:GdVO₄ 的較短上層能階生命週期，可抑制 Q 開關鎖模(QSML)使之更容易獲得穩定的連續波鎖模(CWML)。

我們分析了一些文章，通常用 SESAM 來做被動鎖模的腔有三種 (1)多重傳遞腔(多鏡折疊腔)(multiple-pass cavity)[13][8]，(2)三鏡折疊



腔，(3) 直腔，這些結構各有優缺點，多重折疊腔 (MPC) 以現時情況下來看幫浦的光和激發的光很難有效耦合，但其好處在於可任意增加反射鏡使光在鏡中反射等同於增加腔長，而不用煩惱架設非常長的直腔；三鏡式折疊腔始終存在像散的問題，導致雷射的模和光斑不理想，但其優點在於容易通過準直聚焦系統，使幫浦和激發光斑大小相當，因此容易激發；直腔不會存在像散的問題，而且採端面幫浦 (end-pump) 較容易使幫浦和激發光匹配，並且易於控制激發光點大小，因此我們採用直腔來研究期望會有較好的成果。但因為使用透鏡會引入色散，所以我們希望使用半導體飽和吸收鏡來產生連續波鎖模並研究透鏡以及改變腔長所帶來的影響。

本篇論文將在第二章介紹有關使用半導體飽和吸收體來產生穩定連續波鎖模的理論和共振腔中之光束分佈計算，第三章是低閾值的連續波鎖模雷射，第四章是連續波鎖模下所得之最佳輸出功率，第五章是結論與未來展望。



第二章 理論



鎖模可分主動鎖模和被動鎖模，被動鎖模又可分為 Q 開關鎖模 (Q-switching mode locking, QML) 與連續波鎖模 (continuous wave mode-locking, CWML)，下面我們要介紹的是使用半導體飽和吸收鏡之被動鎖模如何獲得兩種鎖模的基本理論。

2-1 穩定連續波鎖模之條件 (The conditions of stable continuous-wave mode locking)

在這個章節，我們要介紹由 Kärtner 等人發展 [10][11][12]，可用在皮秒級鎖模雷射的公式和所用之符號，連續波鎖模雷射由圖 2-1 可知，是雷射產生一連串有著高相同振幅的穩定鎖模脈衝，而 Q 開關鎖模由於脈衝能量受到 Q 開關的高峰值脈衝所調製，所以起伏較大，相較之下較不穩定，但是可以產生較高峰值功率的脈衝。

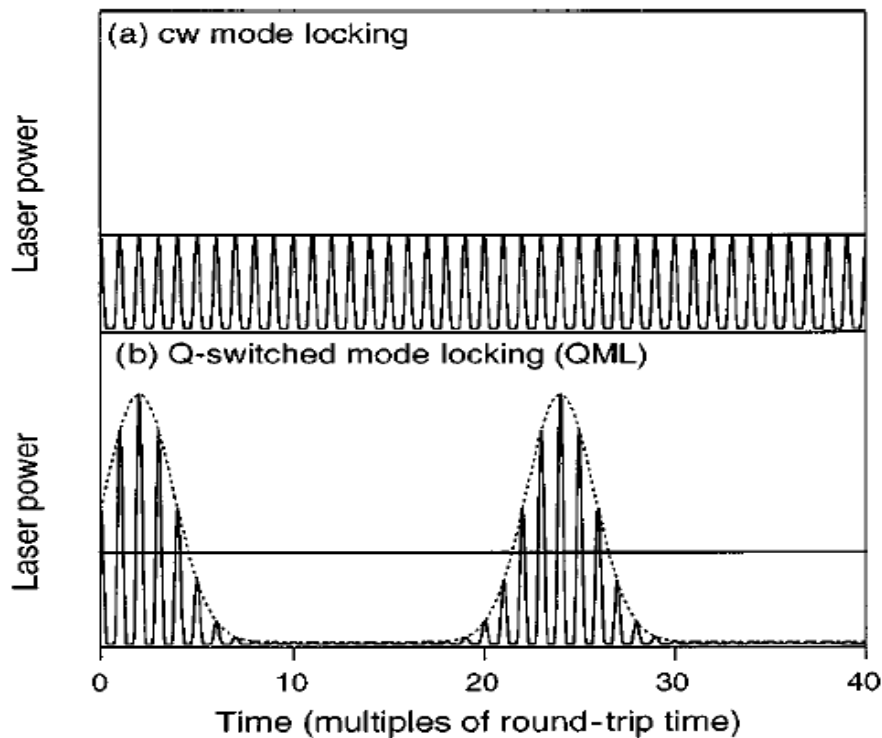


圖 2-1

要獲得穩定連續波鎖模的條件，我們可由共振腔內功率、增益及飽合吸收的速率方程式出發來推導[12]：

$$\frac{dP}{dt} = \frac{g - l - q_p(E_p)}{T_R} P \quad (2-1)$$

$$\frac{dg}{dt} = -\frac{g - g_0}{\tau_L} - \frac{P}{E_{sat,L}} g \quad (2-2)$$

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{q - q_0}{\tau_A} - \frac{P}{E_{sat,A}} q \quad (2-3)$$

P : 腔內平均功率

T_R : 腔內往返時間

$E_p = P \times T_R$: 腔內鎖模脈衝能量

l : 腔內往返之線性損失

$Q_p(E_p)$: 脈衝每次往返之能量損失

$E_{sat,L}$: 增益介質之飽和能量

$E_{sat,A}$: 飽和吸收體之飽和能量

g : 與時間相關之腔內往返增益

q : 與時間相關之腔內往返飽和吸收

g_0 : $P = 0$ 時之 g

q_0 : $P = 0$ 時之 q

τ_L : 雷射增益介質之上層能階生命期

τ_A : 飽和吸收體之回復時間

其中 $q_p(E_p)$: 脈衝每次往返之能量損失 可寫成與時間無關的式子如下:

$$q_p(E_p) = q_0 \frac{F_{sat,A} A_{eff,A}}{E_p} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_p}{F_{sat,A} A_{eff,A}}\right) \right] \quad (2-4)$$

$E_{sat,A} = F_{sat,A} \times A_{eff,A}$: 飽和吸收體之飽和能量

$F_{sat,A}$: 飽和吸收強度

$A_{eff,A}$: 飽和吸收體上之有效模面積

由上面的推導，可以將(2-1)、(2-2)改用下列二式描述鎖模雷射:

$$T_R \frac{dE_p}{dt} = [g - l - q_p(E_p)] E_p \quad (2-5)$$

$$\frac{dg}{dt} = -\frac{g - g_0}{\tau_L} - \frac{E_p}{E_{sat,L} T_R} g \quad (2-6)$$

然後可由[14]得下式

$$E_p \left| \frac{dq_p}{dE_p} \right|_{\frac{E_p}{E_{sat,L}}} < \frac{T_R}{\tau_L} r = \frac{T_R}{\tau_L} + \frac{E_p}{E_{sat,L}} \quad (2-7)$$

$$r = 1 + P/P_{sat,L}$$

(2.7)式表示當脈衝能量增加到開始飽和增益，夠強的飽和增益可抑制 Q 開關鎖模的產生。

在半導體飽和吸收鏡的吸收與反射方面，呈現了非線性的關係，亦即腔內功率愈高，半導體飽和吸收鏡的吸收愈小(反射愈大)，這個非線性的反射率 $R(E_p)$ 可以用下式表示:

$$R(E_p) = R_{ns} \frac{\ln\{1 + \exp(-\Delta R)[\exp(\frac{E_p}{E_{sat,A}}) - 1]\}}{E_p / E_{sat,A}} \quad (2-8)$$

R_{ns} : 反射率之最大值 $\Delta R_{ns} = 1 - R_{ns}$ (未飽和損失)

ΔR : 非線性反射率之最大變動範圍 (SESAM 之最大調製深度)

一般吸收體的反射率之最大改變範圍 (ΔR) 約小於 10%，故我們可將 (2-8) 式進一步簡化為：

$$R(E_p) = R_{ns} \left\{ 1 - \Delta R \frac{F_{sat,A} A_{eff,A}}{E_p} \times \left[1 - \exp\left(-\frac{E_p}{F_{sat,A} A_{eff,A}}\right) \right] \right\} \quad (2-9)$$

而令 $R_{ns} \approx 1$ 且 $\Delta R = 1 - \exp(-q_0)$ For $\Delta R \ll 1$ 故 (2.9) 式可簡化為：

$$R(E_p) \approx \exp[-q_p(E_p)] \approx 1 - q_p(E_p) \quad (2-10)$$

由上式可將 (2-7) 式轉換成下式

$$E_p \left. \frac{dR(E_p)}{dE_p} \right|_{E_p} < \frac{T_R}{\tau_L} r = \frac{T_R}{\tau_L} + \frac{E_p}{E_{sat,L}} \quad (2-11)$$

當產生連續波鎖模時，照在飽和吸收鏡上之能量密度約高於飽和吸收鏡之飽和強度五倍左右，(2-9) 式可簡化為：

$$R(E_p) \approx 1 - \Delta R \frac{F_{sat,A} A_{eff,A}}{E_p} \quad \text{或} \quad R(F_{p,A}) \approx 1 - \Delta R \frac{F_{sat,A}}{F_{p,A}} \quad (2-12)$$

$$F_{p,A} = E_p / A_{eff,A}$$

是入射到飽和吸收鏡上之能量密度

然後我們可得下面三個式子

$$E_p^2 > E_{sat,L} E_{sat,A} \Delta R \quad (2-13)$$

$$F_{p,A}^2 > F_{sat,L} F_{sat,A} \Delta R \frac{A_{eff,L}}{A_{eff,A}} \quad (2-14)$$

$$P^2 > F_{sat,L} F_{sat,A} \Delta R A_{eff,L} A_{eff,A} \frac{1}{T_R^2} \quad (2-15)$$

由(2-13)式我們可以得到產生連續波鎖模之腔內臨界功率條件：

$$\begin{aligned} E_{P,c} &\equiv (E_{sat,L} E_{sat,A} \Delta R)^{1/2} \\ &= (F_{sat,L} A_{eff,L} F_{sat,A} A_{eff,A} \Delta R)^{1/2} \end{aligned} \quad (2-16)$$

當腔內脈衝能量高於此臨界脈衝能量就可獲得連續波鎖模脈衝，而當腔內脈衝能量低於此臨界脈衝能量則可獲得Q開關鎖模脈衝。

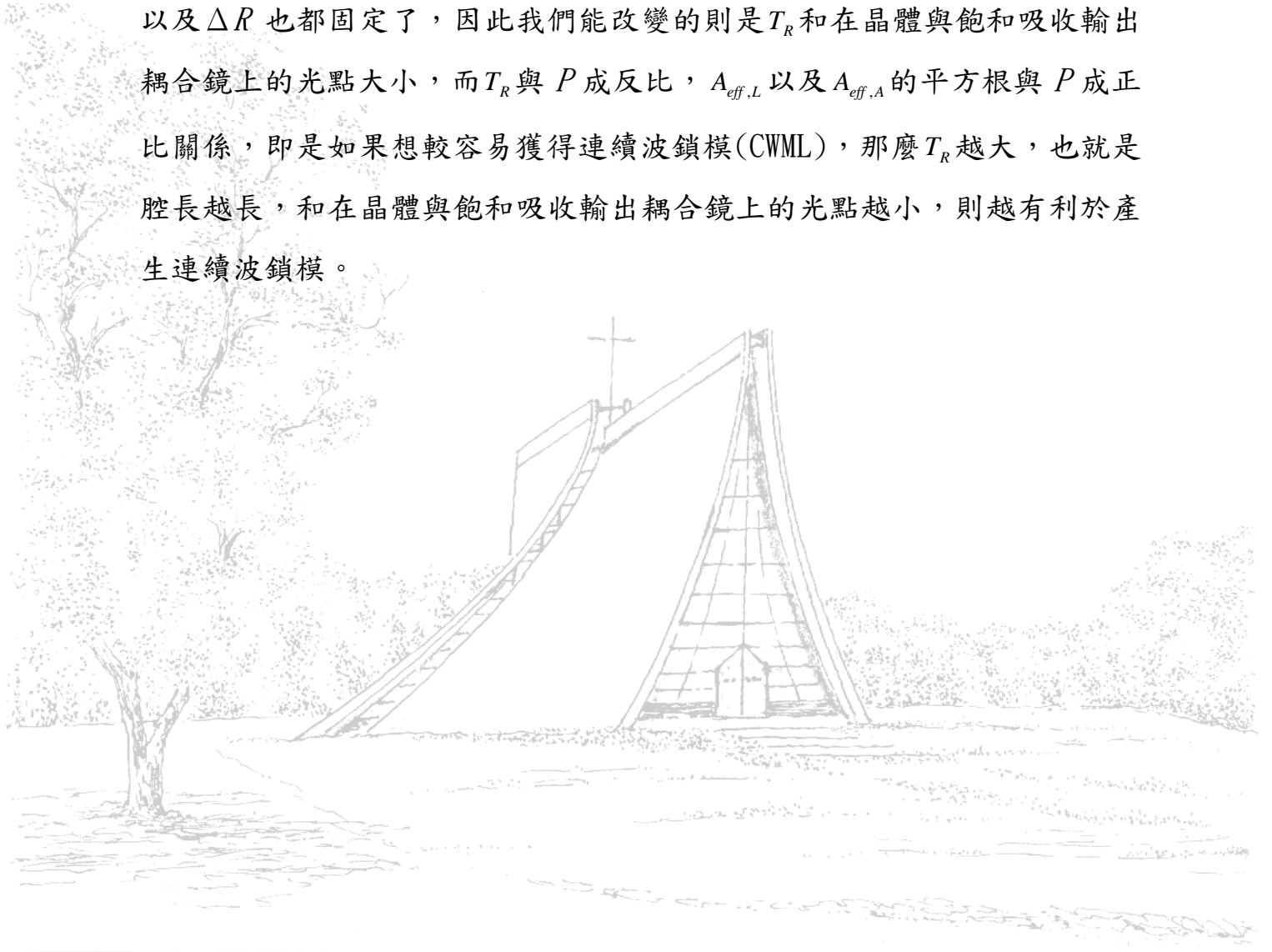
由(2-16)式可知，要想得到連續波鎖模脈衝，雷射晶體與飽和吸收鏡之飽和強度要小，聚在雷射晶體與飽和吸收鏡上的光點也要小，以及飽和吸收鏡之調制深度(ΔR)也要小，由(2-15)式也可知共振腔的往返時間(round-trip time)也必須大，所以較長的共振腔有利於產生連續波鎖模脈衝。

現在，我們將(2-15)式代入數值來計算，由附錄可知波段1064nm下的 $F_{sat,L}=0.12289 (\mu J/cm^2)$ ， $F_{sat,A}=90 (\mu J/cm^2)$ ， $\Delta R=1.2\%$ ，另外，我們假設 $T_R=8ns$ ，在雷射晶體與飽和吸收輸出耦合鏡(SOC)上的光點大小平方(ω^2) 分別是 $2.22045 \times 10^{-5} (cm^2)$ 、 $5.08374 \times 10^{-5} (cm^2)$ ，最後算出要產生連續



波鎖模(CWML)的臨界功率為 4.81(W)，此外也可算出(2-16) 的 $E_{p,c}$ 約為 3.8453×10^{-8} (焦耳)。

一旦我們使用的晶體與飽和吸收輸出耦合鏡確定後，那麼 $F_{\text{sat},L}$, $F_{\text{sat},A}$ 以及 ΔR 也都固定了，因此我們能改變的則是 T_R 和在晶體與飽和吸收輸出耦合鏡上的光點大小，而 T_R 與 P 成反比， $A_{\text{eff},L}$ 以及 $A_{\text{eff},A}$ 的平方根與 P 成正比關係，即是如果想較容易獲得連續波鎖模(CWML)，那麼 T_R 越大，也就是腔長越長，和在晶體與飽和吸收輸出耦合鏡上的光點越小，則越有利於產生連續波鎖模。



2-2 腔內光束分佈的計算：

由於 SESAM 鎖模與入射到 SESAM 上的能量密度有關，且與雷射晶體和 SESAM 上的光點半徑 ω 有關，所以我們首先利用二維陣列以求解。在幾何光學中，矩陣法是描述光束在共振腔中傳播的一個好方法，在不考慮繞射損耗下，我們採用幾何光學光束追跡(Ray tracing)的方法來分析共振腔在只考慮近軸近似(paraxial approximation)的條件($r' = \tan \theta \approx \sin \theta \sim \theta$)下，光束在均勻介質中傳播一段距離 d ，所對應的轉移矩陣可表示成：

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

它的行列式

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

若光束射入一薄凸透鏡(焦距= f)其所對應之轉移矩陣為：

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}$$

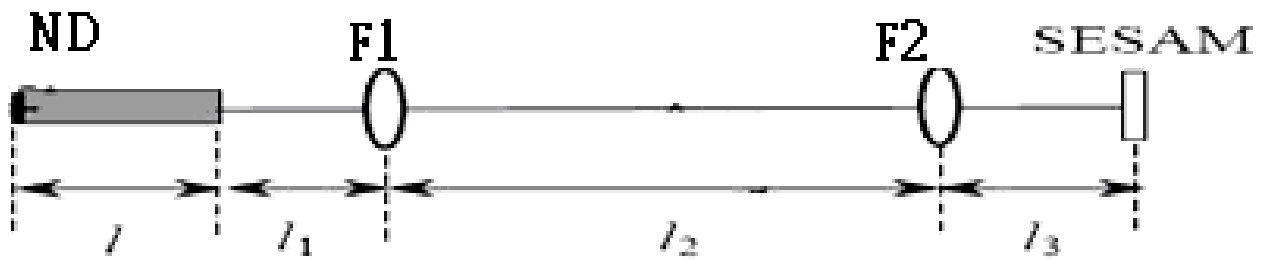
同樣的

$$\det T = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{vmatrix} = 1$$



經過上面分析，我們可以很輕易的得到光束在傳播過許多介質及薄凸透鏡後的參數，只要將各個對應矩陣相乘即可，M 代表相乘後之等效轉移矩陣

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



根據上圖考慮一從 SESAM 出發之往返傳輸之矩陣為

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

利用矩陣乘法，可求出矩陣元 A, B, C, D, 根據穩定條件

$$\left| \frac{A + D}{2} \right| \leq 1$$

可找出共振腔的穩定區，同時可求出 SESAM 上的光點半徑 ω 。

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

同理我們寫出從 Nd:GdVO₄ 出發的往返矩陣。

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

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

同樣利用矩陣乘法，可求出矩陣元 A, B, C, D, 根據穩定條件

$$\left| \frac{A+D}{2} \right| \leq 1$$

可找出共振腔的穩定區，同時可求出 Nd:GdVO₄ 上的光點半徑 ω 。

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

用上面的計算方法我們得到的計算結果如下：

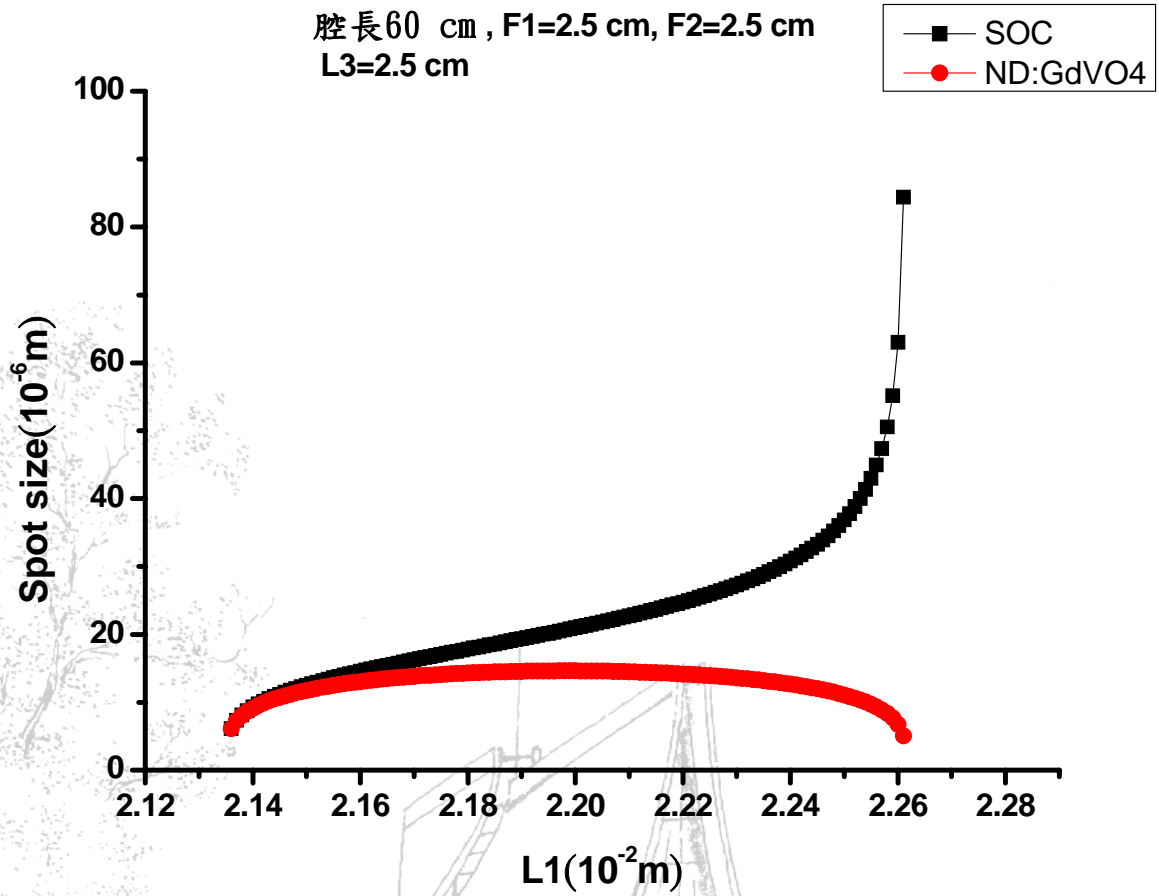


圖 2-2

圖 2-2 是我們改變 F1 透鏡到 ND:GdVO₄ 的距離，計算光點大小在 ND:GdVO₄ 和 SOC 上的變化，紅色圓點是 ND:GdVO₄ 上的光點大小，黑色方塊是 SOC 上的光點大小，腔長 60 cm，F1 和 F2 的曲率半徑 2.5 cm，L3 固定在 2.5 cm，需考慮 Nd:GdVO₄ 的折射率為 2.192，和長度 8 mm。

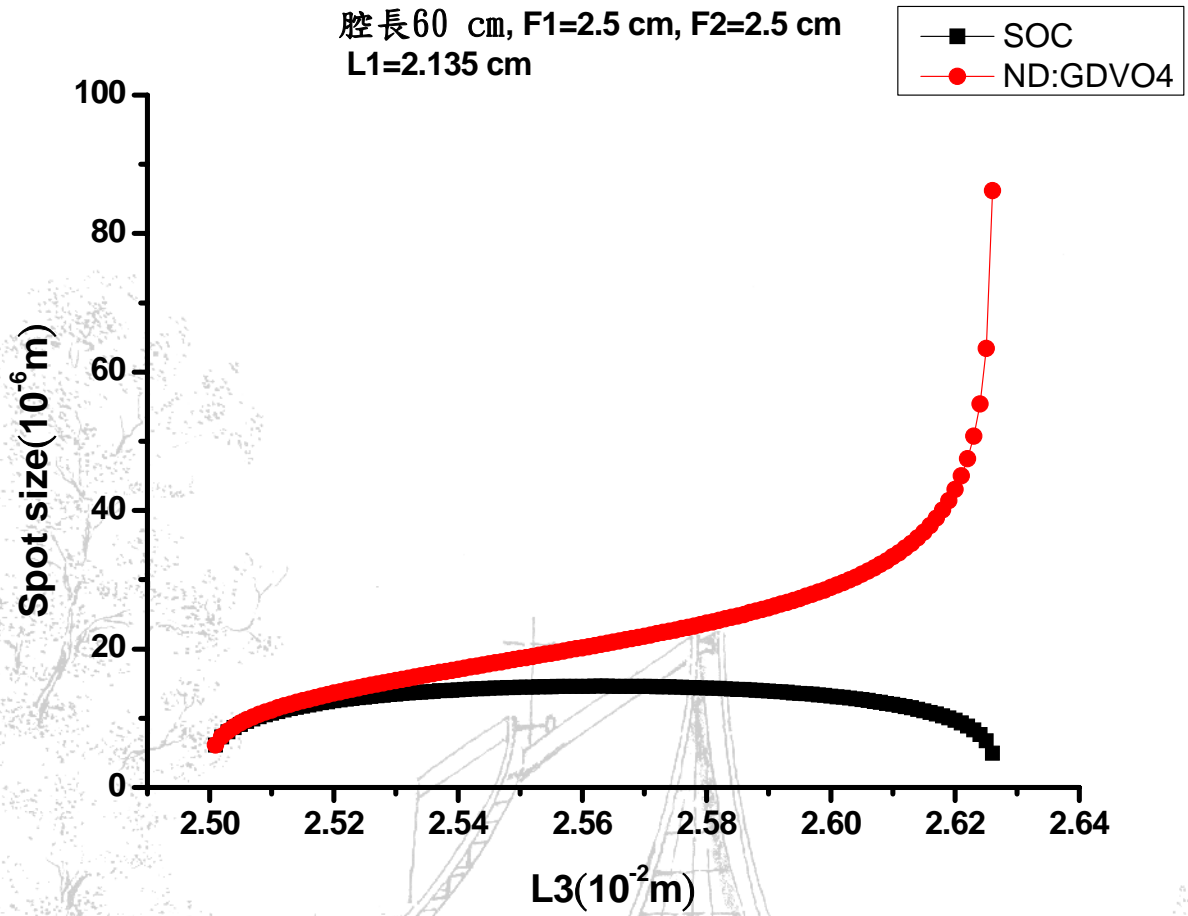


圖 2-3

圖 2-3 是我們改變 F2 透鏡到 SOC 的距離，計算光點大小在 ND:GdVO₄ 和 SOC 上的變化，紅色圓點是 ND:GdVO₄ 上的光點大小，黑色方塊是 SOC 上的光點大小，腔長 60 cm，F1 和 F2 的曲率半徑 2.5 cm，L1 固定在 2.135cm，因需考慮 Nd:GdVO₄ 的折射率為 2.192，和長度 8mm。

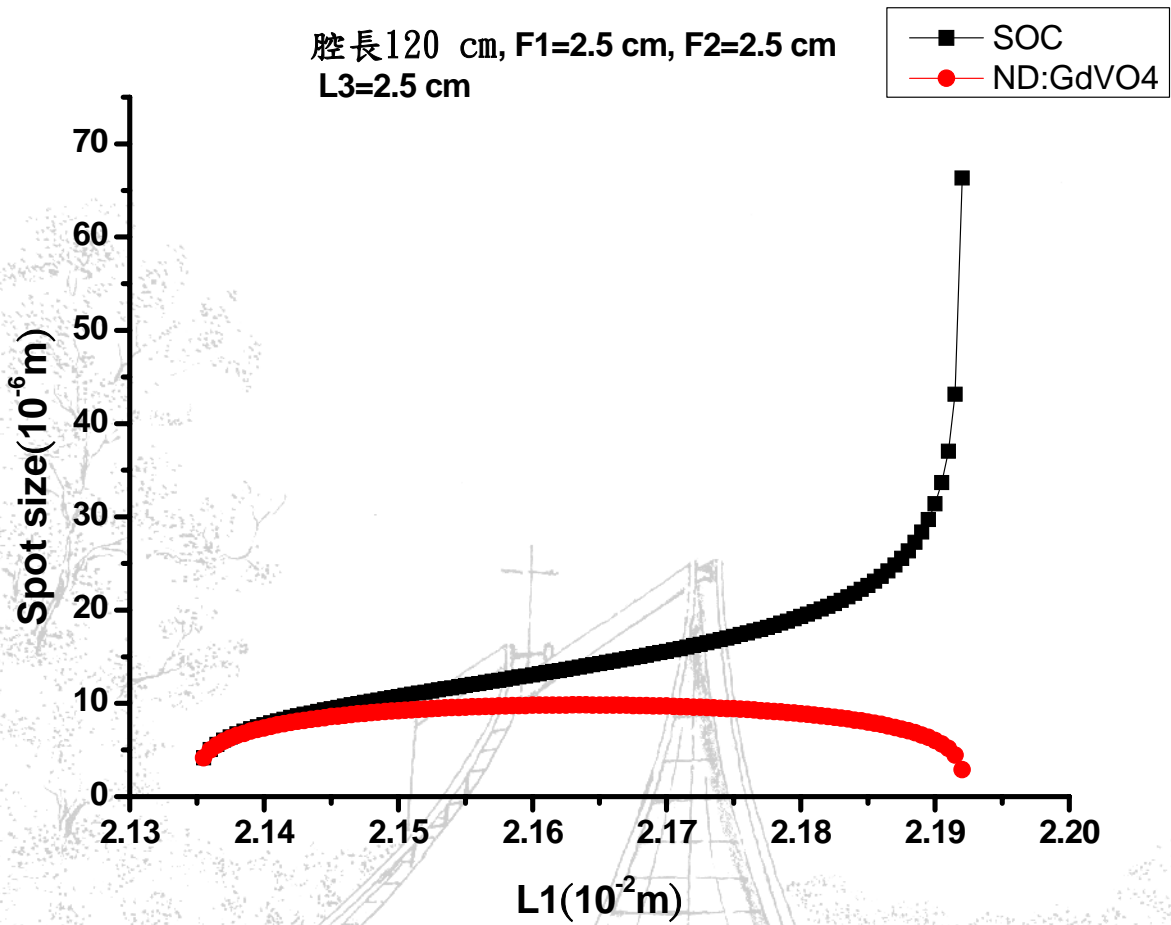


圖 2-4

圖 2-4 是我們改變 F1 透鏡到 ND:GdVO₄ 的距離，計算光點大小在 ND:GdVO₄ 和 SOC 上的變化，紅色圓點是 SOC 上的光點大小，黑色方塊是 ND:GdVO₄ 上的光點大小，腔長 120 cm，F1 和 F2 的曲率半徑 2.5 cm，L3 固定在 2.5cm。

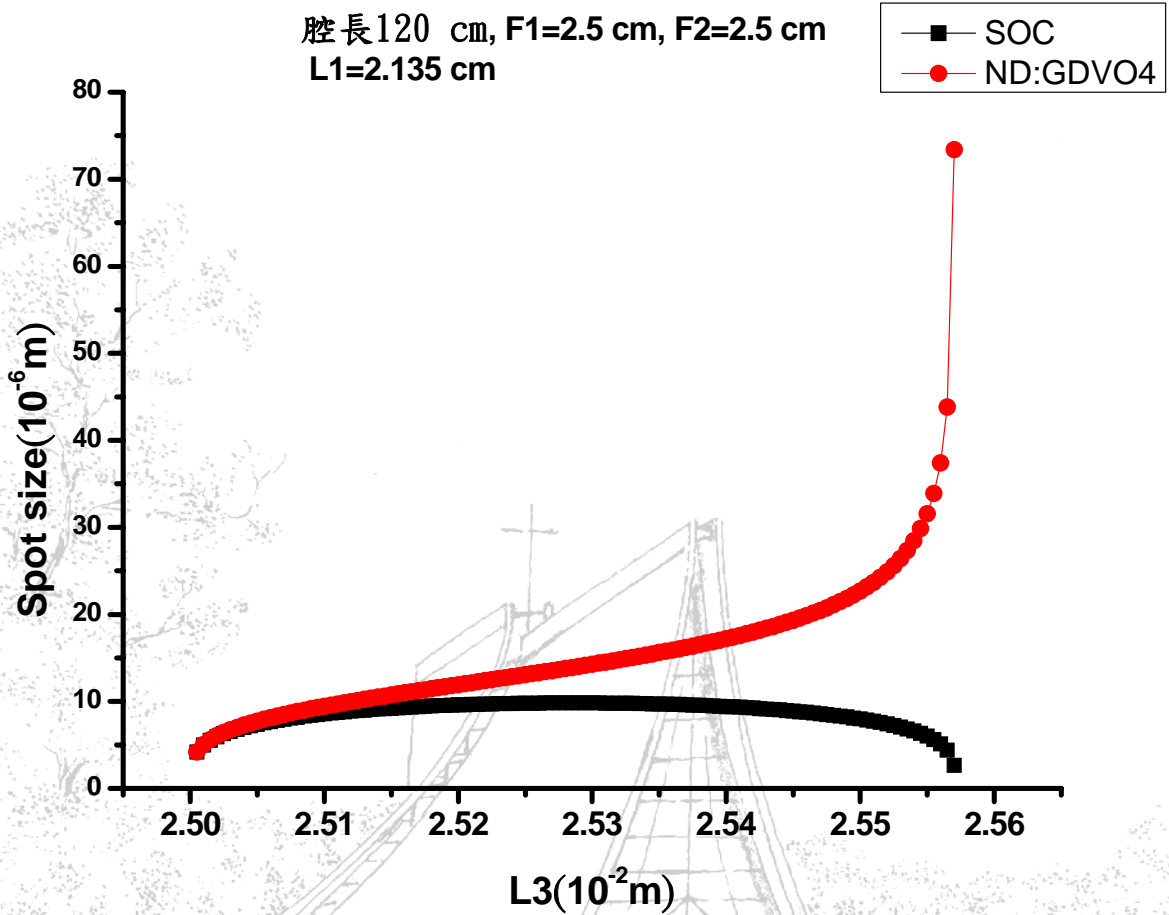


圖 2-5.

圖 2-5 是我們改變 F2 透鏡到 SOC 的距離，計算光點大小在 ND:GdVO₄ 和 SOC 上的變化，紅色是 ND:GdVO₄ 上的光點大小，黑色是 SOC 上的光點大小，腔長 120 cm，F1 和 F2 的曲率半徑 2.5 cm，L1 固定在 2.135cm，因需考慮 Nd:GdVO₄ 的折射率為 2.192。

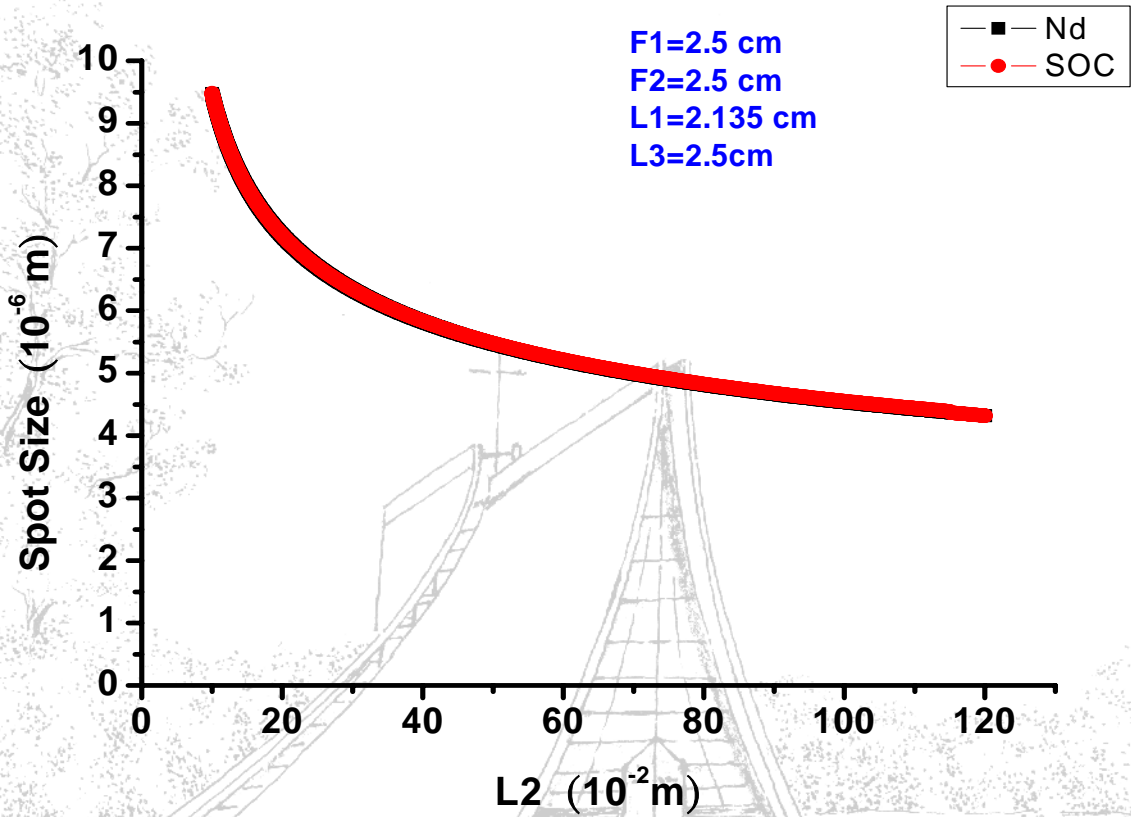


圖 2-6

圖 2-6 是我們改變 $L2$ ($F1$ 透鏡和 $F2$ 透鏡間的距離)，計算光點大小在 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 和 SOC 上的變化，由於用兩個相同的透鏡，所以在 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 和 SOC 兩邊的光點大小是一致的，從圖中可看出腔長越長，光點越小。

另外，我們在做光束計算時發現以 60cm 腔長使用兩焦距同是 7.5cm 的透鏡為例，在固定 L3 情況下去改變 L1 找穩定區時，如果慢慢增大 L3，則 L1 的穩定區也會越來越大，當然一定有其極限，圖表 2-7、2-8、2-9 如下分別是，固定 L3=7.05cm、L3=7.25、L3=7.45 三種情況下去改變 L1 找出其穩定區的光點大小圖。

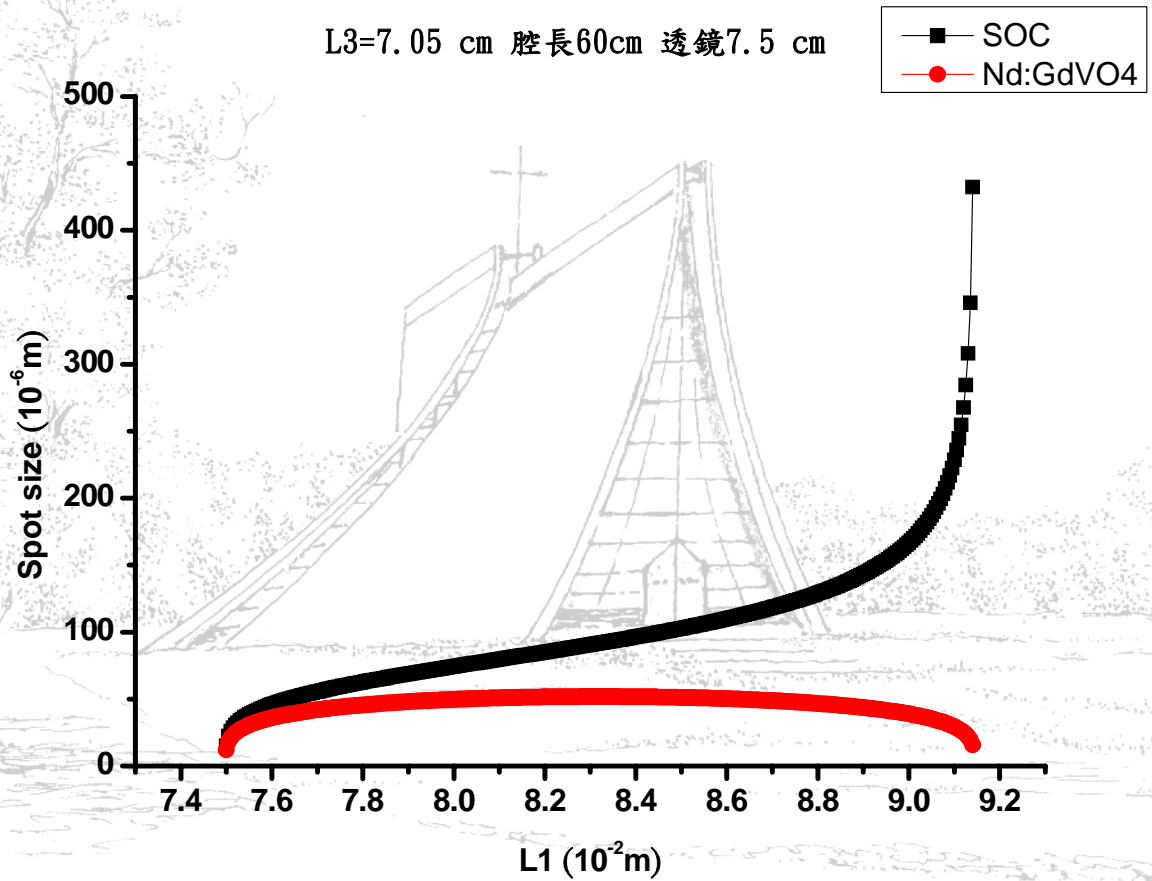


圖 2-7

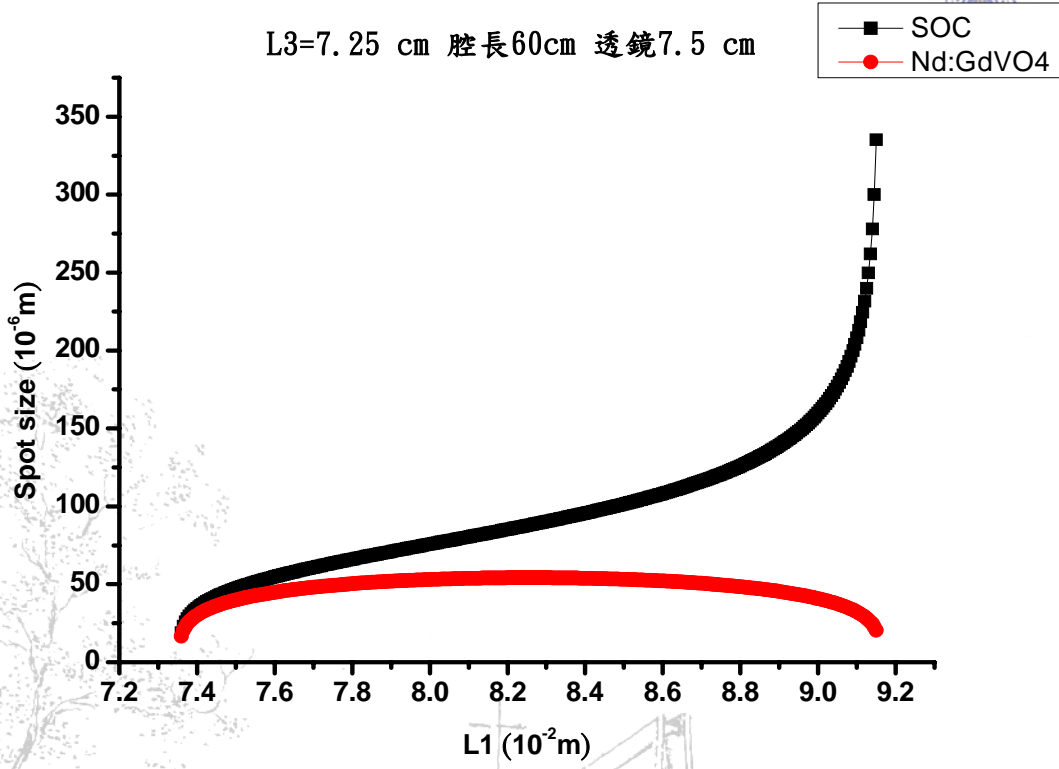


圖 2-8

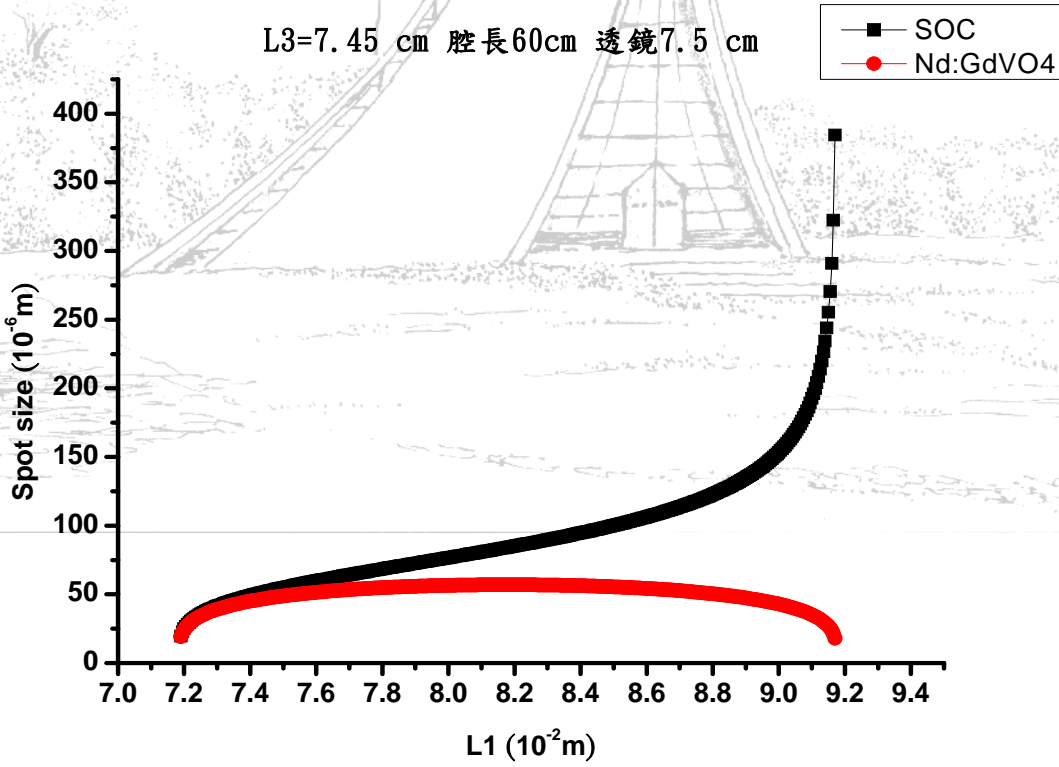


圖 2-9

圖 2-7、2-8、2-9 中 L1 的穩定區範圍大小分別是，1.64cm、1.79cm、1.98cm，越來越大。同理在固定 L1 的情況下去改變 L3 找共振腔的穩定區時，L1 增大則找到 L3 的穩定區範圍也會增大。

接下來將把我們實驗所得的數據代入理論的(2-15)公式來看結果是
如何。

取一在 120cm 腔長使用焦距 10cm 透鏡的連續波鎖模實驗下所獲得的數據，輸入功率 158.2mW 時獲得 CWML 閾值，此時量測到的平均輸出功率為 15.5mW，首先固定 L3 藉由移動 F1 透鏡找尋 lasing 穩定區得到約 1.34cm 的範圍大小，之後換固定 L1 移動 SOC 平移台找尋穩定區約為 3.05cm 的範圍大小，我們實驗的 L1 是 10.38cm，L3 是 10.04cm，有了以上數據我們算出此時在雷射晶體與飽和吸收輸出耦合鏡(SOC)上的光點大小平方(ω^2)(圖 2-10、2-11)分別是 $2.22045 \times 10^{-5}(\text{cm}^2)$ 、 $5.08374 \times 10^{-5}(\text{cm}^2)$ ，120cm 腔長的 $T_R=8\text{ns}$ 。

我們獲得腔內平均功率約為 0.738(W)，經由前面 2-1 節最後的計算要產生連續波鎖模(CWML)臨界功率為 4.81(W)，另外我們有計算出(2-16)的 $E_{P,C}$ 約為 3.8453×10^{-8} (焦耳)， E_P (腔內能量)約為 5.9048×10^{-9} (焦耳)，一樣 E_P 並沒大於 $E_{P,C}$ ，由於光束大小是經由模擬獲得與實際會有點誤差，但我們還是有獲得穩定的連續波鎖模(CWML)。

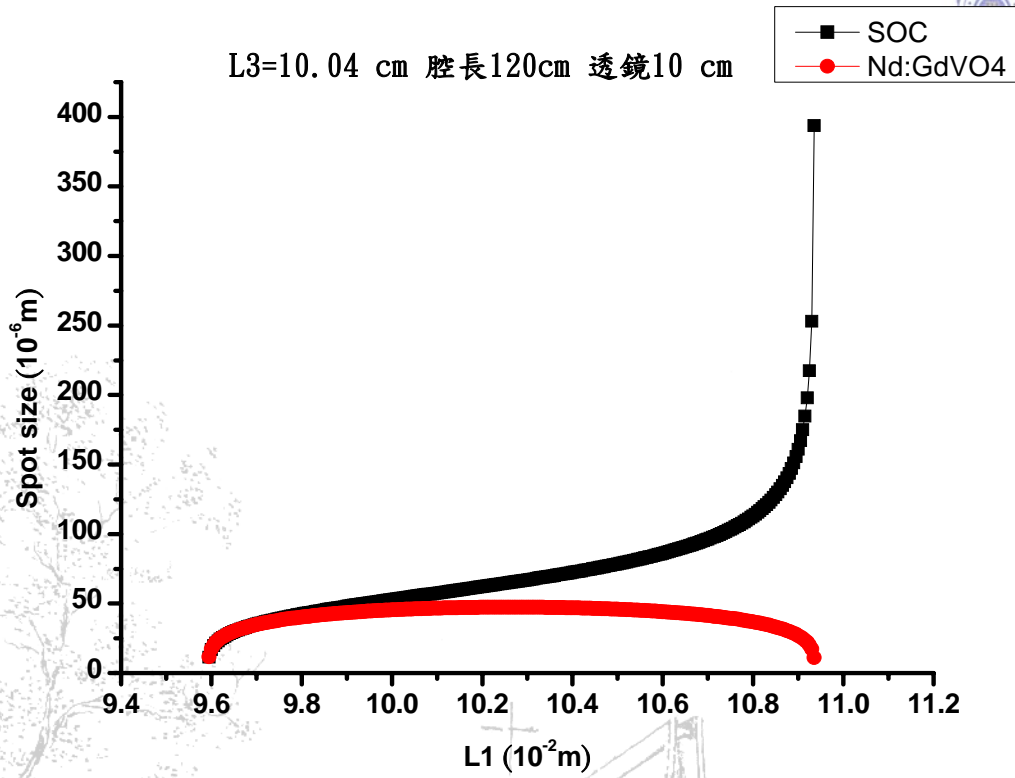


圖 2-10

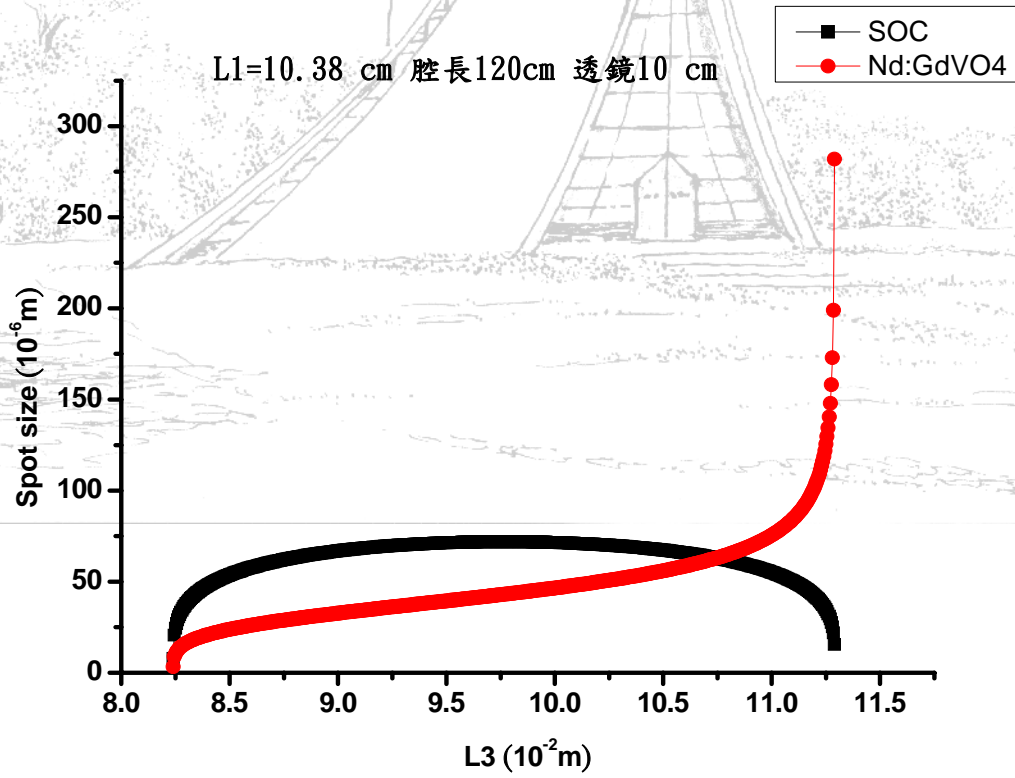


圖 2-11

第三章 低閾值的連續波鎖模雷射

這章是要介紹低閾值的連續波鎖模雷射的實驗架構和實驗方法及實驗結果討論，我們所採用的共振腔是四鏡式直腔，使用兩個同焦距的透鏡和兩個面鏡，詳細的介紹如下。

3-1 實驗架構與方法

實驗裝置圖：

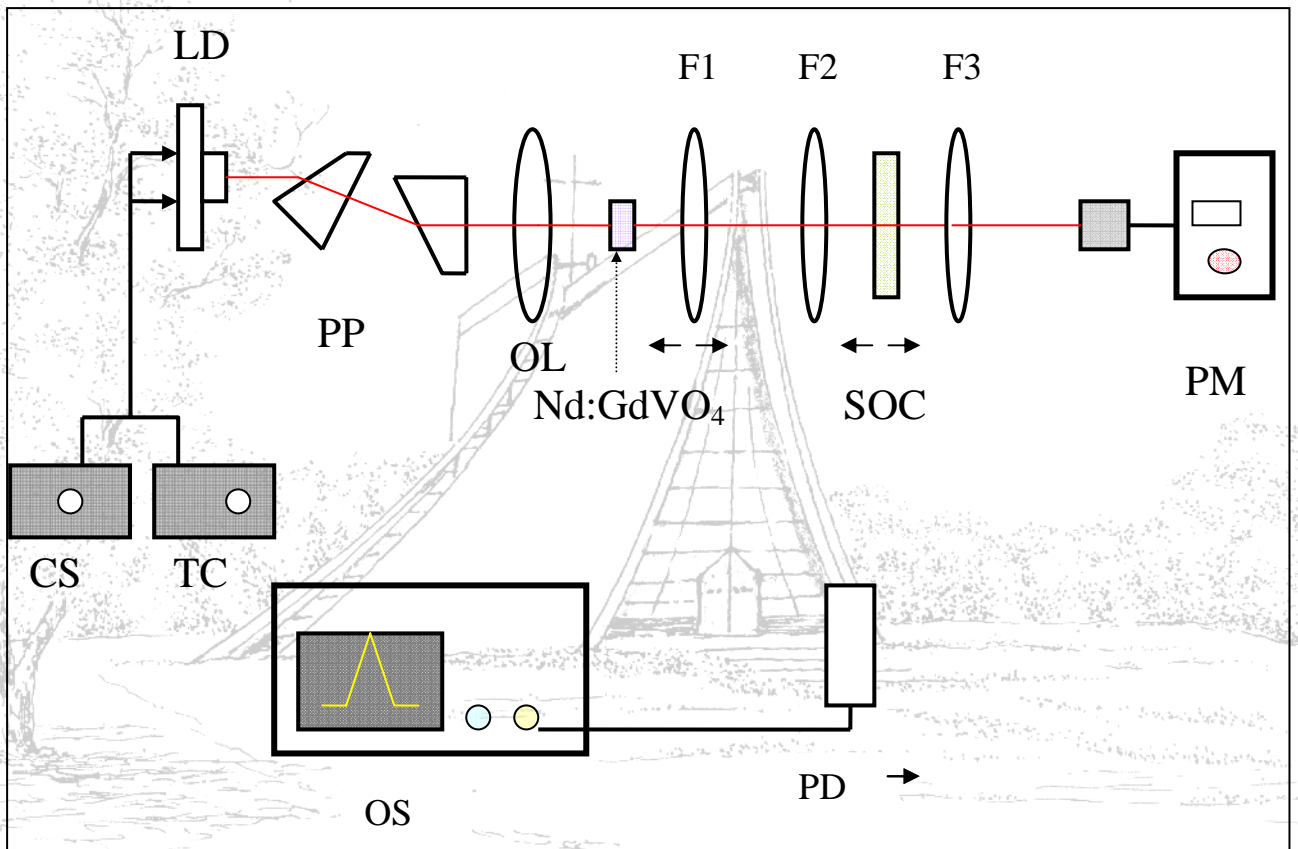


圖 3-1

CS: 電流源

TC: 溫控器

LD: 二極體雷射

PP: 菱鏡

OL: 物鏡

Nd:GdVO₄: 雷射晶體

F1: 透鏡

F2: 透鏡

F3: 透鏡

SOC: 半導體飽和吸收輸出耦合鏡

PM: 功率偵測器

OS: 示波器

PD: 光偵測器



這個實驗我們使用半導體激發摻釹釷酸釷($\text{Nd}:\text{GdVO}_4$)晶體($4\times 4\times 8\text{mm}$)，摻釹量為 0.5%，實驗架設如圖 3-1。我們使用的雷射二極體，最大輸出功率為 1.5W，操作時之峰值波長為 808nm。半導體雷射的電流由一穩定電流源來供應，並且以溫度控制器對雷射二極體作溫度控制在 19.8°C ，使雷射二極體能產生穩定的輸出功率和波長。共振腔為四鏡式直腔。雷射工作介質摻釹釷酸釷幫浦面鍍激發光(808nm)的抗反射鍍膜(AR coating)以及雷射光(1064nm)的高反射鍍膜(HR coating)並作為共振腔的端面鏡用。另一面鍍雷射光(1064nm)的高穿透膜(HT coating)並在製作時切割成和光軸有 2 度的斜角以防止在共振腔內次共振腔的產生。腔內使用的透鏡兩面皆鍍上對 808nm 和 1064nm 的抗反射鍍膜。半導體飽和吸收輸出耦合鏡則是使用 BATOP 所生產之 SOC-1040-2-25.4 g 飽和吸收鏡，工作波長使用在 1064nm，則透射率為 2.1%，飽和吸收為 2%，調制深度 1.2%。我們將雷射晶體的位置固定，晶體前的透鏡則架在平移台上，半導體飽和吸收輸出耦合鏡前的透鏡位置固定，將半導體飽和吸收輸出耦合鏡架在平移台上，我們藉由移動平移台的改變來控制在雷射晶體和半導體飽和吸收輸出耦合鏡(SOC)上的光點大小。

首先我們先使用兩面鏡，即是雷射晶體與飽和吸收輸出耦合鏡(SOC)，先給一點幫浦能量產生功率不高的光點，藉由調整雷射晶體和飽和吸收輸出耦合鏡(SOC)這兩個鏡座，使它們的光點盡可能地在同一個高度。之後添加 F1 透鏡，架設 F1 透鏡於雷射晶體前，使聚焦光點打在 SOC 的正中央，固定透鏡 F1 於平移台上，微調 SOC 鏡座，使反射的自發輻射光能反射回到晶體，並與晶體在同一高度，此時稍微鬆開 SOC 的鏡座桿上之固定，使 SOC 能左右旋轉，一邊用紅外光卡(IR card)在輸出端觀察，當發現紅外光卡上有小亮點出現，則立即固定 SOC 鏡座的旋鈕。此小亮點即自發輻射



光在共振腔內不斷反饋後形成的受激輻射光，即產生雷射(lasing)，此時固定腔內所有元件。

接下來我們必須確定平移台的移動方向與雷射光是否平行，此時調整 SOC 的平移台遠離晶體，微調 SOC 的鏡座使輸出光是一良好的圓形光點。將 SOC 往原來位置移動，檢查過程中輸出光點是否維持良好的圓形光點，若光點於途中變形，於該位置調整晶體鏡座使輸出光點維持良好的圓形光點，再調 SOC 回遠離晶體的位置檢查輸出光點是否維持圓形光點，若否則微調 SOC 鏡座使其恢復為一良好圓形光點。重覆上述步驟，確定移動 SOC 在所有位置均可輸出一良好光點。再來微調 SOC 鏡座與雷射晶體鏡座，使輸出功率達到最大，最後在 SOC 前透鏡的焦距位置，放置透鏡 F2，此時可以將 F1 透鏡往晶體方向推近，使通過透鏡 F2 照射在 SOC 上的光點呈現在光腰附近的極小聚焦光點，這樣可以容易找到連續波鎖模(CWML)，之後調整透鏡 F2 和 SOC 的距離使輸出功率為最大，並保持良好的圓形光點。

由飽和吸收輸出耦合鏡(SOC)一端輸出的紅外雷射光，我們使用一透鏡把此輸出光聚集起來以免發散，在透鏡後方架設光功率偵測器，每次改變輸入電流 100mA，測量雷射的輸出功率或將光入射至光偵測器，可用示波器與頻譜分析儀分析。由於飽和吸收輸出耦合鏡(SOC)只輸出 1064nm 的雷射光，所以我們不需使用 808nm 濾光鏡。

我們先在同一腔長下，選用焦距為 2.5cm、7.5cm、10cm 的透鏡，每次實驗皆採用兩個相同焦距的透鏡，各自放在距雷射晶體和飽和吸收輸出耦合鏡的透鏡焦距附近，一般我們將輸入電流設定至 1000mA(此時打在



雷射晶體的 808nm 波長功率為 621mW)然後調整透鏡 F1 和 SOC 的平移台找出可連續波鎖模的位置，找出後微調系統對輸出功率最佳化，之後改變電流源的輸入電流，每次 100mA 最小到 10mA，紀錄可連續波鎖模、Q 開關鎖模、連續波的功率範圍及輸出功率，接著改變透鏡的焦距從 2.5 公分透鏡換至 7.5 公分再換至 10 公分焦距的透鏡，觀察對鎖模的閾值和輸出功率的影響。

之後我們改變腔長，分別在 60 公分以及 120 公分腔長各使用 2.5 公分、7.5 公分與 10 公分的透鏡來做實驗，另外，我們也有固定腔內其中一面透鏡與晶體(飽和吸收輸出耦合鏡)之距離，去改變另一面透鏡與飽和吸收輸出耦合鏡(晶體)的距離，來作共振腔組態之相關研究。

3-2 實驗結果與討論

我們在做低閾值的連續波鎖模雷射實驗時發現，在同樣腔長下，所使用的透鏡焦距越長，則連續波鎖模的閾值能夠越低；在不同腔長時則發現，120 公分腔長的連續波鎖模閾值比 60 公分腔長的都還要低，可知道腔長越長越可抑制 Q 開關鎖模，而有利於產生連續波鎖模，這點與第二章之理論十分吻合。另外，我們的實驗現象如同一般的被動鎖模雷射一樣，隨著輸入功率增加會由連續波(CW)變成 Q 開關鎖模(QSML)，再增加輸入功率則變為連續波鎖模(CWML)，然而有些只有兩個階段，如連續波(CW)直接變為連續波鎖模(CWML)，或者 Q 開關鎖模(QSML)直接變成連續波鎖模(CWML)的階段，介紹如下：

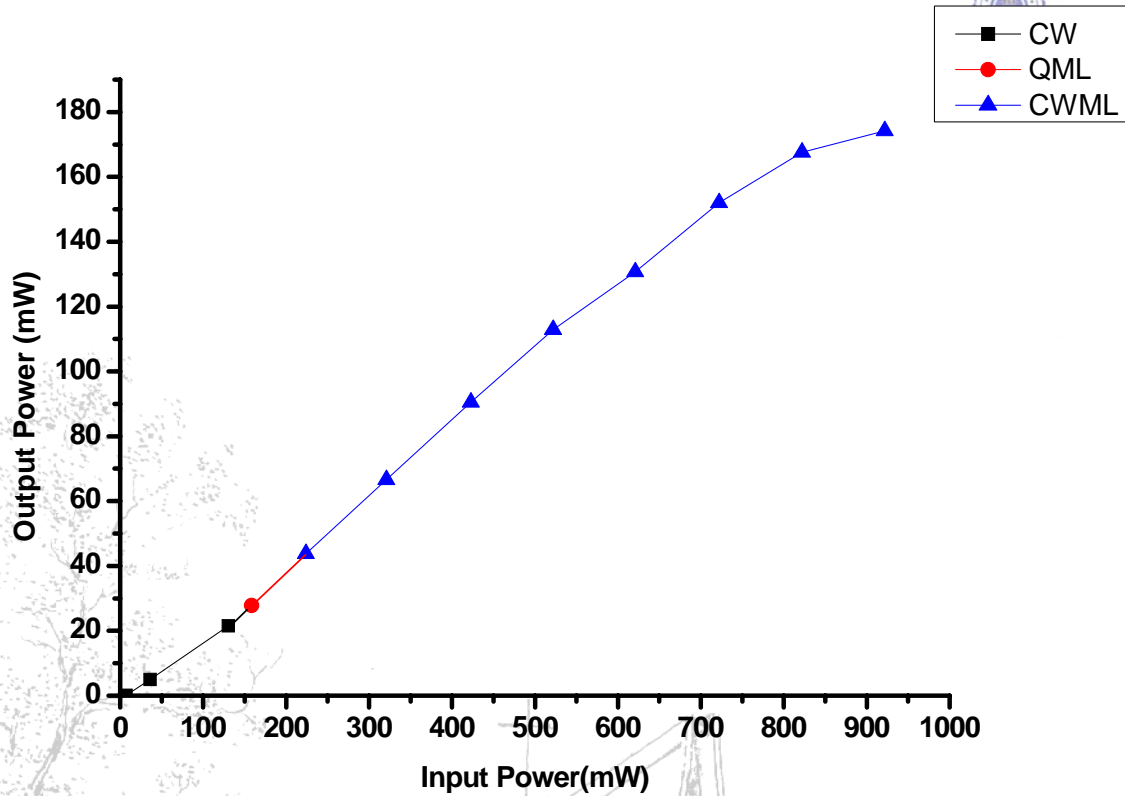


圖 3-2

圖 3-2 的輸出輸入功率圖，是我們在 60cm 腔長，使用兩個焦距 7.5 公分的透鏡，尋找最低連續波閾值時的，一般我們做實驗會將輸入功率設定在較高功率約 621mW，因為一般被動鎖模在高輸入功率會連續波鎖模 (CWML)，而較低的輸入功率呈現 Q 開關鎖模 (QSML)，在實驗裝置架設好，並且我們對輸出功率最佳化，之後調整實驗裝置同時將輸出的光點調整成良好的圓形，這時觀察示波器系統開始連續波鎖模 (CWML)，於是我們降低輸入功率看會有什麼現象，在輸入功率約降低至 158.2mW 開始時觀察到 Q 開關鎖模，而一開始 Lasing (輸入功率約為 6.97mW) 就只是連續波 (CW)，增加輸入功率就會變成 Q 開關鎖模，再增加輸入功率就變成連續波鎖模。



接下來我們在 120cm 腔長使用焦距同為 10cm 之兩透鏡，輸入功率 158.2mW 時獲得連續波鎖模閾值下，作改變其中一面透鏡與晶體(飽和吸收輸出耦合鏡)之距離，對共振腔組態影響的實驗討論。此時 F1、F2 與晶體、SOC 的距離如下圖 3-3 為 10.38cm，10.04cm。

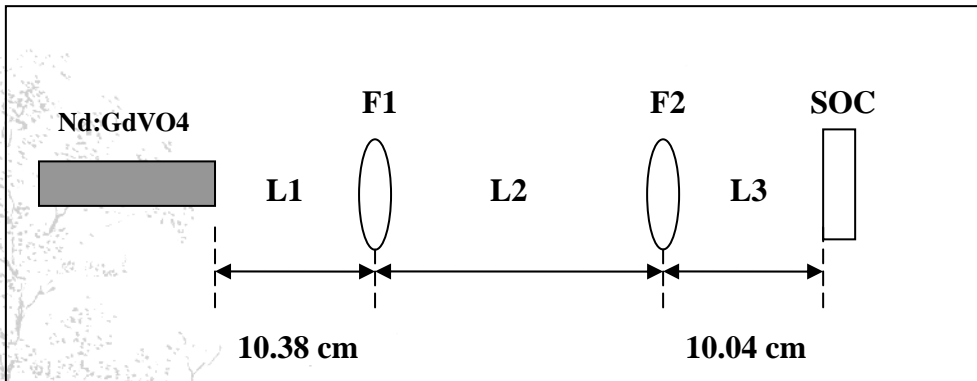


圖 3-3

我們先移動 F1 透鏡觀察會有怎樣的變化，結果如下圖 3-4：

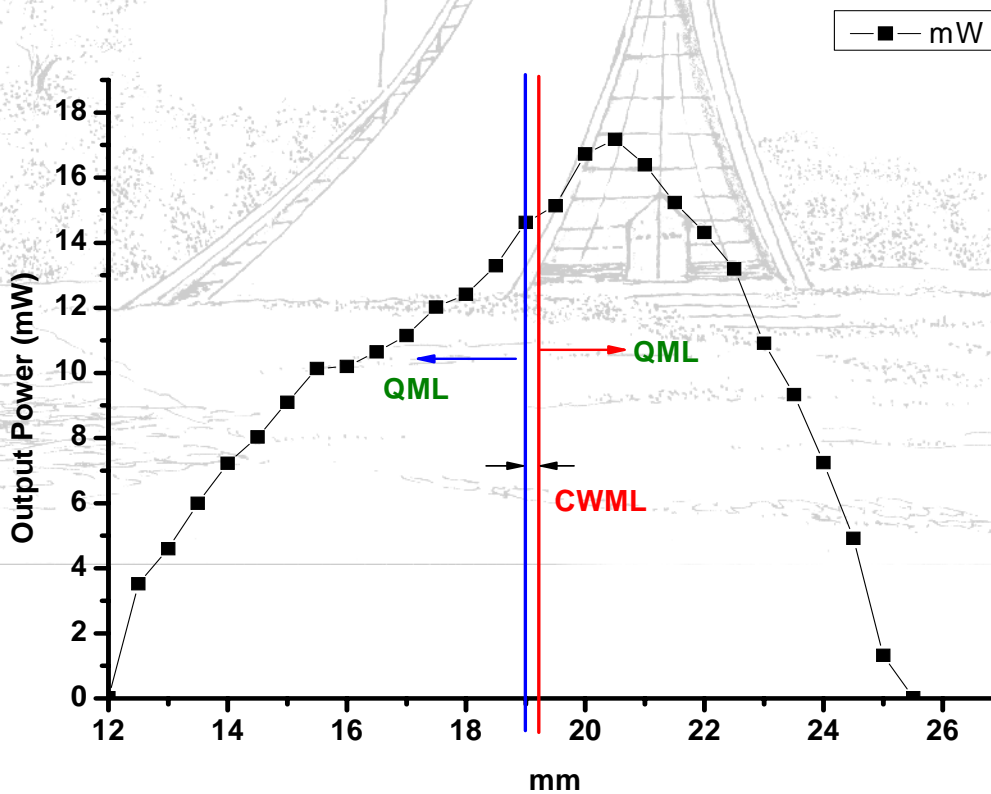


圖 3-4

圖 3-4 中 F1 透鏡可激發雷射範圍約 13.4mm，連續波鎖模範圍 0.22mm，其餘均為 Q 開關鎖模。

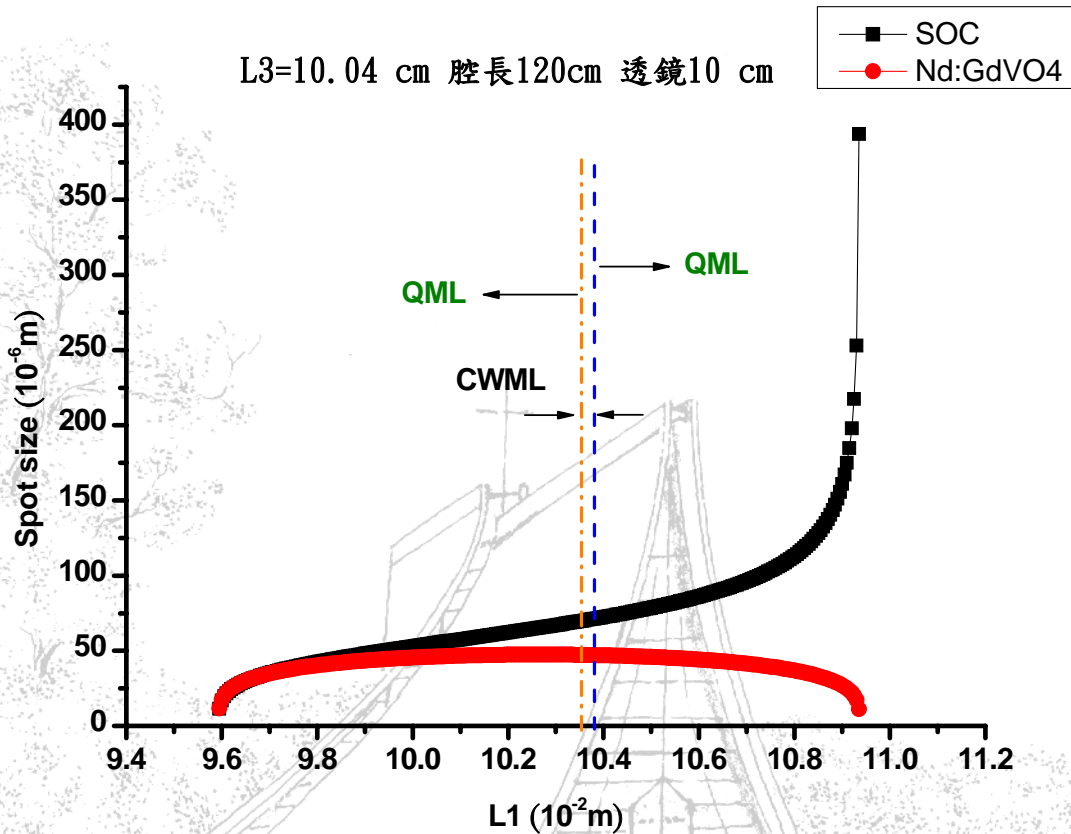


圖 3-5

圖 3-5 為光束大小對 L1 作圖，可對應圖 3-4 的連續波鎖模範圍，CWML 時在 SOC 上的光束大小從 69.942($G1*G2=-0.969 \times -0.725=0.703$)到 71.3 ($10^{-6}m$)($G1*G2=-0.969 \times -0.706=0.684$)，在晶體上的大小則為 47.259($G1*G2=0.703$)到 47.122 ($10^{-6}m$) ($G1*G2=0.684$)。

接著我們固定 F1、F2 透鏡只移動 SOC 藉此改變 L3 之距離，情況如下圖：

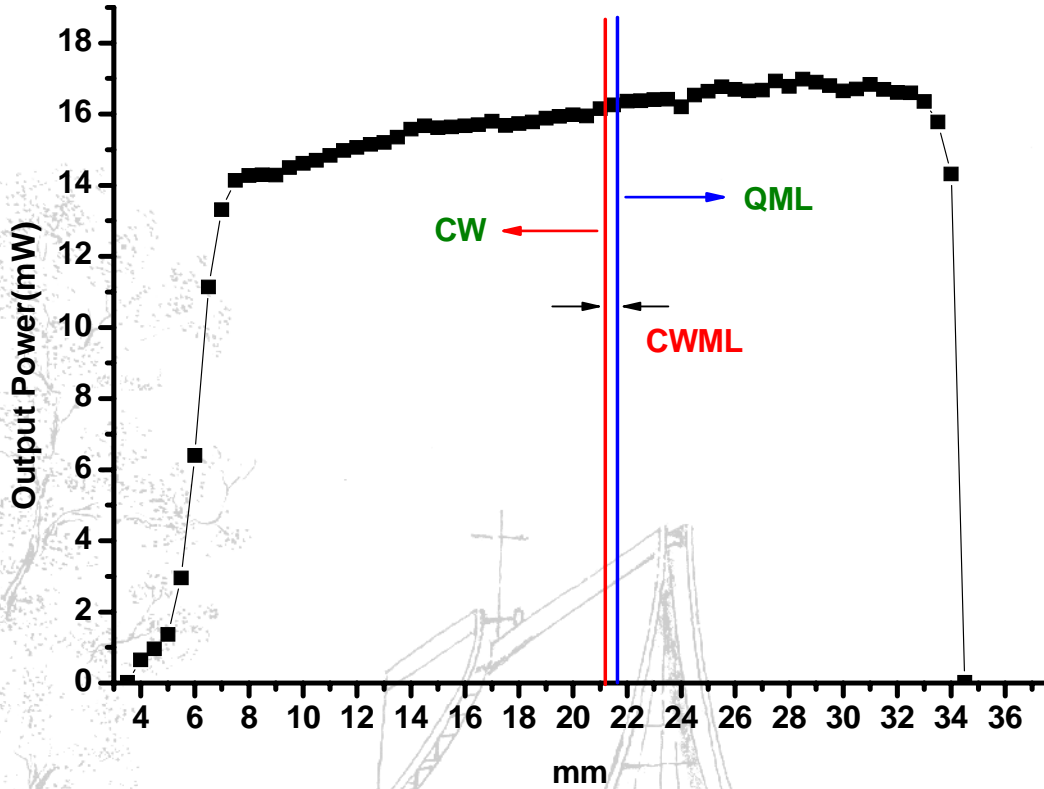


圖 3-6

圖 3-6 中可激發雷射範圍約 30.5mm，連續波鎖模範圍 0.52mm，離開連續波鎖模範圍後 SOC 靠近 F2 透鏡則為連續波(CW)，相反地 SOC 遠離 F2 透鏡則為 Q 開關鎖模(QML)。

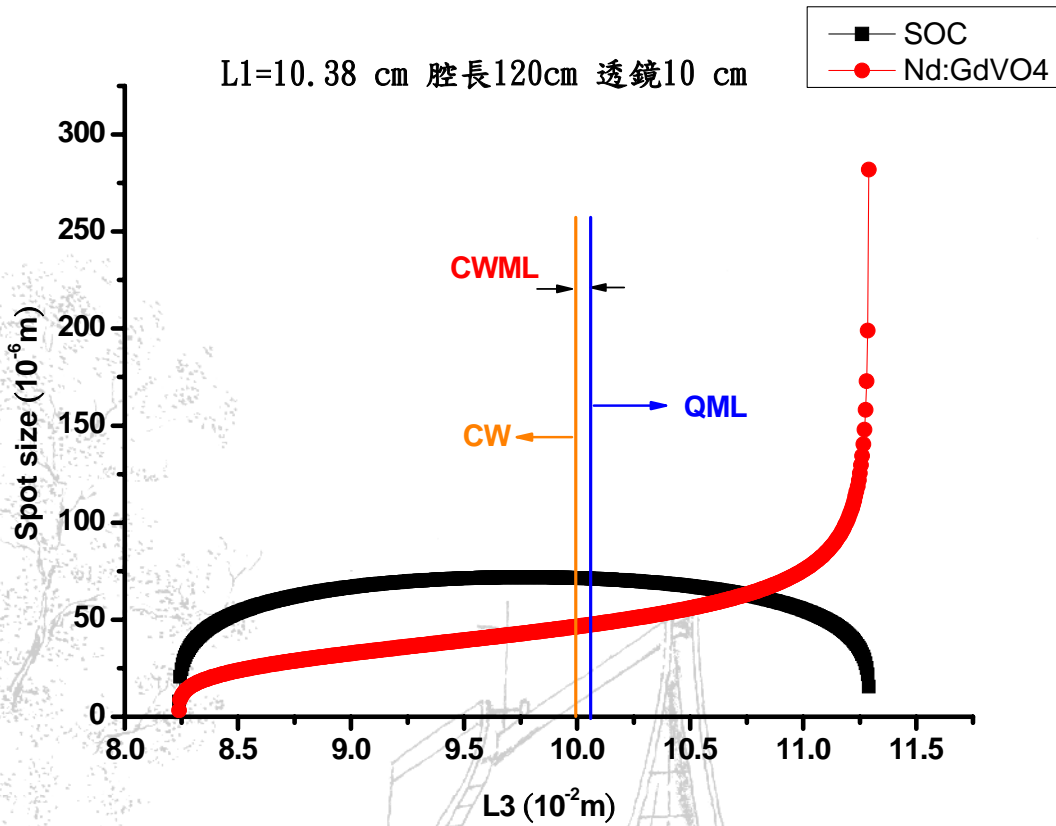


圖 3-7 為光束大小對 L3 作圖，可對應圖 3-6 的連續波鎖模範圍，CWML 時在 SOC 上的光束大小從 $71.497(G1*G2=-1.008 \times -0.706=0.712)$ 到 $71.3(10^{-6}m)$ ($G1*G2=-0.969 \times -0.706=0.684$)，在晶體上的大小則為 $45.418(G1*G2=0.712)$ 到 $46.335(10^{-6}m)$ ($G1*G2=0.684$)。

由上面我們可知道將 L3 固定去改變 L1 的時候，它的輸出功率會由移動前的位置附近，往晶體靠近或遠離而逐漸變小；當將 L1 固定改變 L3 時，則可清楚地看到它的輸出功率變動不明顯，快到達穩定區邊緣時，則會急速地下降。



另一組同樣在 120cm 腔長使用兩焦距 10cm 透鏡，輸入功率 111.5mW 時獲得連續波鎖模閾值下，做同上的實驗，此時 F1、F2 與晶體、SOC 的距離為 10.373cm，9.935cm。

我們先移動 F1 透鏡觀察會有怎樣的變化，結果如下圖 3-8：

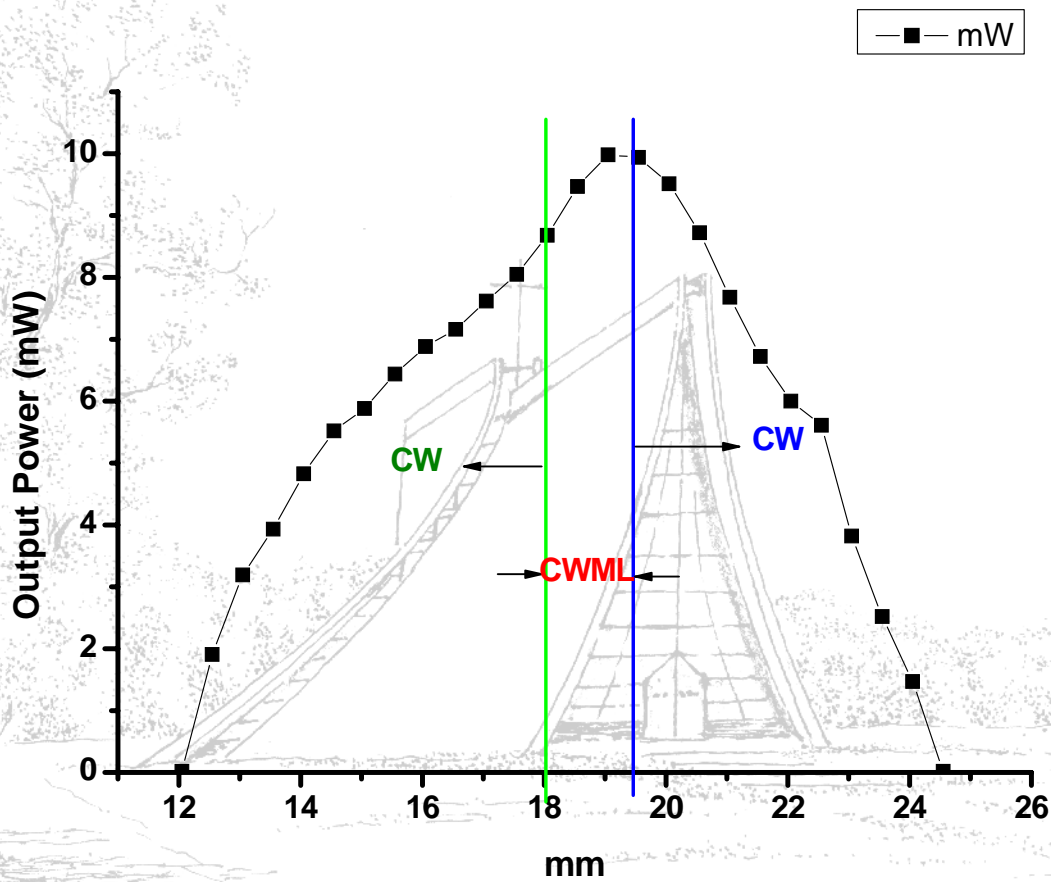


圖 3-8

圖 3-8 中 F1 透鏡可激發雷射範圍約 12.3mm，連續波鎖模範圍 1.45mm，其餘均為連續波。

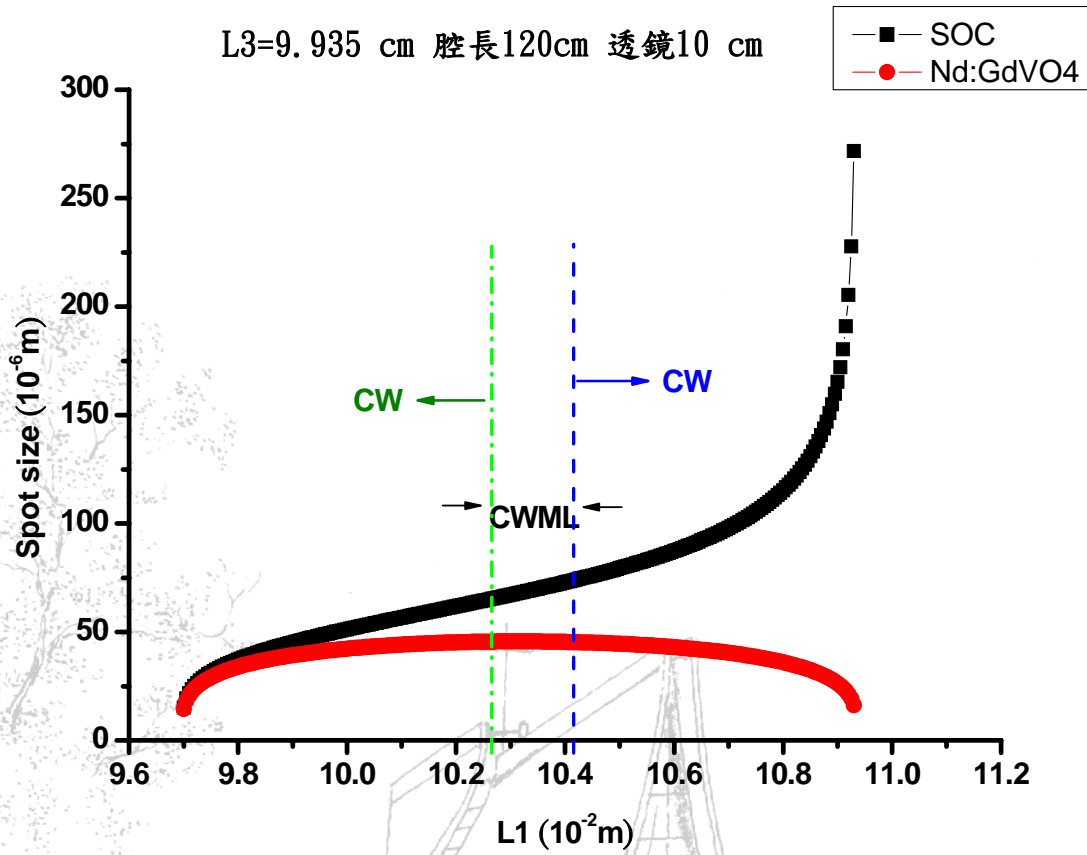


圖 3-9

圖 3-9 為光束大小對 L1 作圖，可對應圖 3-8 的連續波鎖模範圍，CWML 時在 SOC 上的光束大小從 65.787($G1*G2=-1.05 \times -0.787=0.826$)到 74.091 ($10^{-6}m$) ($G1*G2=-1.05 \times -0.675=0.709$)，在晶體上的大小則為 45.544($G1*G2=0.826$)到 45.268 ($10^{-6}m$) ($G1*G2=0.709$)。



接著我們固定 F1、F2 透鏡只移動 SOC 藉此改變 L3 之距離，情況如下圖：

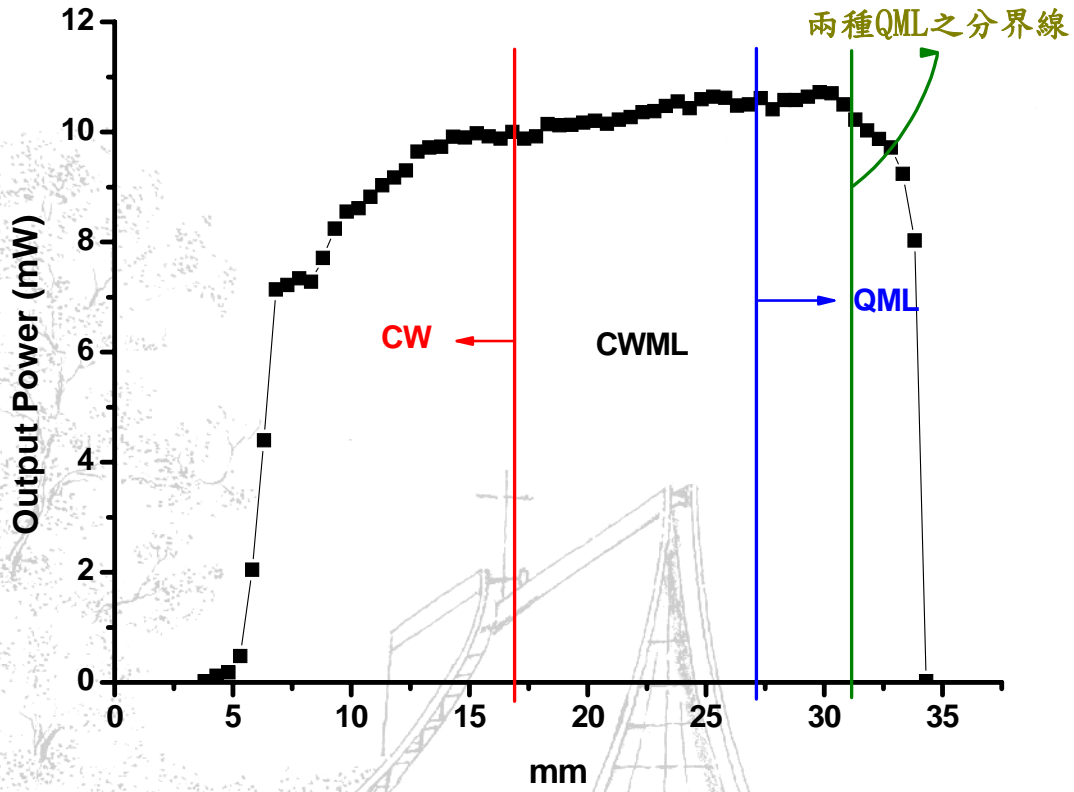


圖 3-10

圖 3-10 中可激發雷射範圍約 30.11mm，連續波鎖模範圍 10.53mm，離開連續波鎖模範圍後 SOC 靠近 F2 透鏡則為連續波(CW)，相反地 SOC 遠離 F2 透鏡則為 Q 開關鎖模(QML)，此外，我們發現在 30.95mm 處有兩種 QML。

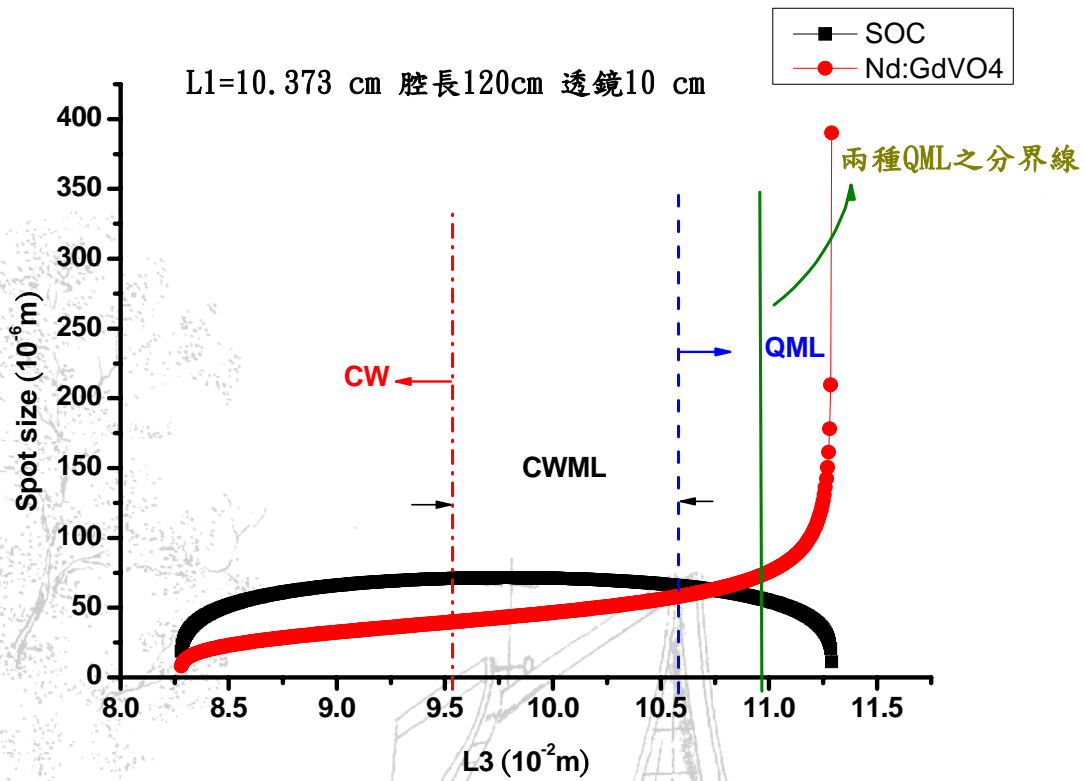


圖 3-11

圖 3-11 為光束大小對 L_3 作圖，可對應圖 3-10 的連續波鎖模範圍，CWML 時在 SOC 上的光束大小從 $70.912(G_1 * G_2 = -1.368 \times -0.711 = 0.973)$ 到 $65.824 (10^{-6} \text{ m}) (G_1 * G_2 = -0.551 \times -0.711 = 0.392)$ ，分界 $56.661(G_1 * G_2 = -0.26 \times -0.711 = 0.185) (10^{-6} \text{ m})$ ，在晶體上的大小則為 $39.669(G_1 * G_2 = 0.973)$ 到 $58.047(G_1 * G_2 = 0.392) (10^{-6} \text{ m})$ ，分界 $72.716 (10^{-6} \text{ m}) (G_1 * G_2 = -0.26 \times -0.711 = 0.185)$ 。



由上可知與之前 158.2mW 時獲得連續波鎖模閾值的情況相似，改變其中一邊 L1 或 L3 大小，它們功率呈現的情況都相同，唯一特別的地方在於移動 F1 透鏡改變 L1 時，離開連續波鎖模的範圍 158.2mW 的都是 QML，而 111.5mW 的則是都是 CW 並無 QML，我們認為應當是激發雷射的閾值與連續波鎖模的閾值相當接近，以致於壓抑了 QML。

此外我們使用 COHERENT 公司所出產的自相關干涉儀來測量脈衝寬度，型號:FR103 Autocorrelator，採用非共線性的方法量測雷射脈衝寬度，在 120cm 腔長下用兩焦距為 10cm 的透鏡，輸入功率是 722mW，輸出功率 87mW 此時是連續波鎖模，換算後所得之脈衝寬度為 7.4 ps，峰值功率 94.05W。

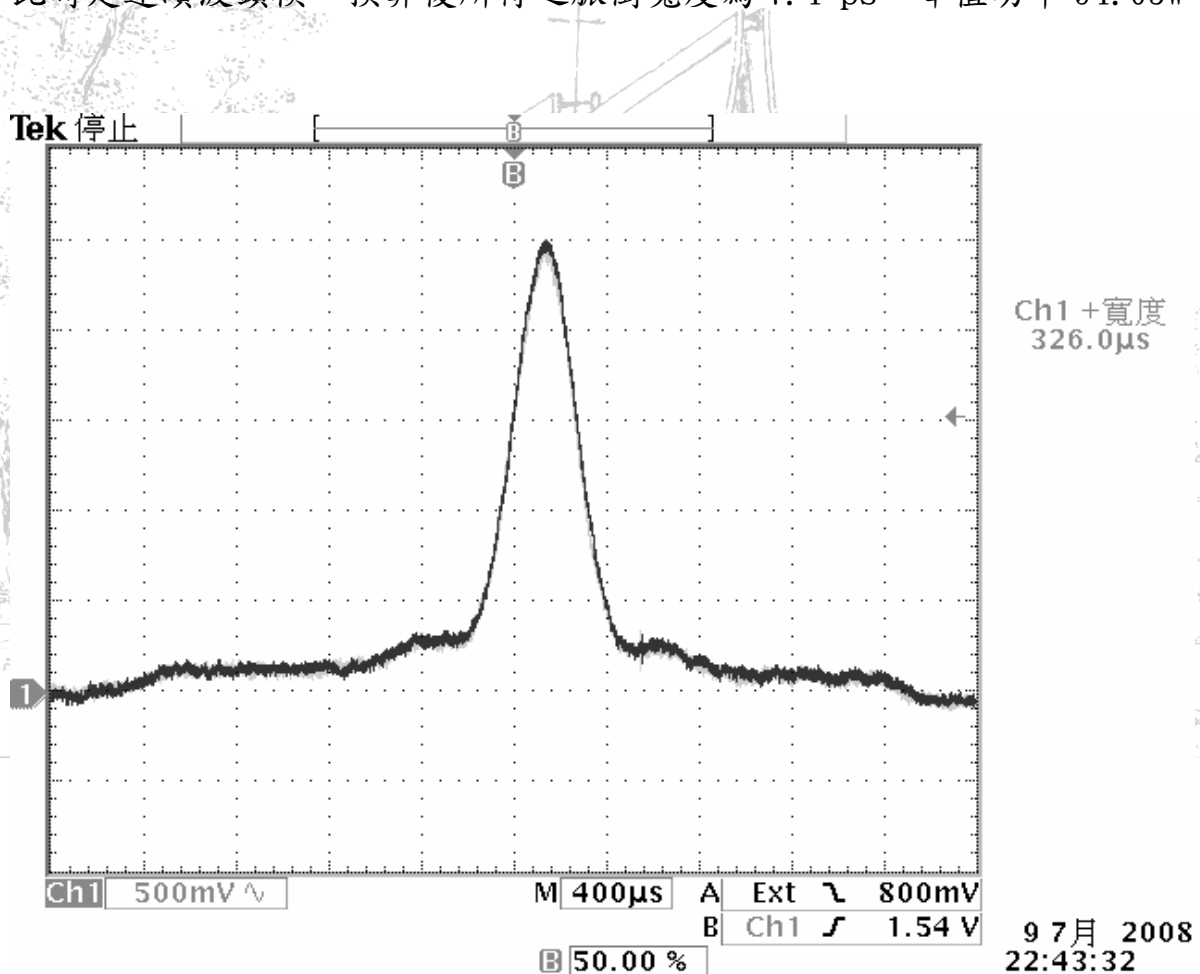


圖 3-12

下面各圖是示波器上觀察到連續波、Q 開關鎖模和連續波鎖模。

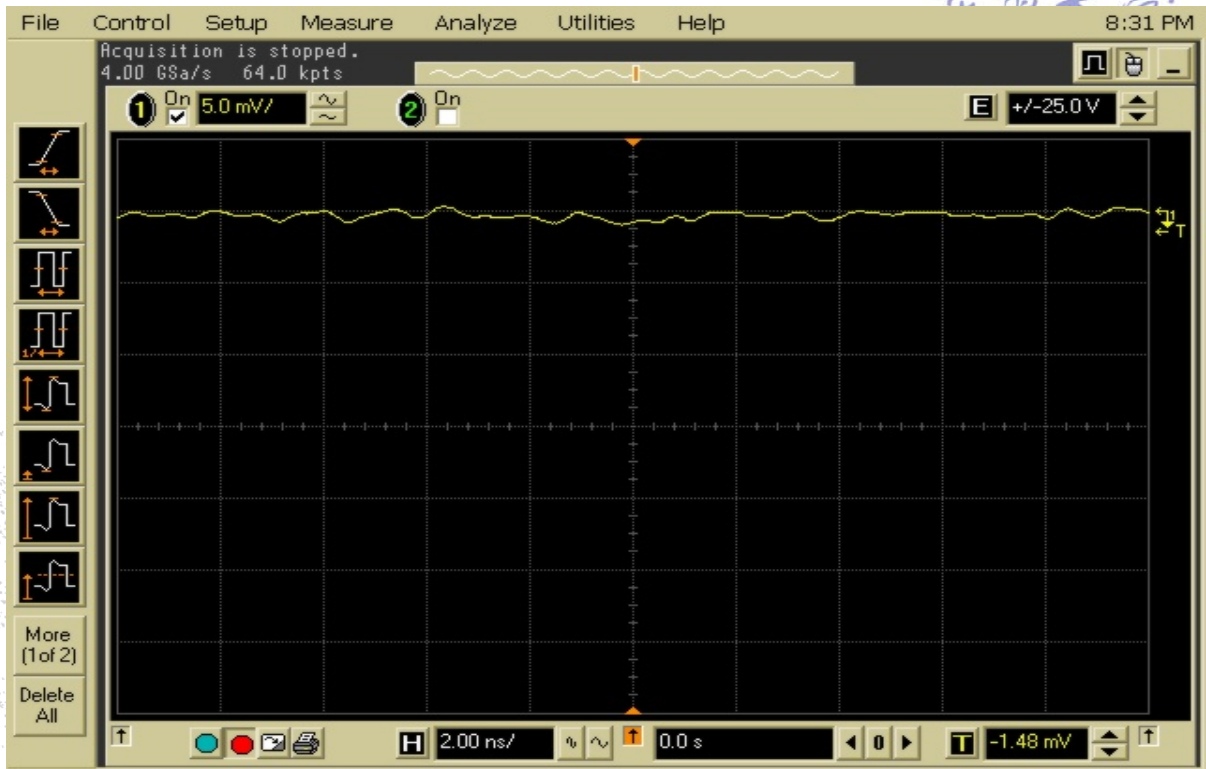


圖 3-13

圖 3-13 是我們在輸入功率 36.1mW 時觀察到的連續波，圖上的橫軸單位是 2ns。

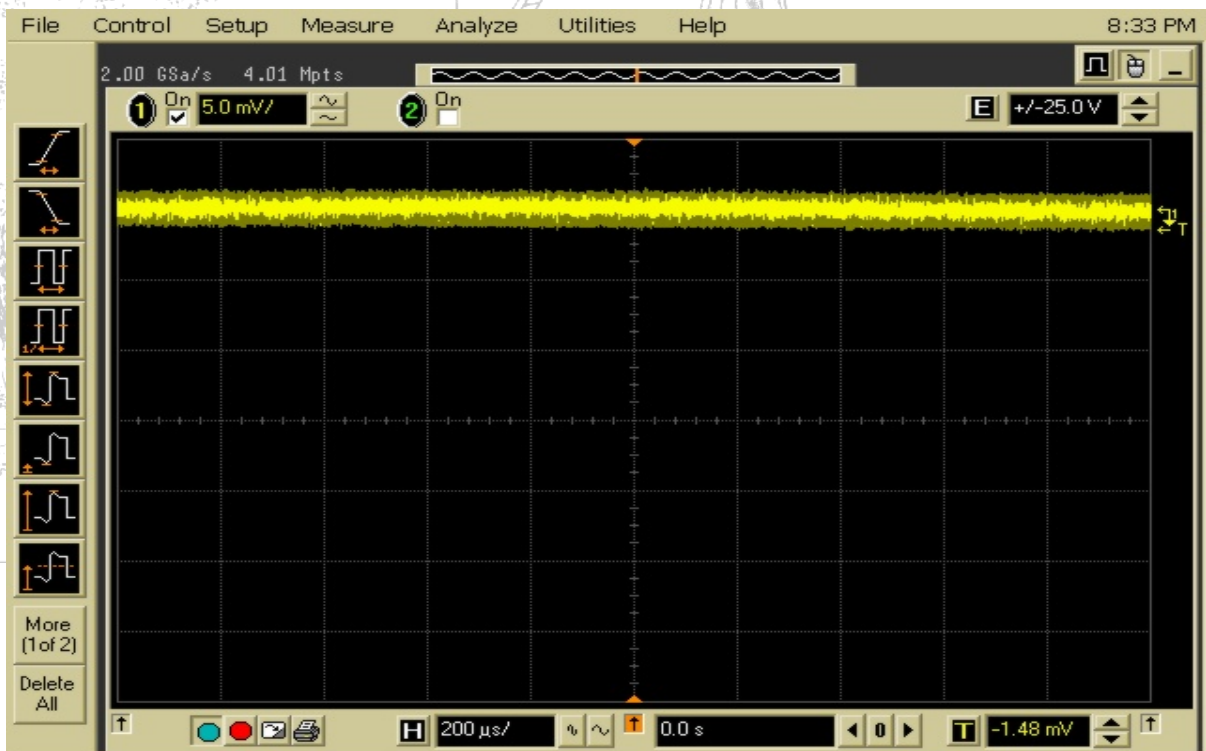


圖 3-14

圖 3-14 是在輸入功率 36.1mW 時觀察到的連續波，圖上的橫軸單位是 200 μs。

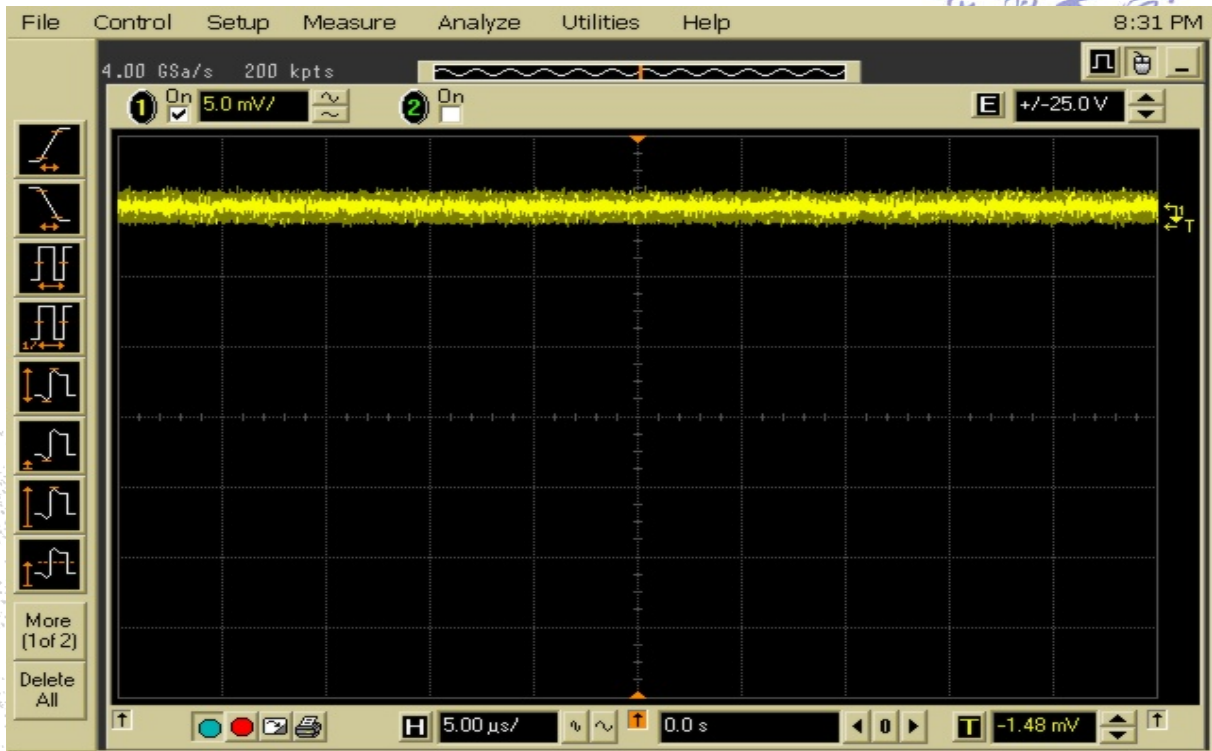


圖 3-15

圖 3-15 是在輸入功率 36.1mW 時觀察到的連續波，圖上的橫軸單位是 5 μ s。

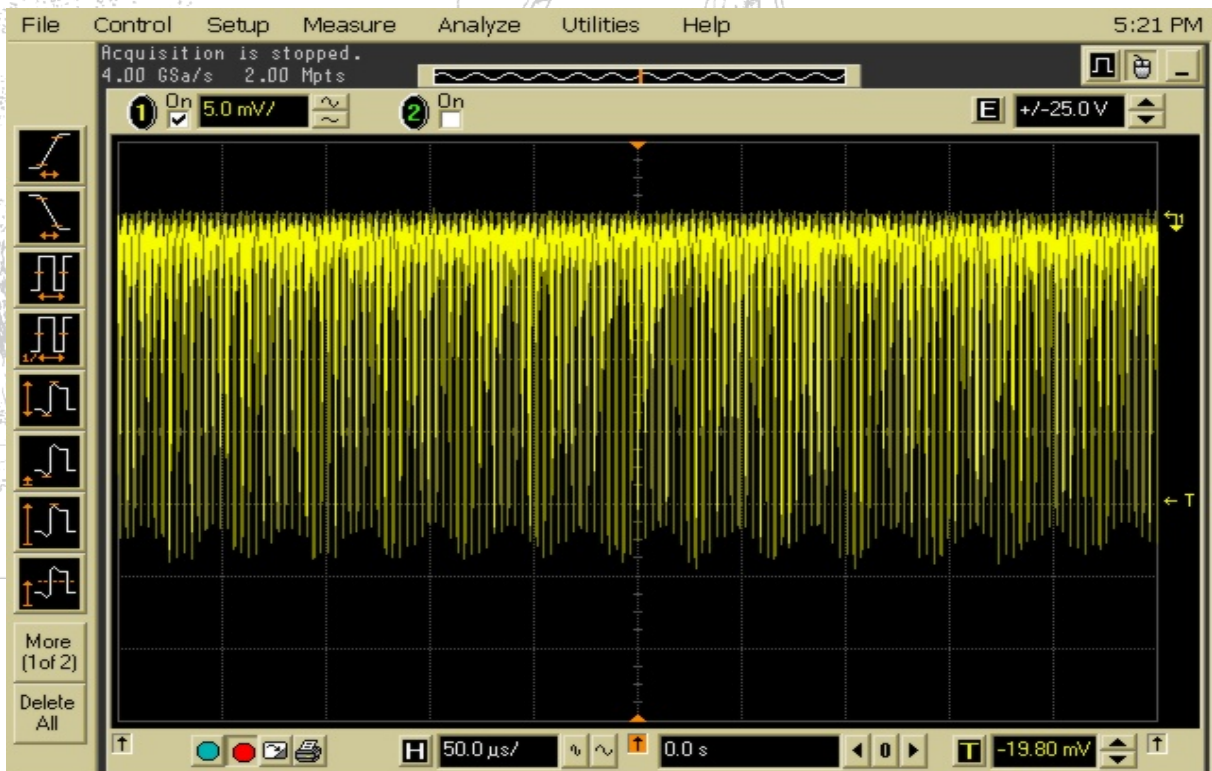


圖 3-16

圖 3-16 是在輸入功率 177.6mW 時觀察到的 Q 開關鎖模，圖上的橫軸單位是 50 μ s。

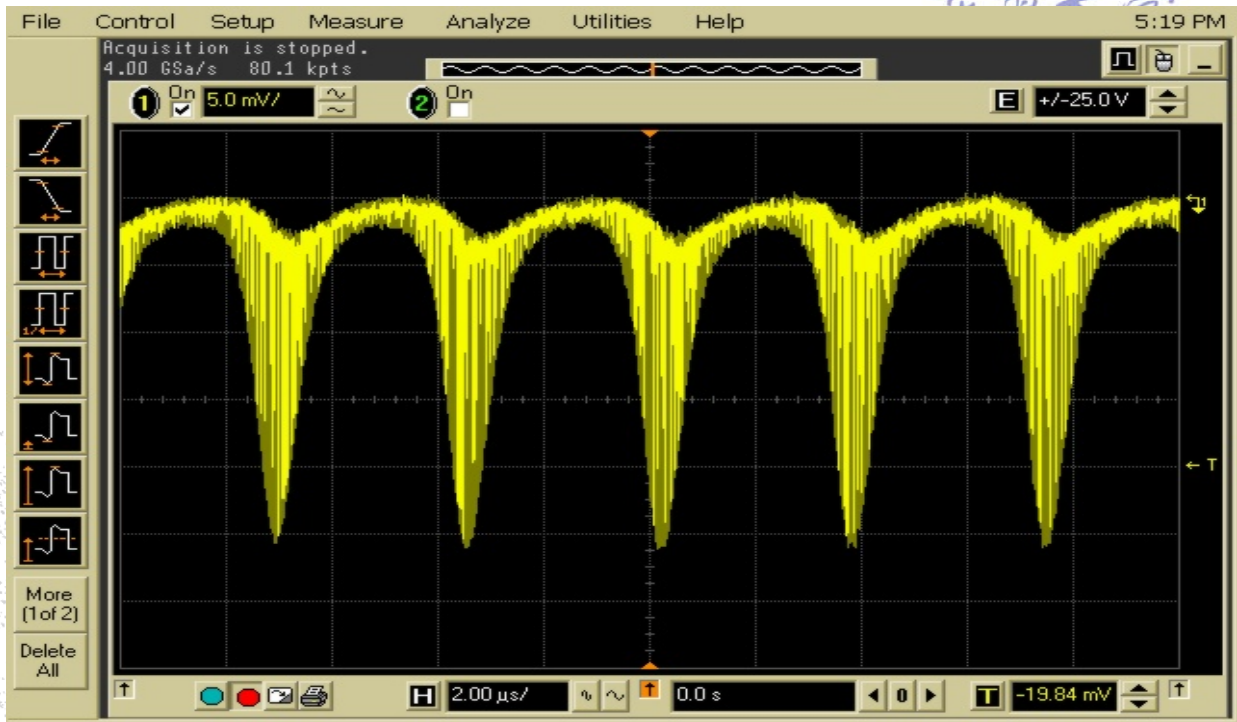


圖 3-17

圖 3-17 是在輸入功率 177.6mW 時觀察到的 Q 開關鎖模，圖上的橫軸單位是 $2\mu s$ 。

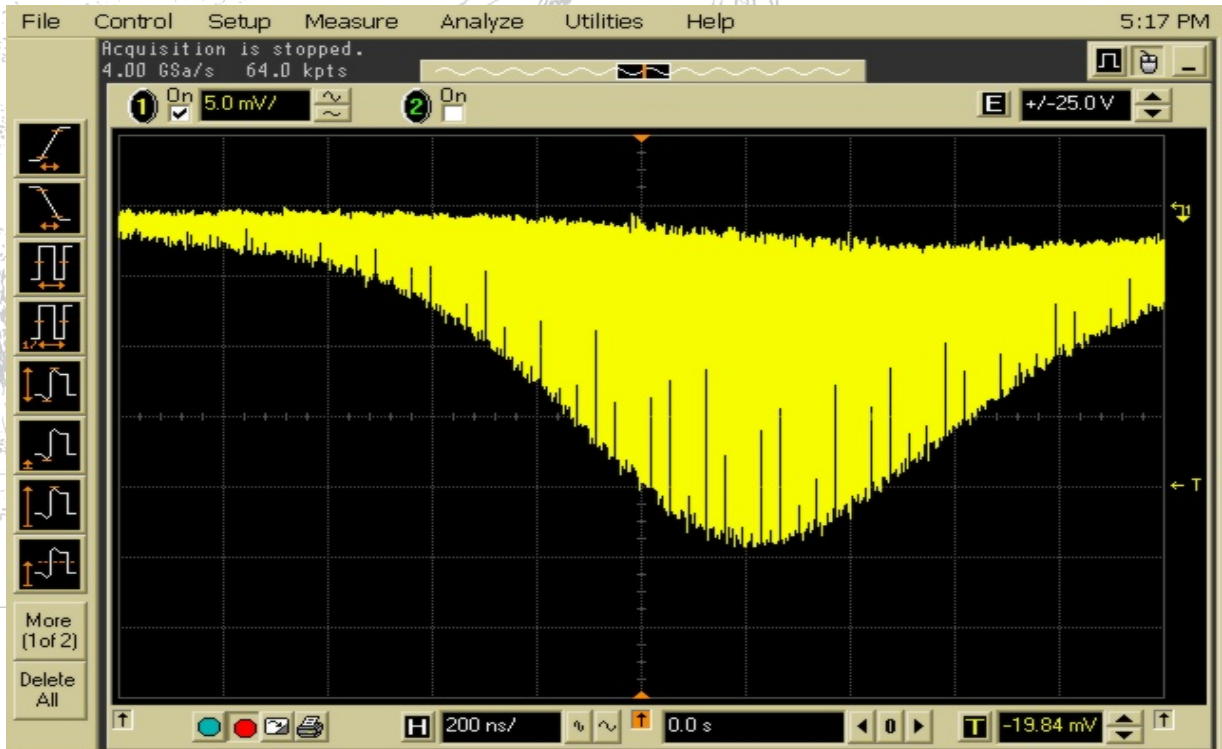


圖 3-18

圖 3-18 是在輸入功率 177.6mW 時觀察到的 Q 開關鎖模，圖上的橫軸單位是 200ns。

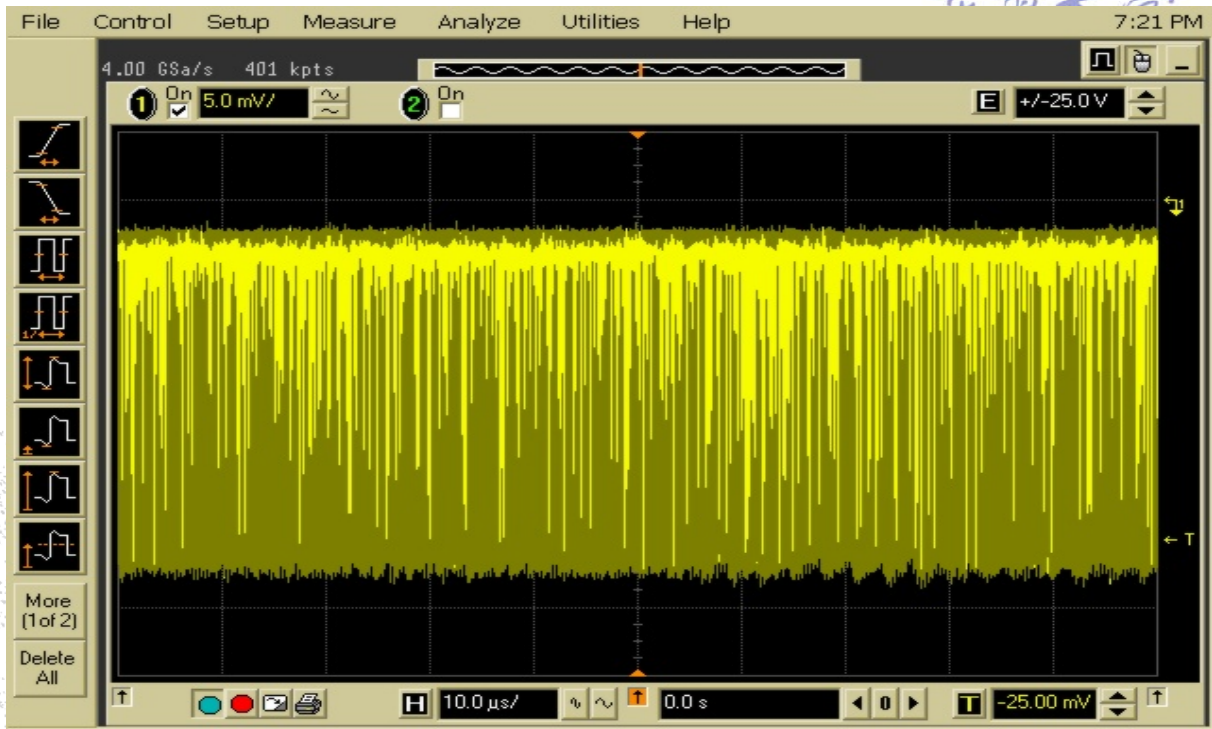


圖 3-19

圖 3-19 是在輸入功率 922mW 時觀察到的連續波鎖模，圖上的橫軸單位是 $10\mu s$

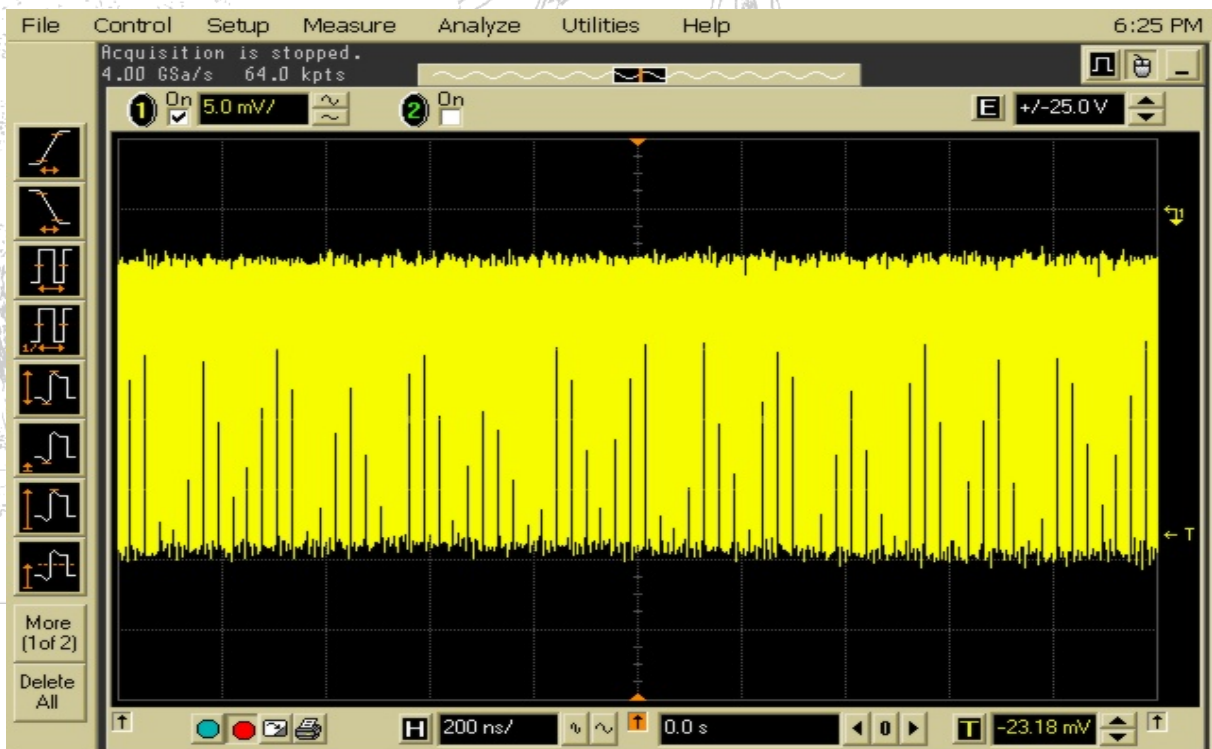


圖 3-20

圖 3-20 是在輸入功率 922mW 時觀察到的連續波鎖模，圖上的橫軸單位是 200ns。

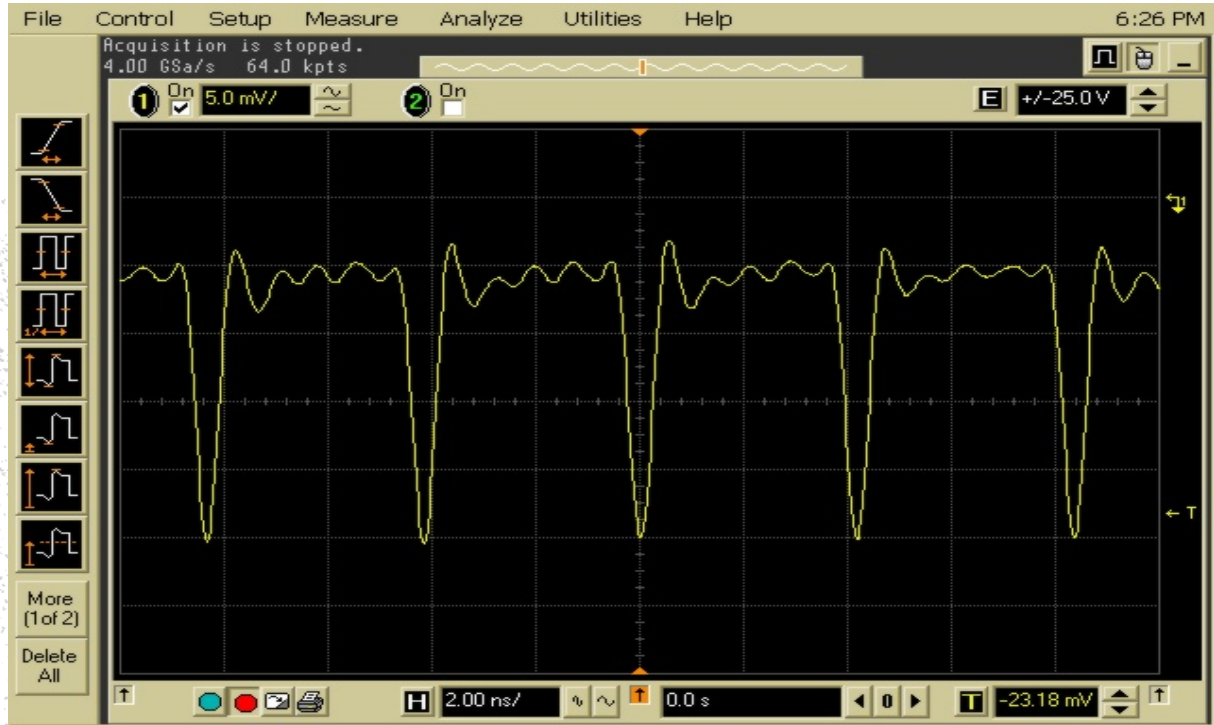


圖 3-21

圖 3-21 是在輸入功率 922mW 時觀察到的連續波鎖模，圖上的橫軸單位是 5ns。

接下來，我們試著改變一些共振腔的條件，觀察對鎖模的影響第 3-3 節是改變腔長對鎖模的影響，3-4 節是用不同焦距的透鏡在同腔長下對鎖模的影響。

3-3 相同焦距透鏡不同腔長之影響

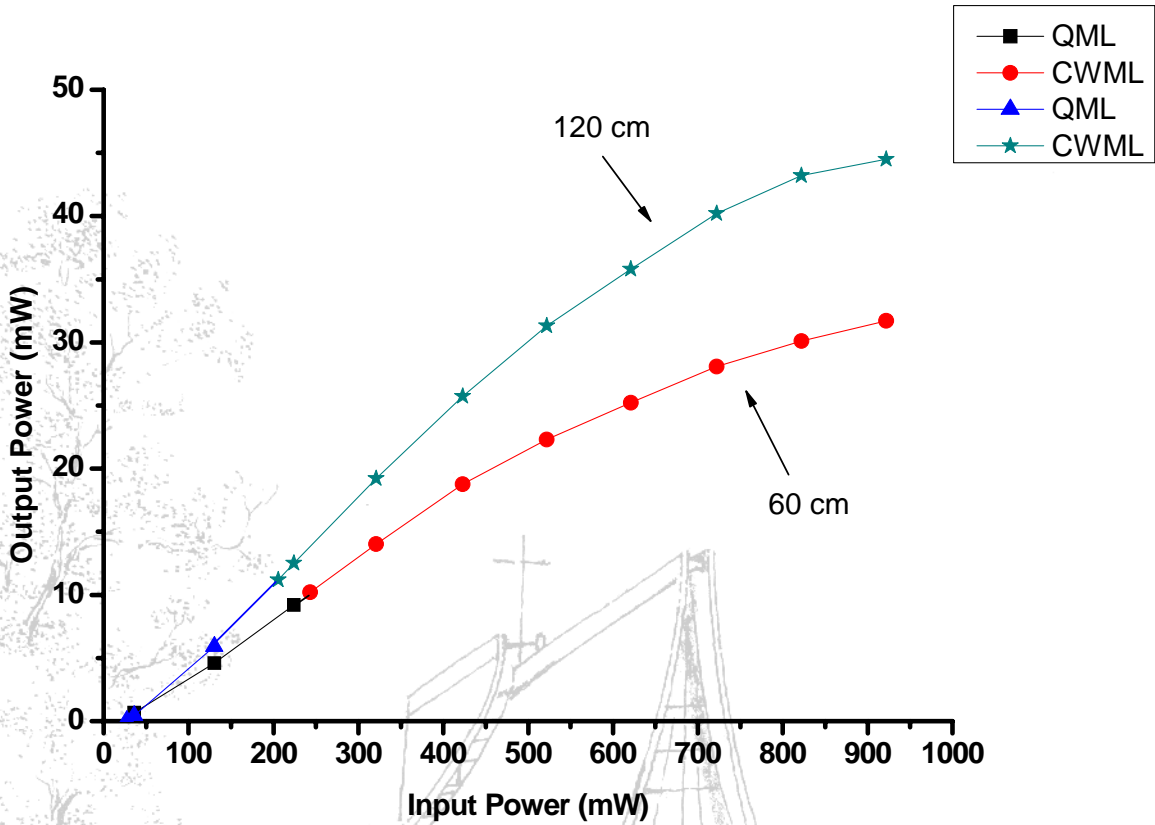


圖 3-22

圖 3-22 是使用焦距 2.5cm 透鏡在不同腔長下實驗的結果，由圖中可發現 120cm 腔長的連續波鎖模閾值較低，而輸出功率也比 60 公分的高，在圖中 60cm、120cm 腔長也觀察到在輸入功率較高時，輸出功率不再線性增加似乎有增益飽和的現象，這在較大焦距的透鏡中較不明顯，應該是焦距 2.5cm 透鏡所聚焦的光點較小所造成的增益飽和，且由之前的計算結果和圖 2-6 可得知長腔的所聚焦的光點較小。



圖 3-23

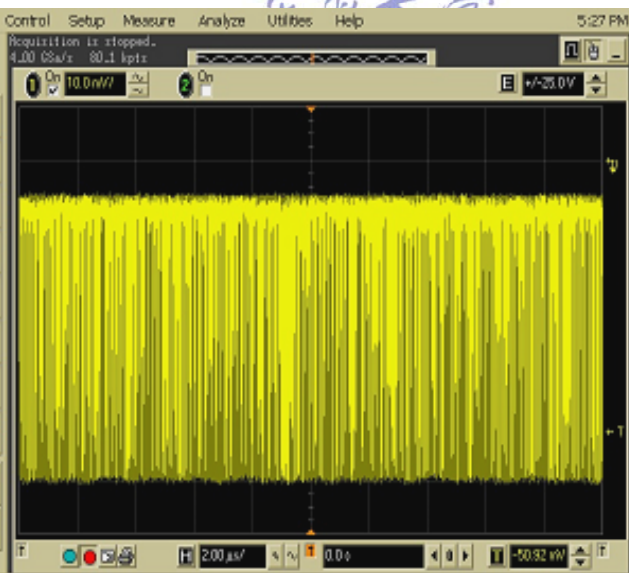


圖 3-24

圖 3-23、3-24 是用焦距 2.5cm 透鏡在 60cm 腔長下，從示波器觀察到的連續波鎖模，圖 3-23 的橫軸單位是 2ns，圖 3-24 的橫軸單位是 $2\mu\text{s}$ ，此時輸入功率 621mW。



圖 3-25

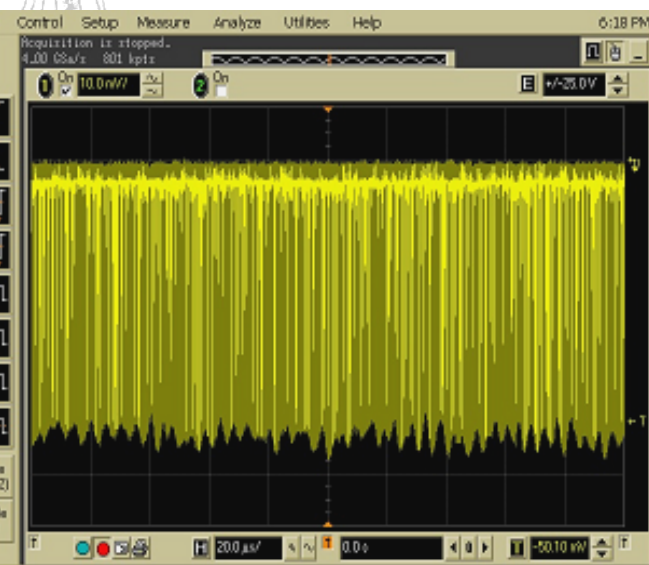


圖 3-26

圖 3-25、3-26 是用焦距 2.5cm 透鏡在 120cm 腔長下，從示波器觀察到的連續波鎖模，圖 3-25 的橫軸單位是 2ns，圖 3-26 的橫軸單位是 $20\mu\text{s}$ ，此時輸入功率 621mW。

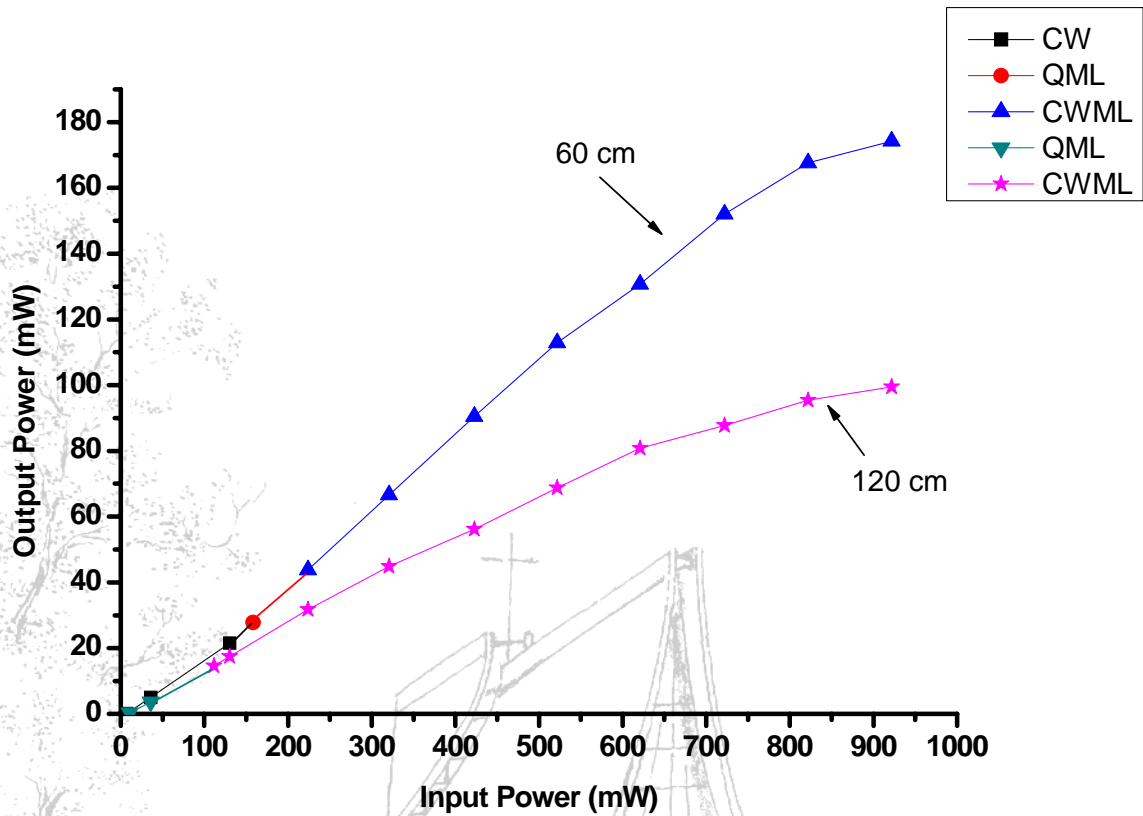


圖 3-27

圖 3-27 是用焦距 7.5cm 的透鏡在 60cm 和 120cm 腔長下實驗的結果，由圖中的數據可看出在焦距 7.5 公分的透鏡下，60 公分腔長有較佳的輸出功率，且有連續波(CW)，120cm 腔長卻沒有，而在 120cm 腔長的連續波鎖模(CWML)閾值較低，和焦距 2.5 公分的透鏡一樣再次證明長腔可抑制 Q 開關鎖模，使連續波鎖模(CWML)的閾值降低。



圖 3-28

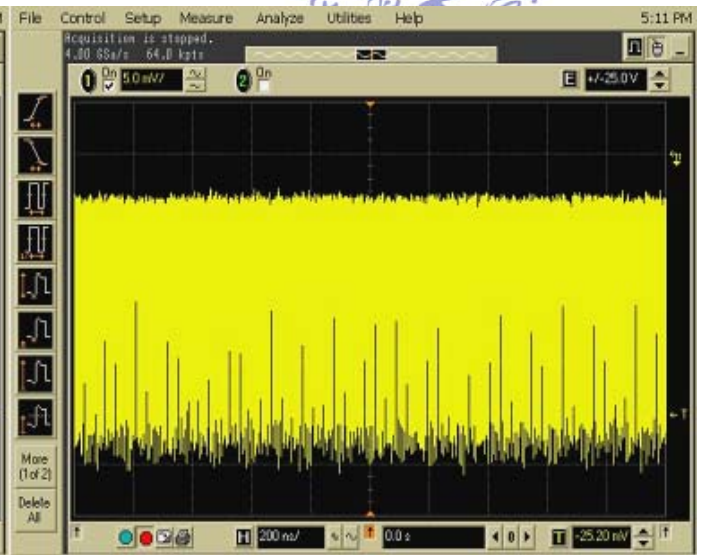


圖 3-29

圖 3-28、3-29 是用焦距 7.5cm 透鏡在 60cm 腔長下，從示波器觀察到的連續波鎖模，圖 3-28 的橫軸單位是 2ns，圖 3-29 的橫軸單位是 200ns，此時輸入功率 621mW。



圖 3-30

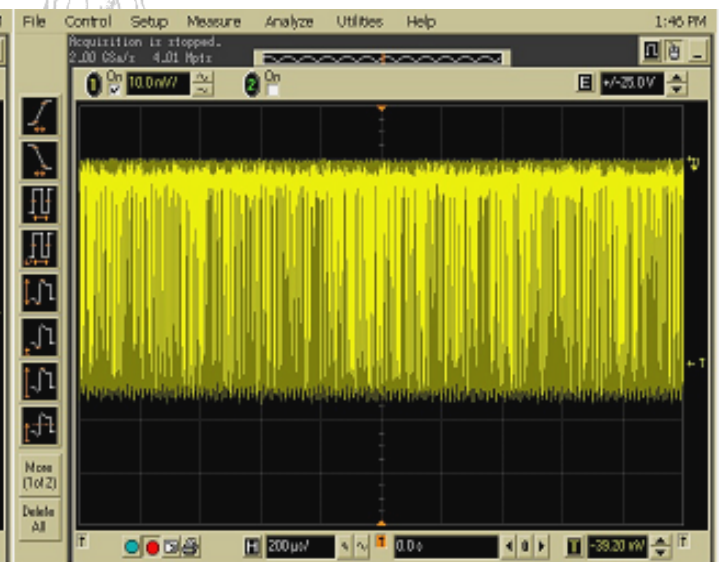


圖 3-31

圖 3-30、3-31 是用焦距 7.5cm 透鏡在 120cm 腔長下，從示波器觀察到的連續波鎖模，圖 3-30 的橫軸單位是 2ns，圖 3-31 的橫軸單位是 200 μs，此時輸入功率 423mW。

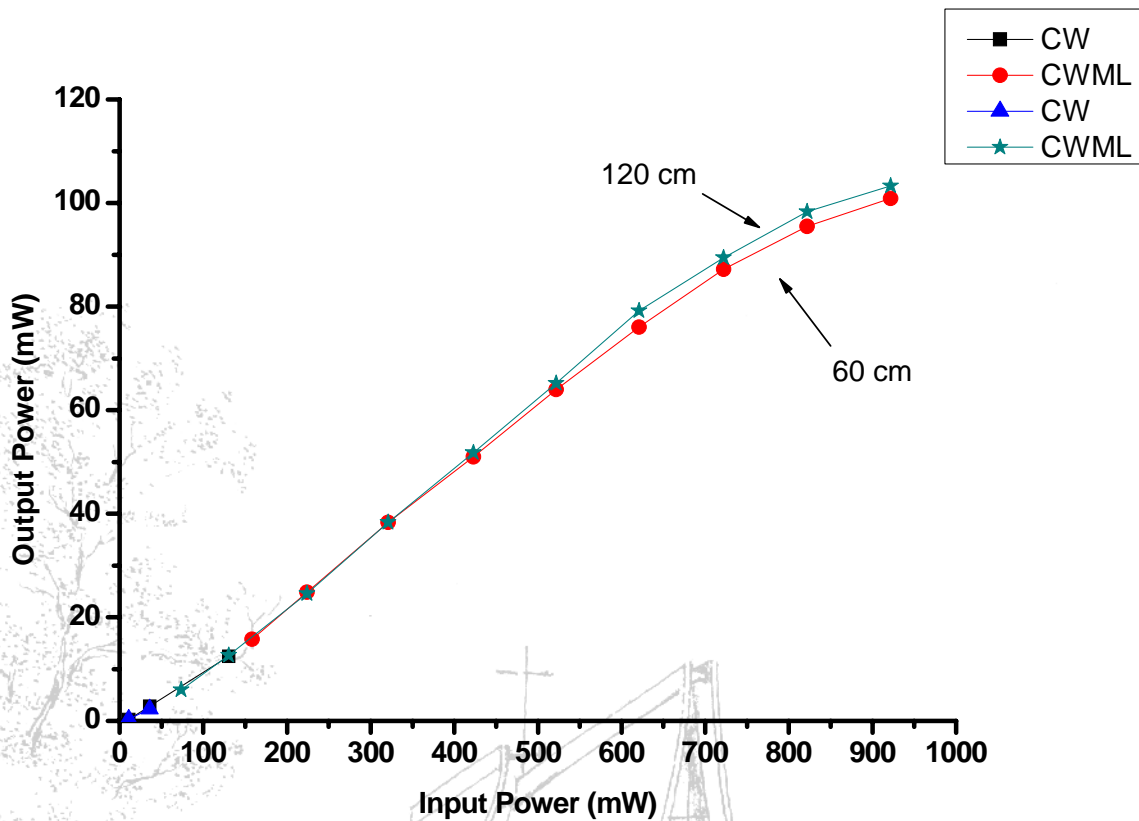


圖 3-32

圖 3-32 是使用 10cm 焦距的透鏡，在 60cm 與 120cm 腔長下實驗的結果，同樣地 120cm 腔長的連續波鎖模閾值較低，但在這兩個腔長下並沒見到 Q 開關鎖模(QSML)，而我們在實驗的時候卻發現，在連續波鎖模的閾值附近是很不穩定的，有時候會突然的變成 Q 開關鎖模，即可知道 Q 開關鎖模是被壓抑住，由於連續波鎖模的閾值太接近雷射產生的閾值，導致中間原本會產生的 Q 開關鎖模遭到抑制而直接出現 CWML。另外，我們在 120 公分的腔長下找到一最低閾值(73.6 mW)，此時輸出功率為 6 mW(=腔內功率 285.7mW)可連續波鎖模(CWML)。

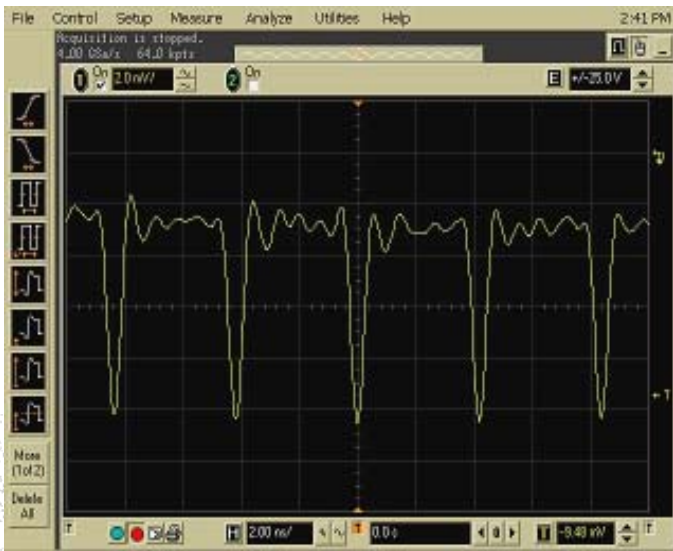


圖 3-33

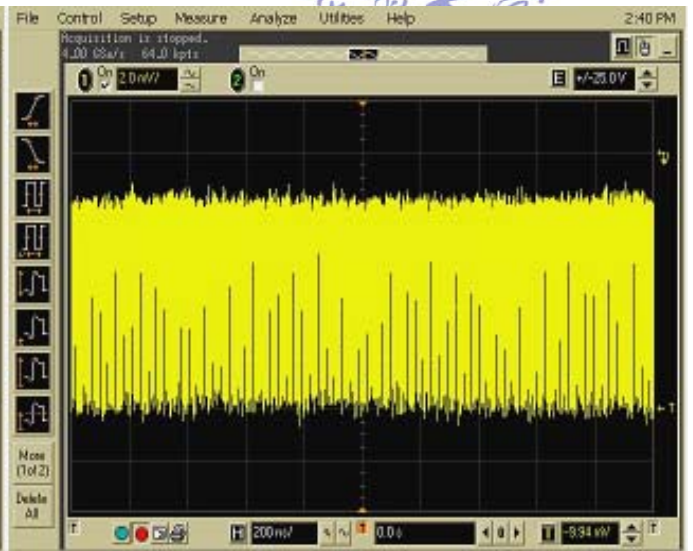


圖 3-34

圖 3-33、3-34 是使用 10cm 焦距透鏡在 60cm 腔長下，從示波器觀察到的連續波鎖模，圖 3-33 的橫軸單位是 2ns，圖 3-34 的橫軸單位是 200ns，此時輸入功率 158.2mW。



圖 3-35

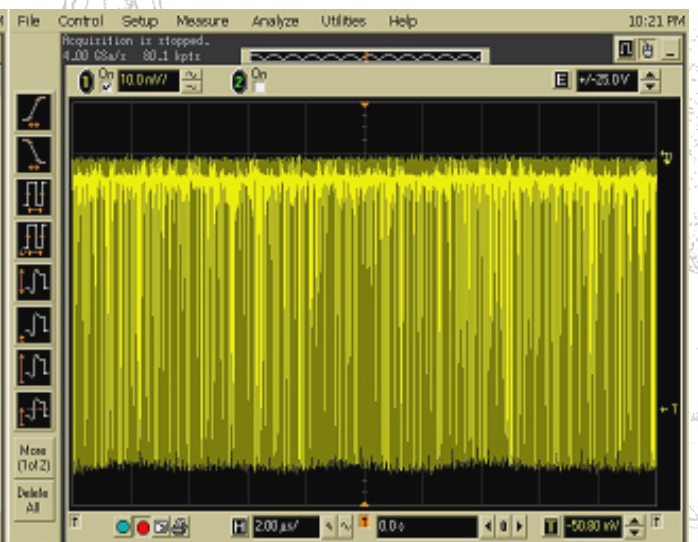


圖 3-36

圖 3-35、3-36 是用 10cm 焦距透鏡在 120cm 腔長下，從示波器觀察到的連續波鎖模，圖 3-35 的橫軸單位是 2ns，圖 3-36 的橫軸單位是 2 μ s，此時輸入功率 423mW。

3-4 相同腔長下不同焦距透鏡之影響

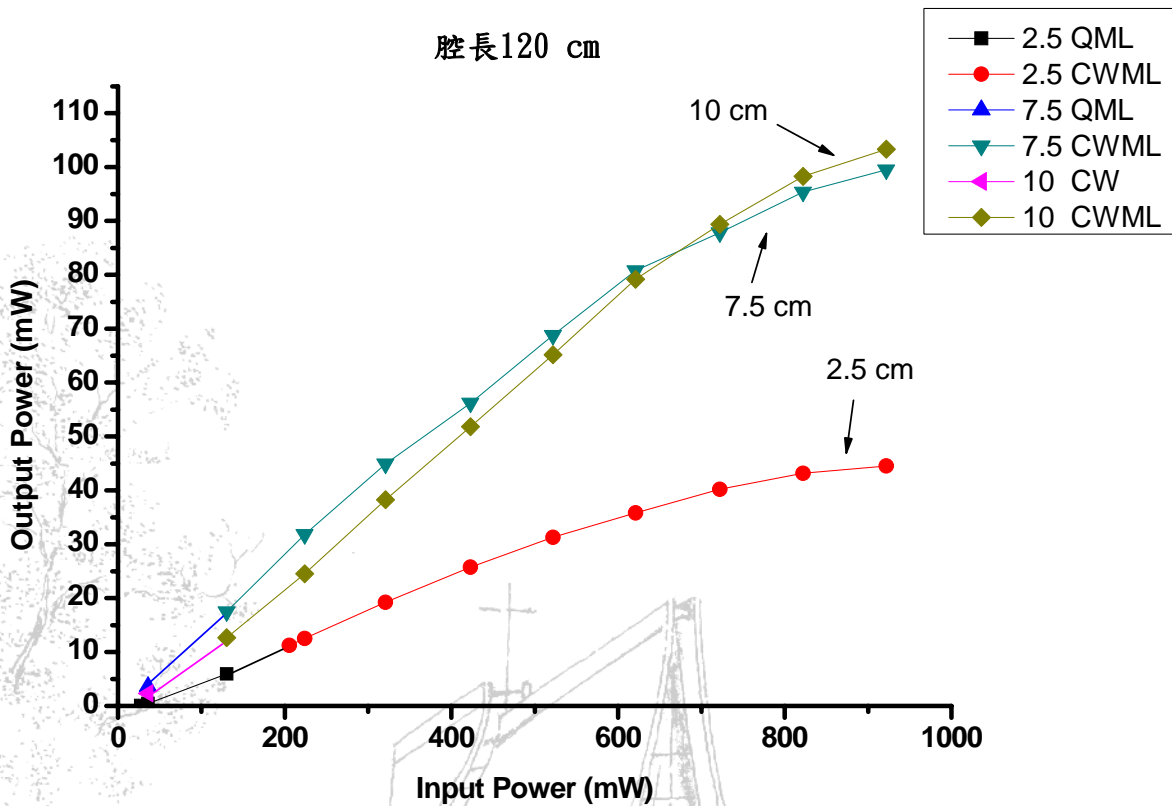


圖 3-37

圖 3-37 是我們在 120cm 腔長下使用不同焦距透鏡的實驗結果，由圖可知焦距 2.5 cm 的透鏡輸出功率最低，但 Q 開關鎖模(QSML)的範圍最大，而且有最高的連續波鎖模閾值(CWML)，而焦距 10 cm 的透鏡沒有大範圍的 Q 開關鎖模(QSML)，且有最低的連續波鎖模閾值(CWML)。而從前面的理論推導和模擬計算可知，要達到連續波鎖模需要 Nd:GdVO₄和半導體飽和吸收輸出耦合鏡(SOC)上的單位面積的能量越高，然而大焦距透鏡所聚焦的光點較大，這意味著 Nd:GdVO₄和半導體飽和吸收輸出耦合鏡(SOC)上的單位面積能量越低，所以焦距越大的透鏡連續波鎖模閾值應越高，但是由我們的實驗可知並不是如此，反而是焦距越大的透鏡閾值越低，焦距越小則連續波鎖模閾值越高。



圖 3-38

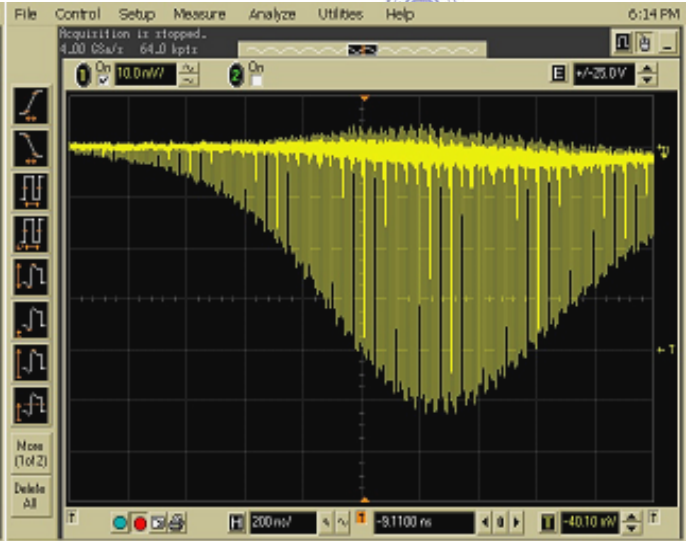


圖 3-39

圖 3-38、3-39 是用焦距 2.5cm 透鏡在 120cm 腔長下，從示波器觀察到的 Q 開關鎖模，圖 3-38 的橫軸單位是 $20 \mu s$ ，圖 3-39 橫軸單位是 200ns，此時輸入功率 130.5mW。



圖 3-40

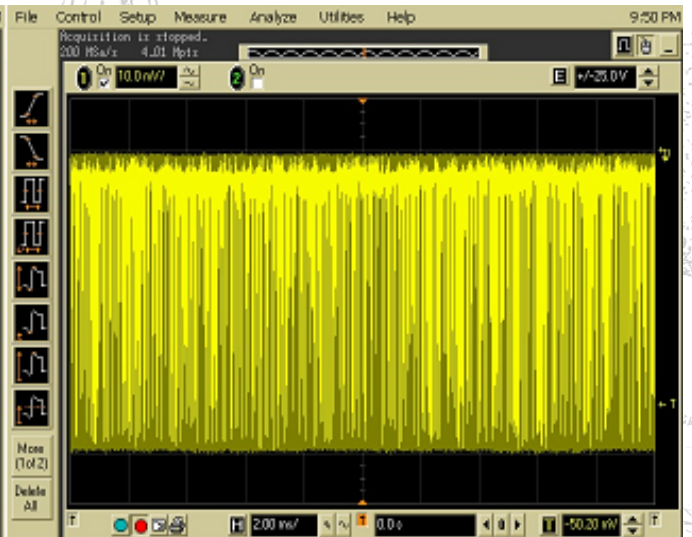


圖 3-41

圖 3-40、3-41 是用焦距 10cm 透鏡在 120cm 腔長下，從示波器觀察到的連續波鎖模，圖 3-40 的橫軸單位是 10ns，圖 3-41 的橫軸單位是 2ms，此時輸入功率 423mW。

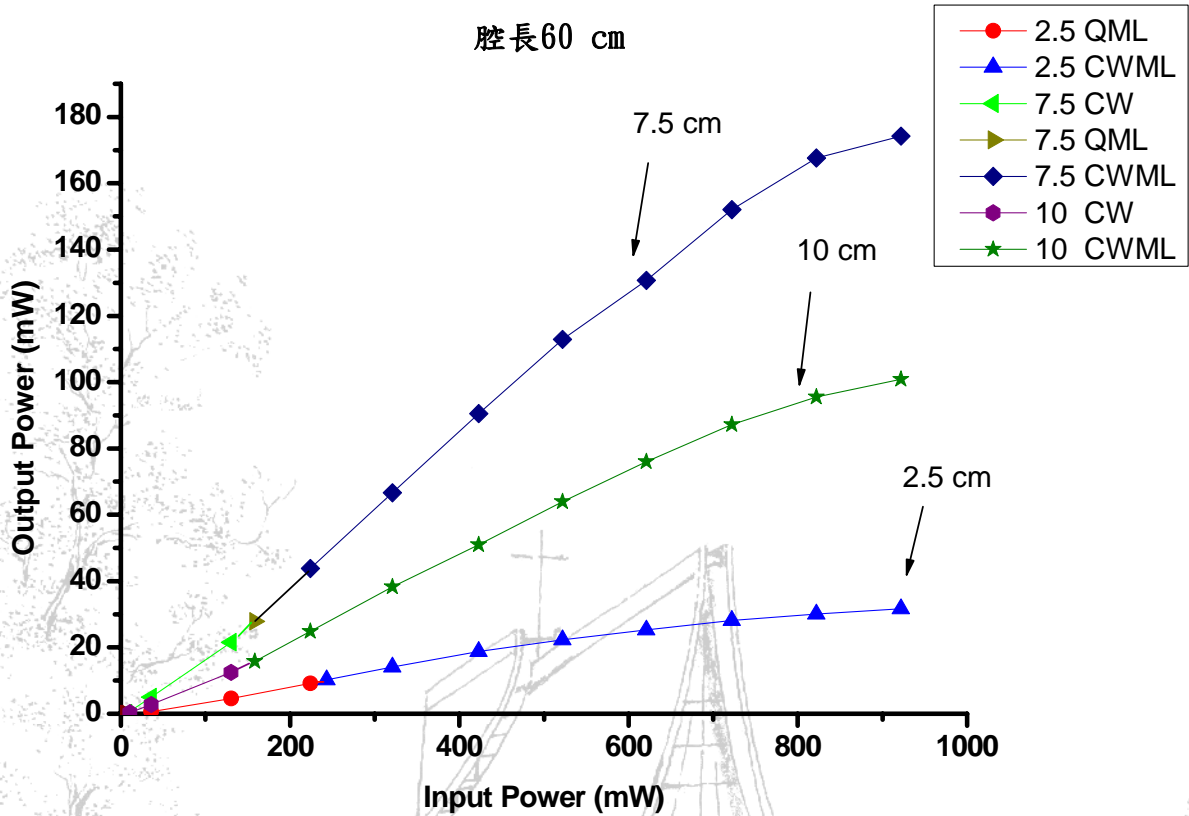


圖 3-42

圖 3-42 是在 60 cm 腔長不同焦距透鏡的實驗結果，可以看出焦距 7.5cm 的透鏡有較高的輸出功率，和較高的連續波鎖模閾值，而焦距 10cm 的透鏡有最低的連續波鎖模閾值，其中焦距 2.5cm 透鏡的連續波鎖模閾值最高，而且可看出焦距 2.5 cm 透鏡的輸出功率和焦距 7.5 cm 以及 10cm 的透鏡相較下，末端的輸出功率有較明顯的飽和現象。

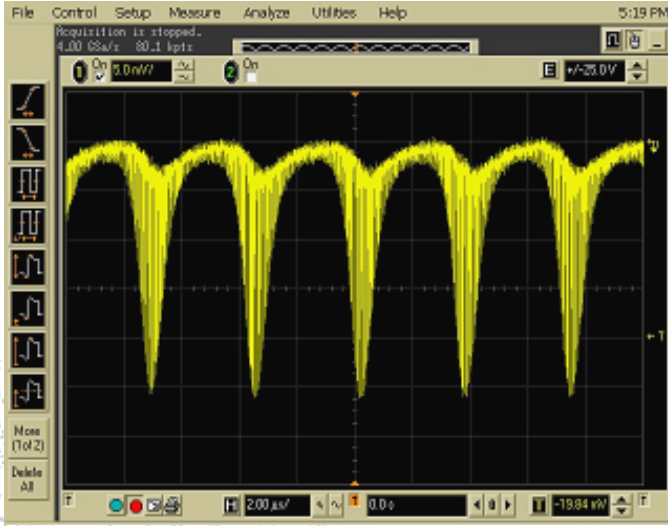


圖 3-43

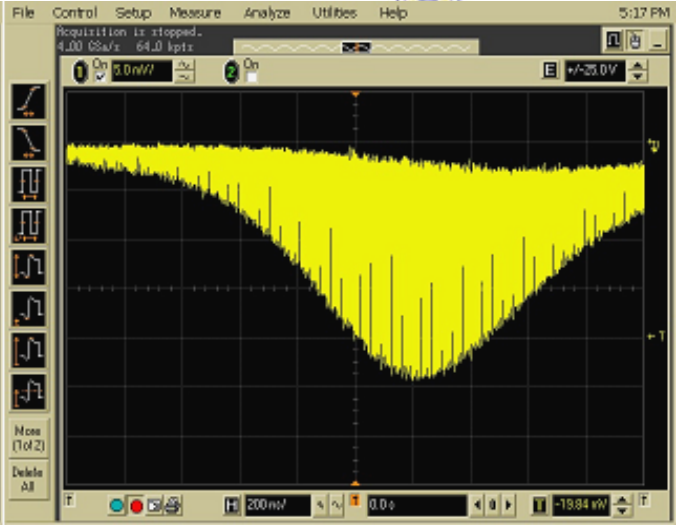


圖 3-44

圖 3-43、3-44 是用焦距 7.5cm 透鏡在 60cm 腔長下，從示波器觀察到的 Q 開關鎖模，圖 3-43 的橫軸單位是 $2\mu s$ ，圖 3-44 的橫軸單位是 200ns，此時輸入功率 177.6mW。

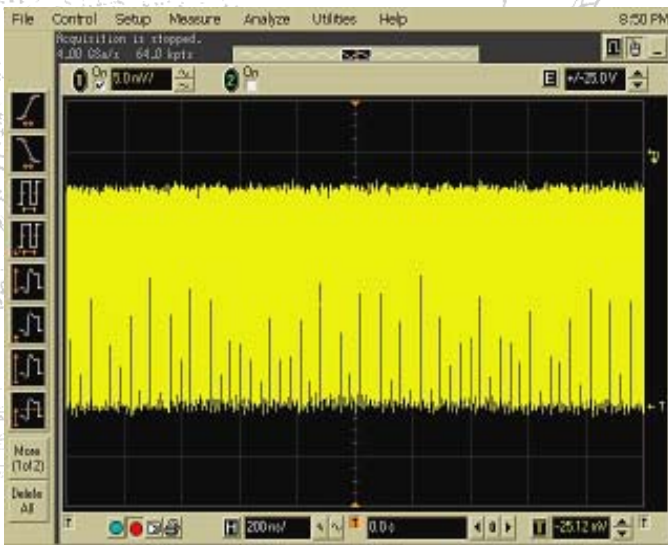


圖 3-45

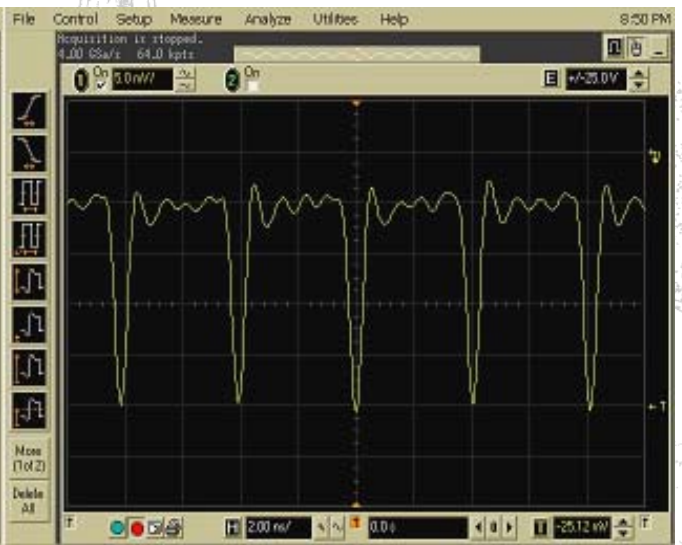


圖 3-46

圖 3-45、3-46 是用焦距 7.5cm 透鏡在 60cm 腔長下，從示波器觀察到的連續波鎖模，圖 3-45 的橫軸單位是 200ns，圖 3-46 的橫軸單位是 2ns，此時輸入功率 321mW。

第四章 最佳輸出功率的連續波鎖模雷射

接下來我們要探討的是，在尋求能獲得最佳輸出功率的考量下，對於不同的共振腔長和不同透鏡所做的研究。

4-1 相同焦距透鏡不同腔長之影響

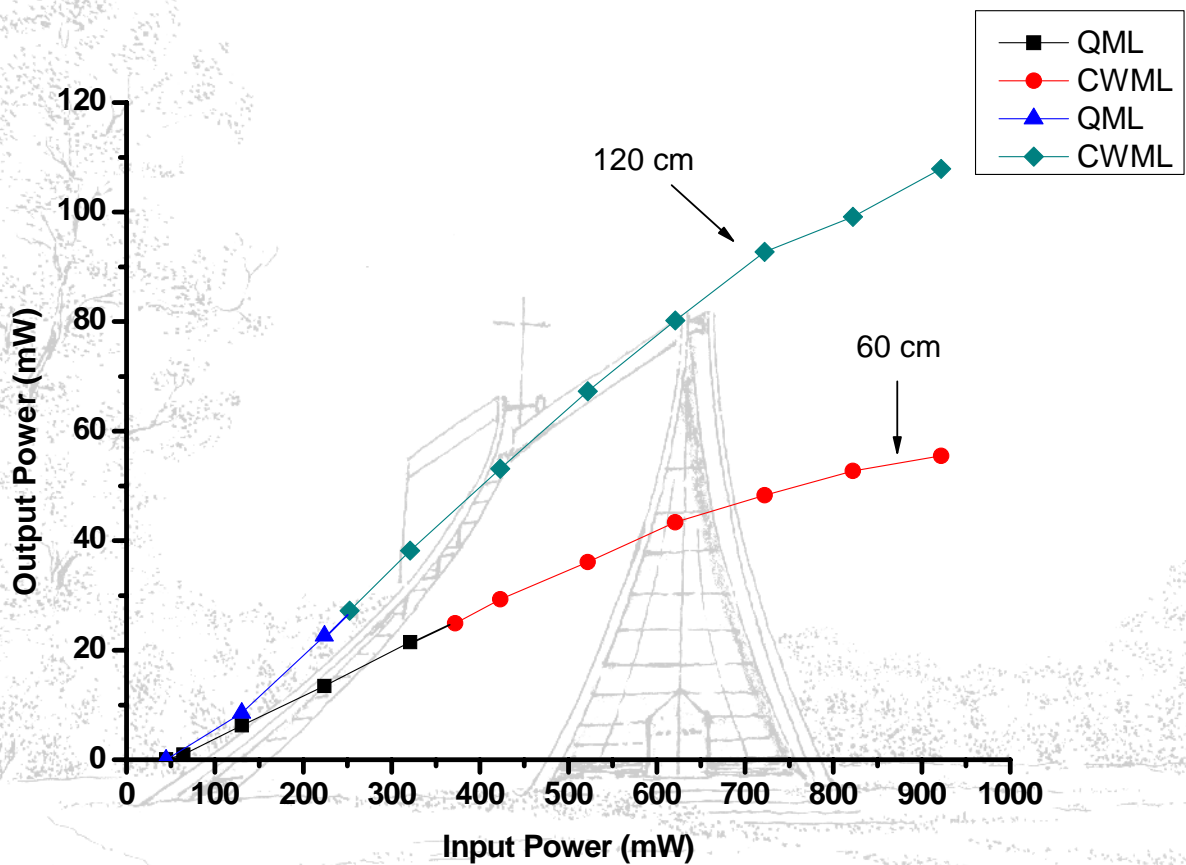


圖 4-1

圖 4-1 是用 2.5cm 焦距透鏡在不同腔長下的實驗結果，可以看出較長的腔長有較低的連續波鎖模閾值，這與前面長腔較易連續波鎖模之理論也吻合，並且 120cm 腔長的最佳輸出功率也大大於 60cm 腔長，而 60cm 腔長末端的輸出功率有較明顯的飽和現象。

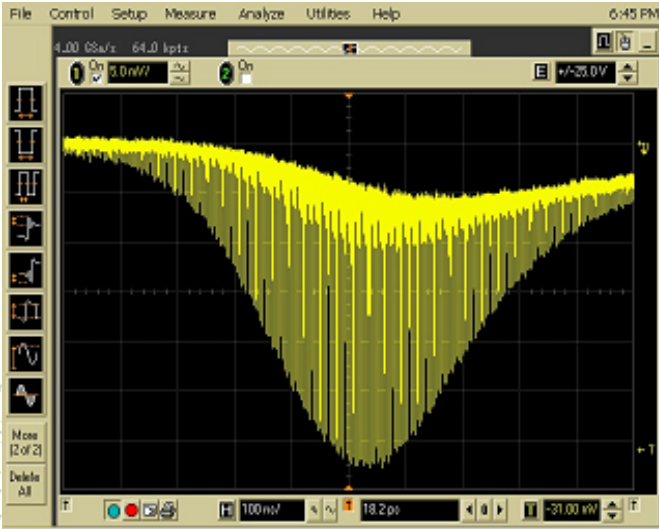


圖 4-2

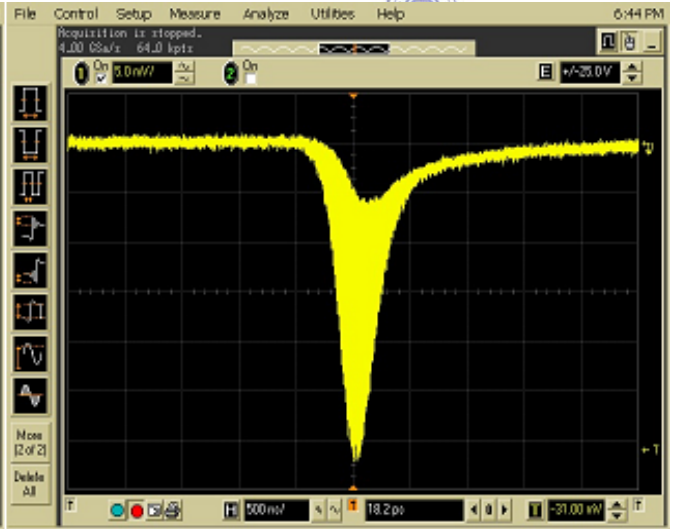


圖 4-3

圖 4-2、4-3 是用焦距 2.5cm 透鏡在 60cm 腔長下，從示波器觀察到的 Q 開鎖模，圖 4-2 的橫軸單位是 100ns，圖 4-3 的橫軸單位是 500ns，此時輸入功率 321mW。

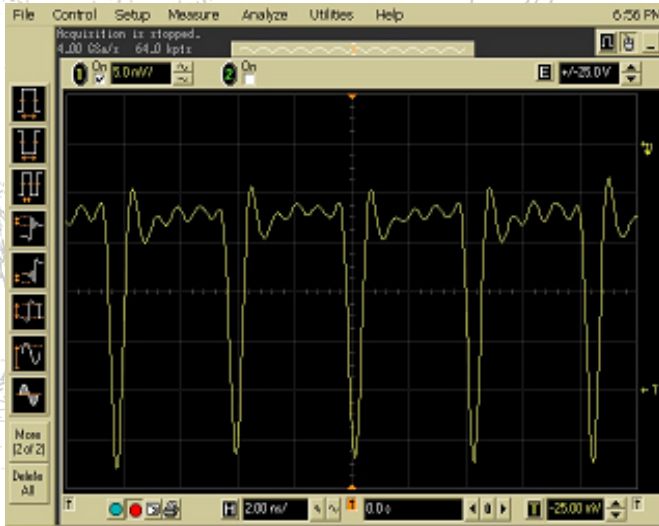


圖 4-4

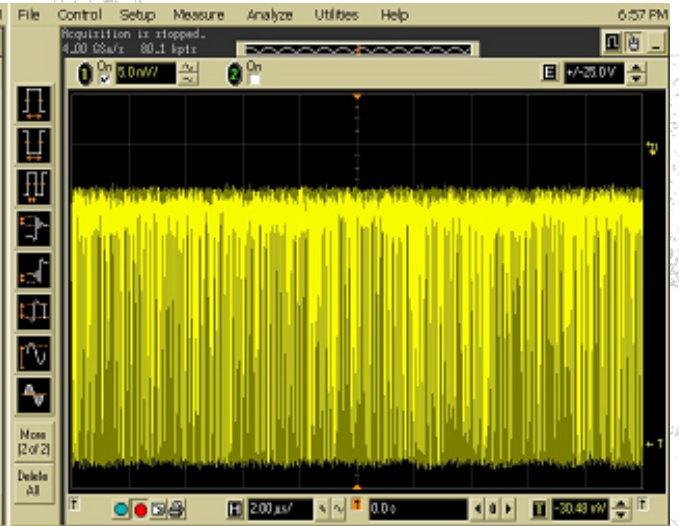


圖 4-5

圖 4-4、4-5 是用焦距 2.5cm 透鏡在 60cm 腔長下，從示波器觀察到的連續波鎖模，圖 4-4 的橫軸單位是 2ns，圖 4-5 的橫軸單位是 2 μ s，此時輸入功率 822mW。

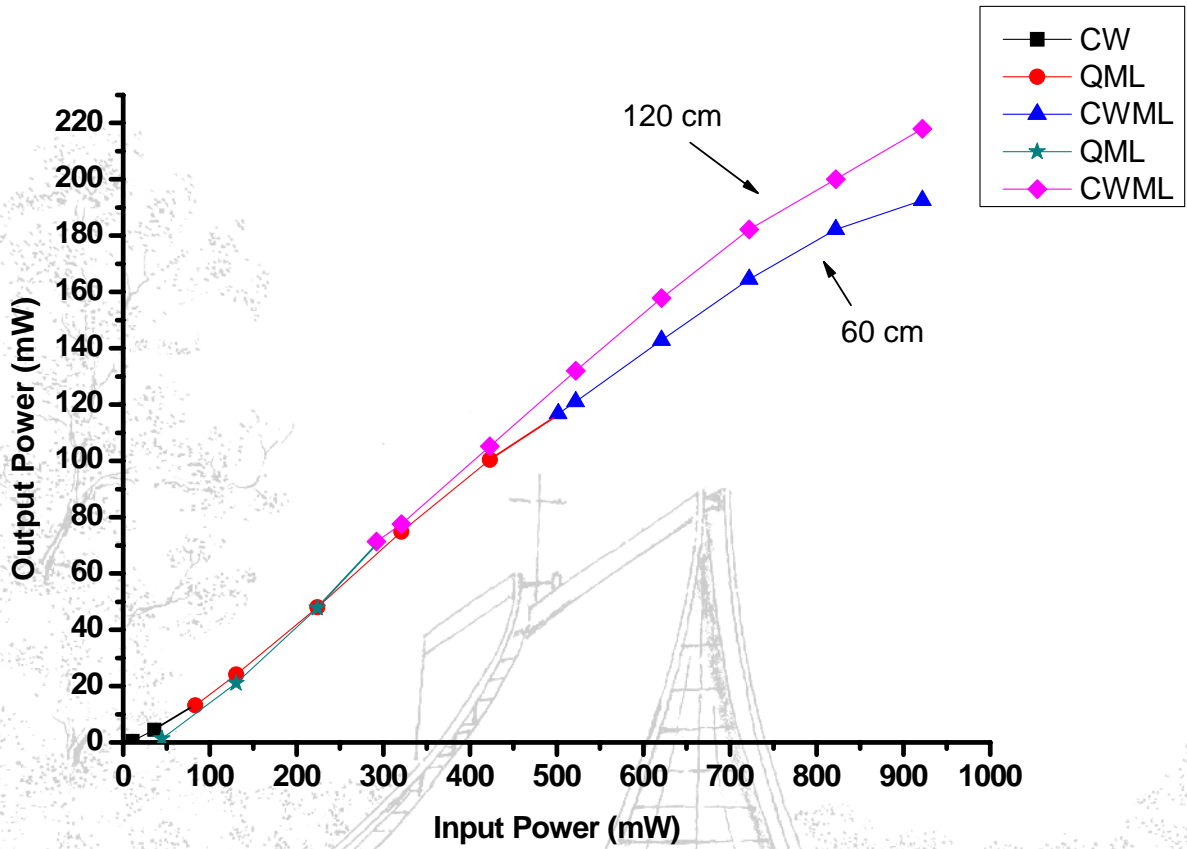


圖 4-6

圖 4-6 是用 7.5cm 焦距透鏡在 60cm 以及 120cm 腔長下的結果，我們可以看到長腔的連續波鎖模依然最低，並且它的最佳輸出功率也較 60cm 腔長的高，而在 60cm 腔長輸出功率的末端飽和較為明顯。

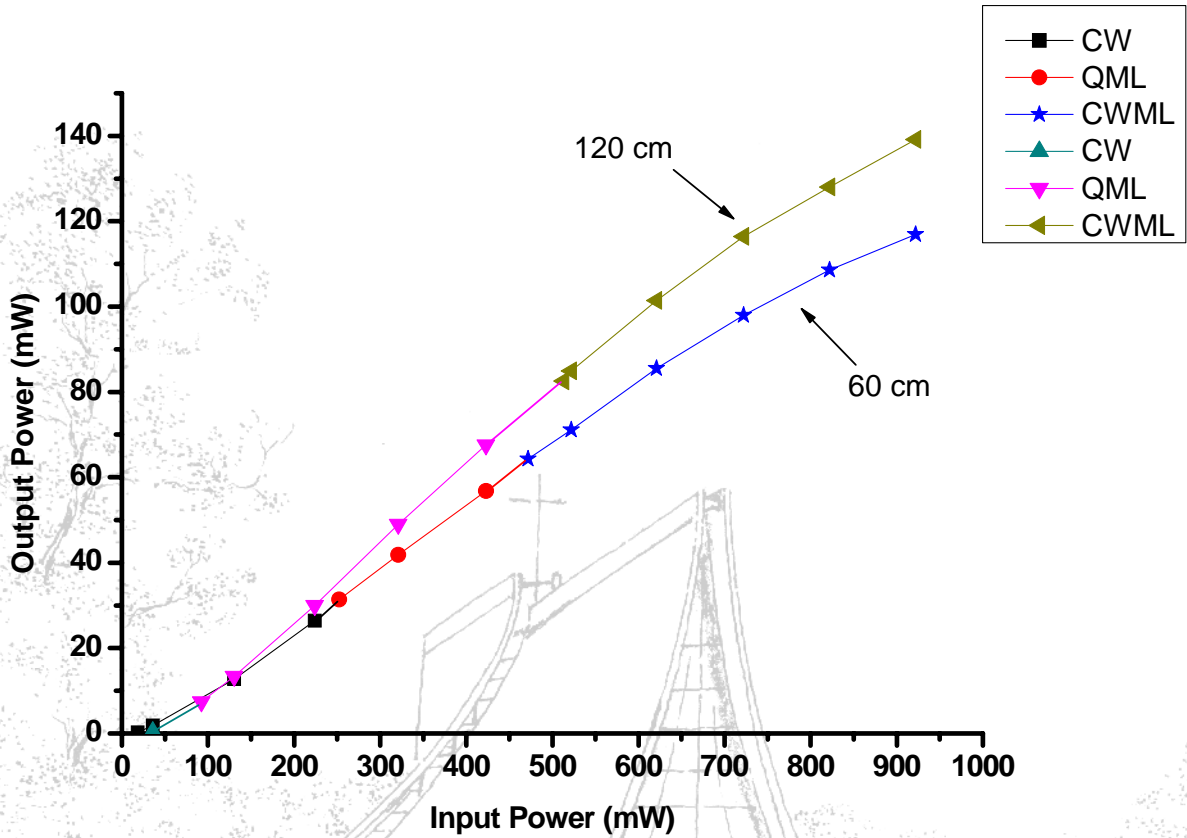


圖 4-7

圖 4-7 是用 10cm 焦距透鏡在 60cm 以及 120cm 腔長下的結果，而在這張圖表看來 120cm 腔長並沒有最較低的閾值，顯然在以找尋最佳輸出功率的情況下，腔長並不是造成低閾值的唯一原因，由理論可知還有與照射在晶體以及飽和吸收鏡上(SOC)的光點有關，這邊我們相信光點大小會是影響較大的主因，但 120cm 腔長的最佳輸出功率也還是較 60cm 腔長的高，而在 60cm 腔長輸出功率的末端飽和也依然較為明顯。

4-2 相同腔長下不同焦距透鏡之影響

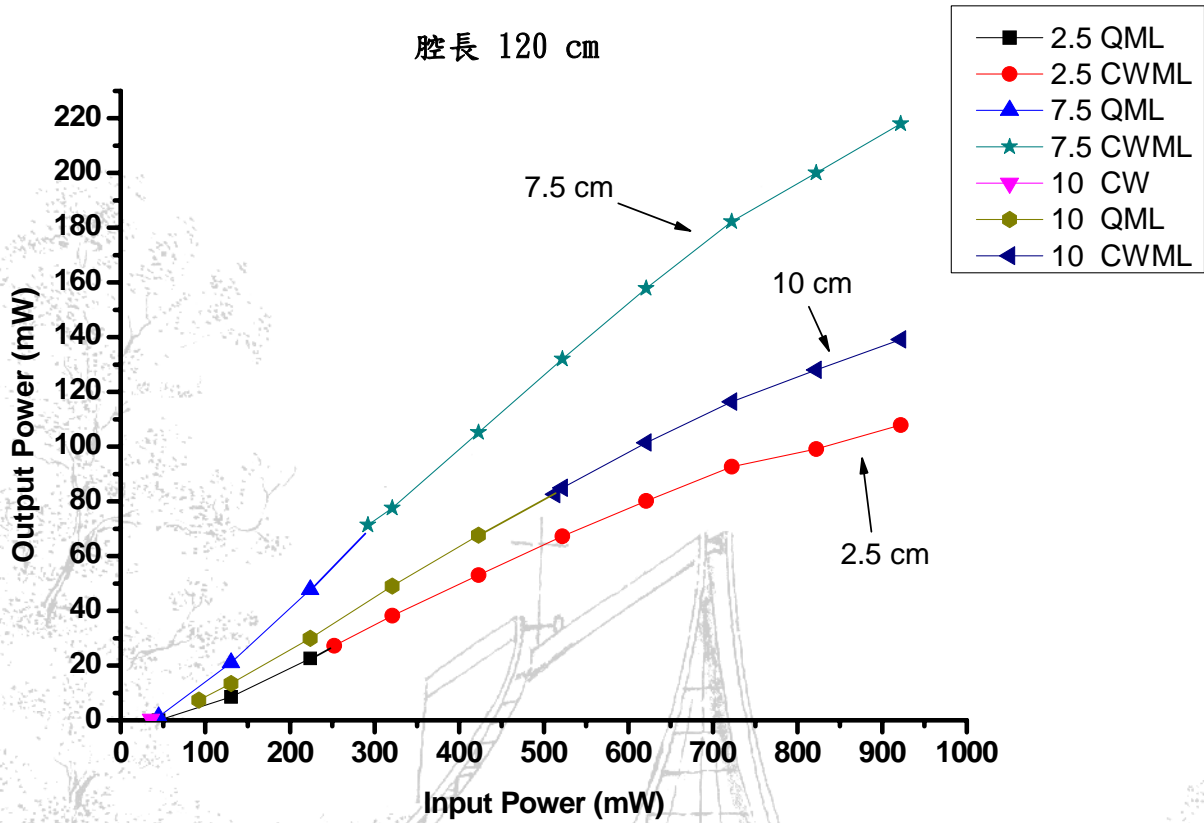


圖 4-8

圖 4-8 是在 120 cm 腔長不同焦距透鏡的實驗結果，可以看到焦距 7.5cm 的透鏡擁有最高的最大輸出功率，並且幾乎飽和現象不是很明顯，一般我們認為用較大焦距的透鏡應該能獲得較大的輸出功率，由於大焦距透鏡所聚焦的光點會比較大，可以從 Nd:GdVO₄ 得到較大的增益，然而此處結果顯示反而是焦距 7.5 的透鏡有最大之輸出功率，之後才是焦距 10cm 的透鏡，最後是焦距 2.5cm 透鏡。

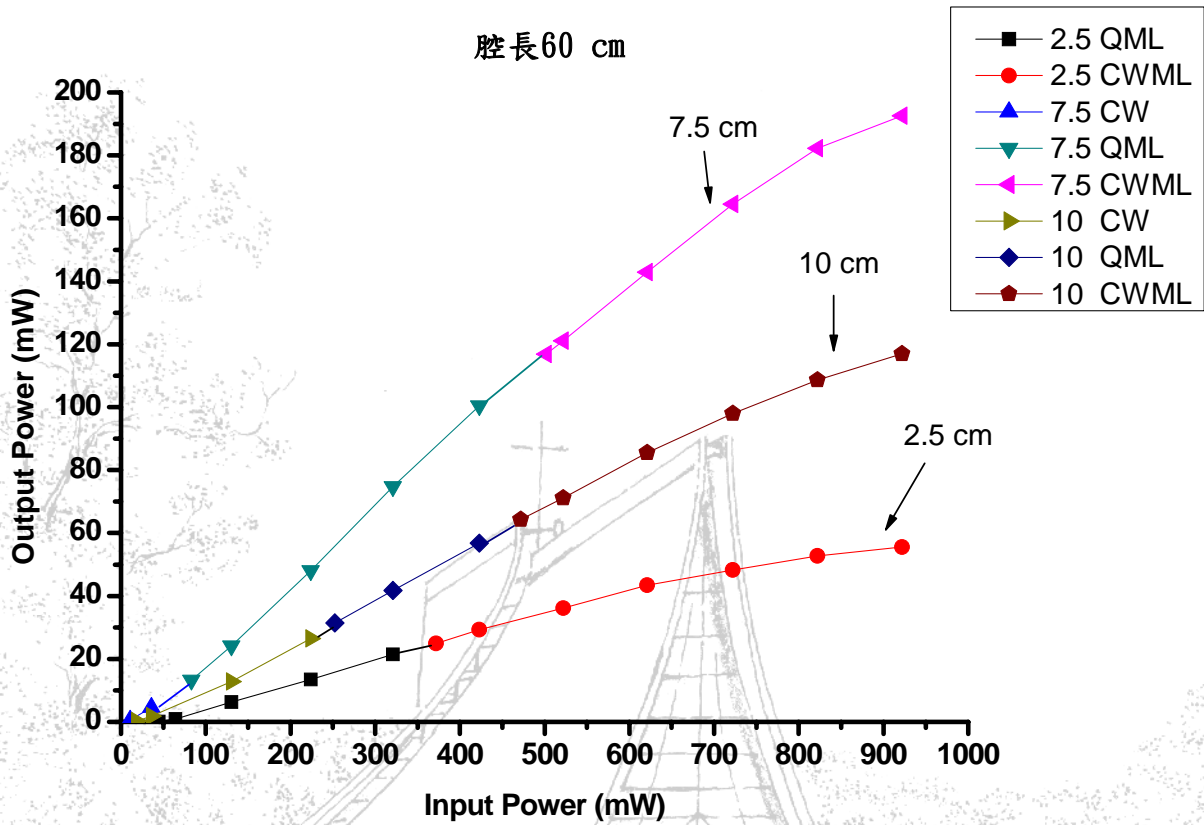


圖 4-9

圖 4-9 是在 60 cm 腔長不同焦距透鏡的實驗結果，可以看到焦距 7.5cm 的透鏡一樣擁有最高的最大輸出功率，並且飽和現象並無太明顯，焦距 2.5cm 透鏡之輸出功率為最低，其次為焦距 10cm 的透鏡，這點和 120cm 腔長的結果是一致的。

4-3 激發光束分佈對連續波鎖模雷射之影響

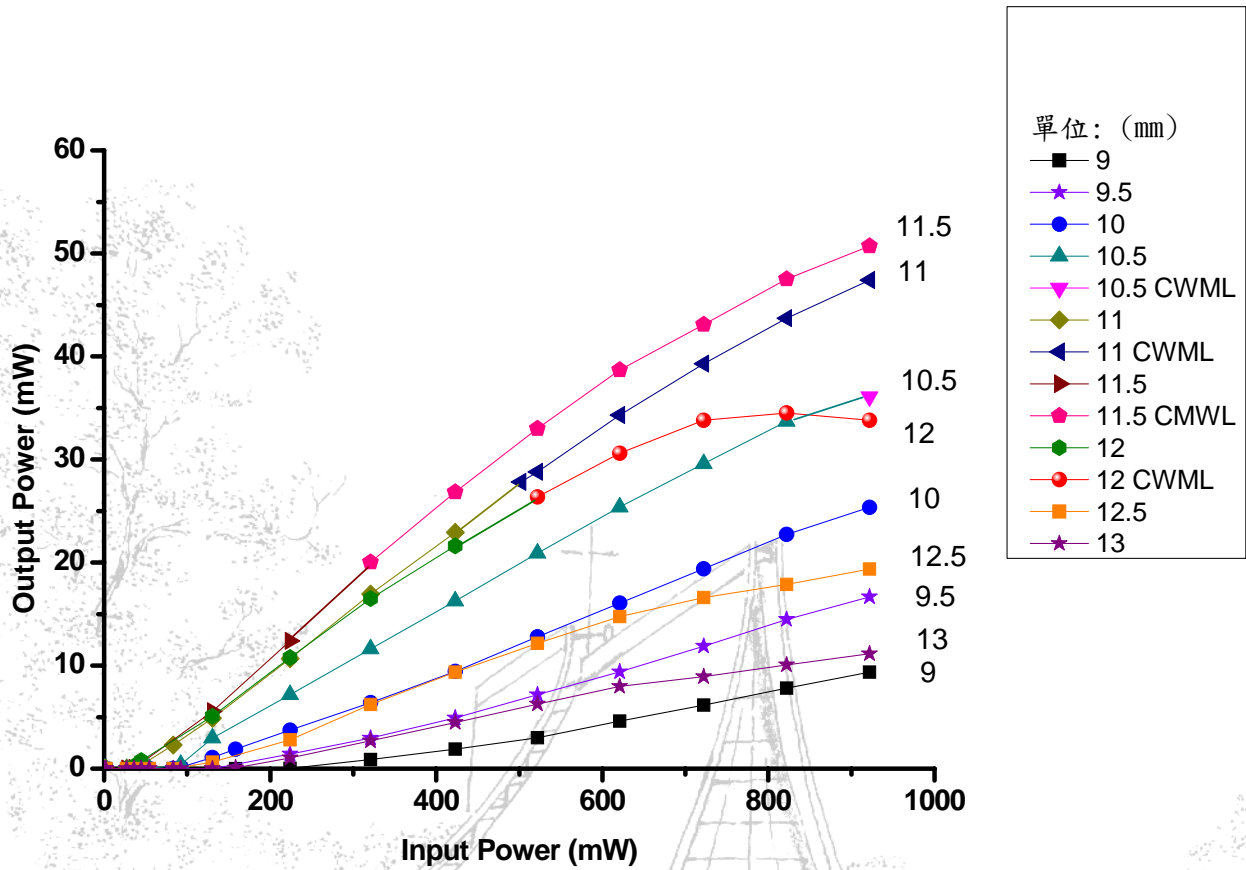


圖 4-10

圖 4-10 是我們使用物鏡及腔內焦距 2.5cm 透鏡在 60cm 腔長所作對於激發光束大小(pump spot size)對連續波鎖模(CWML)雷射影響的實驗，一開始我們找到最佳的連續波鎖模位置是在晶體前的透鏡位於平移台尺標 11.5mm 處，此時 CWML 開始發生於輸入功率為 321mW 以上，而一開始 Lasing 即是 Q 開關鎖模(QSML)，之後我們以每次 0.5mm 為範圍上下調動尺標，數字越大代表透鏡離雷射晶體越遠，從上圖可看出 11.5mm 時的輸出功率最大，而在 12mm 以上末端輸出功率飽和明顯，以 11.5mm 為中心往上或往下輸出功率依序下降，這應當是由於 11.5mm 時在晶體內的光束分佈剛好使其

增益最大，其中出現連續波鎖模的只有 10.5mm、11mm、11.5mm 以及 12mm 這四處。

由第二章理論我們可知，聚在雷射晶體上的光點要小，才能讓連續波鎖模的臨界下降而易於產生，因此我們可知大於 12mm，小於 10.5mm 的光點過於大，導致連續波鎖模難以產生，而造成雷射一激發都是 Q 開關鎖模。

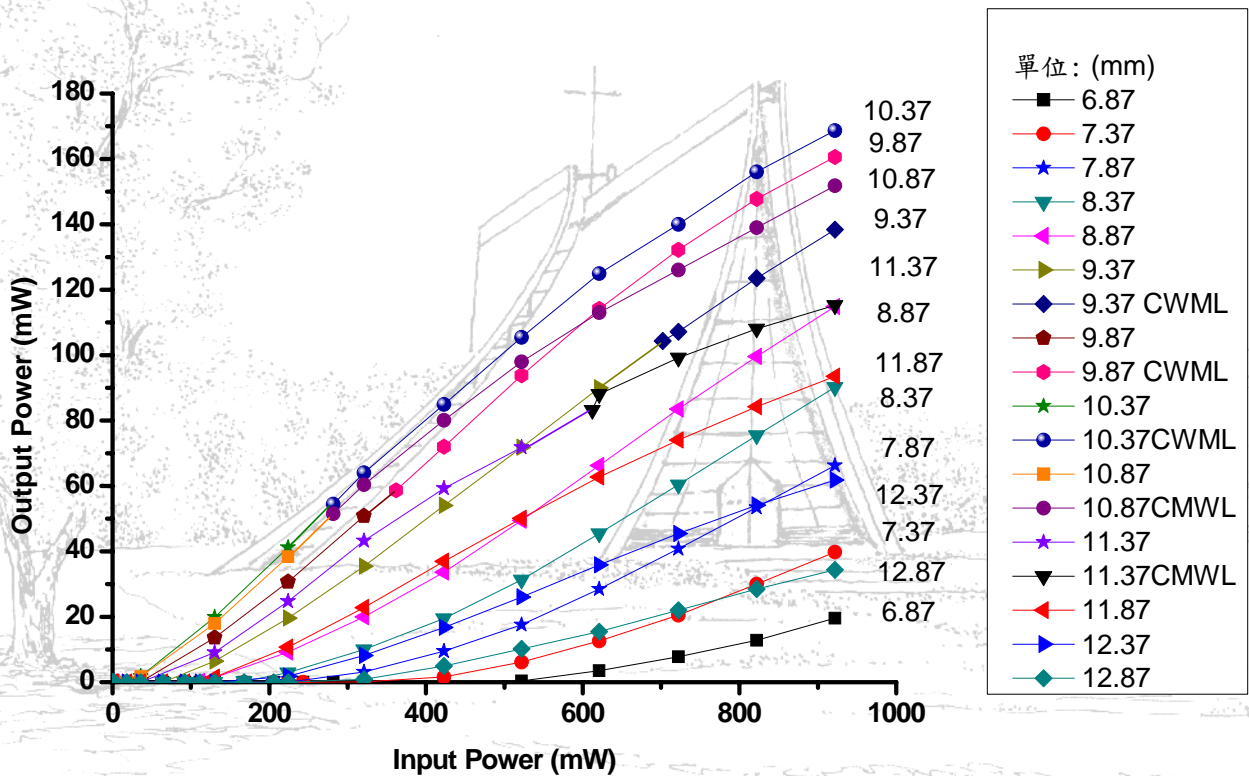


圖 4-11

圖 4-11 是我們使用物鏡焦距 2.5cm 及腔內兩焦距 7.5cm 透鏡在 120cm 腔長所作對於激發光束大小對連續波鎖模(CWML)雷射影響的實驗，我們一開始是在物鏡位於尺標 10.37mm 的位置有一最大輸出功率的連續波



鎖模，此時 CWML 開始發生於輸入功率為 281.5mW 以上，之後我們以每次 0.5mm 為範圍上下調動尺標，數字越大代表透鏡離雷射晶體越遠，反之越近，以 10.37mm 為中心往上或往下輸出功率依序下降，其中出現連續波鎖模的只有 9.37mm、9.87mm、10.37mm、10.87mm 以及 11.37mm 這五處。

由此數據圖可看出與上面使用兩透鏡焦距 2.5cm 在 60cm 腔長的結果相似，而多了一處有 CWML，結合理論來看應該是由於使用 7.5cm 的焦距透鏡之腔內功率較大(斜效率為較好)，使得 CWML 易於產生，即使光點較小所能獲得之腔內功率仍然大於臨界功率，而能產生 CWML。

4-4 實驗結果與討論

我們在找最大的輸出功率實驗中發現，長腔的輸出功率無論何種焦距的透鏡都較短腔大，並且短腔在高輸入功率時都有較明顯的飽和現象，另外，一般認為長焦距透鏡能獲得較大的輸出功率，但我們的實驗結果顯示，使用焦距 7.5 公分之透鏡能獲得比 2.5 公分以及 10 公分的透鏡還要大的最大平均輸出功率。

在激發光束大小對連續波鎖模雷射影響的實驗中，我們可以確認得知光點小能獲得較高的平均輸出功率，而且有較大的腔內功率也容易產生連續波鎖模(CWML)，並且透鏡遠離雷射晶體易造成飽和的現象。

第五章 結論與未來展望



5.1 結論：

我們成功的在 73.6mW 的低幫浦功率之下獲得連續波被動鎖模並可長時間穩定運作，輸出功率為 6mW，共振腔採用四鏡式直腔，用兩個透鏡和兩個面鏡，兩個透鏡的焦距同為 10 公分的，此時腔長是 120 公分，雷射晶體是摻釹釷酸釷(Nd:GdVO₄)晶體(4×4×8mm)，摻釹量為 0.5%。和一個飽和吸收輸出耦合鏡(SOC)，其飽合吸收為 2%，調制深度 1.2%，透射率 2.1%，二極體雷射溫度控制在 19.8°C。另外，在 922mW 的輸入功率下，獲得 218mW 的最大平均輸出功率，此時腔長為 120 公分，使用的兩個透鏡焦距同為 7.5 公分。

我們使用自相關干涉儀，在 120cm 腔長下用兩焦距同為 10cm 的透鏡，輸入功率是 722mW，輸出功率 87mW 此時是連續波鎖模，脈衝寬度為 7.4 ps，峰值功率 94.05W。

我們將實驗分為兩大部分，一是以找到最低的連續波鎖模閾值為目標，另一目標則是找出最大輸出功率。實驗中我們在同一透鏡下改變不同腔長從 60 公分，120 公分；另外則是固定腔長來探討不同焦距(2.5cm、7.5cm、10cm)的透鏡會有怎樣的影響。

在找最低連續波鎖模閾值的實驗中，觀察到在不同腔長時，腔長越長越可抑制 Q 開關鎖模，而有利於產生連續波鎖模，這點與第二章的理論十分吻合，但我們發現在使用 10cm 焦距的透鏡時，不管是在 60cm 還是 120cm 腔長並沒有 Q 開關鎖模，雷射激發後增加輸入功率都是直接從連續波變成連續波鎖模(CWML)，我們認為這是由於連續波鎖模的閾值太接近雷射產生



的閾值，導致中間原本會產生的 Q 開關鎖模遭到抑制而直接出現連續波鎖模(CWML)。此外，在同樣腔長下，使用焦距 10cm 的透鏡連續波鎖模(CWML)的閾值低於焦距 7.5cm 透鏡的，焦距 7.5cm 透鏡連續波鎖模(CWML)閾值則低於焦距 2.5cm 透鏡的。

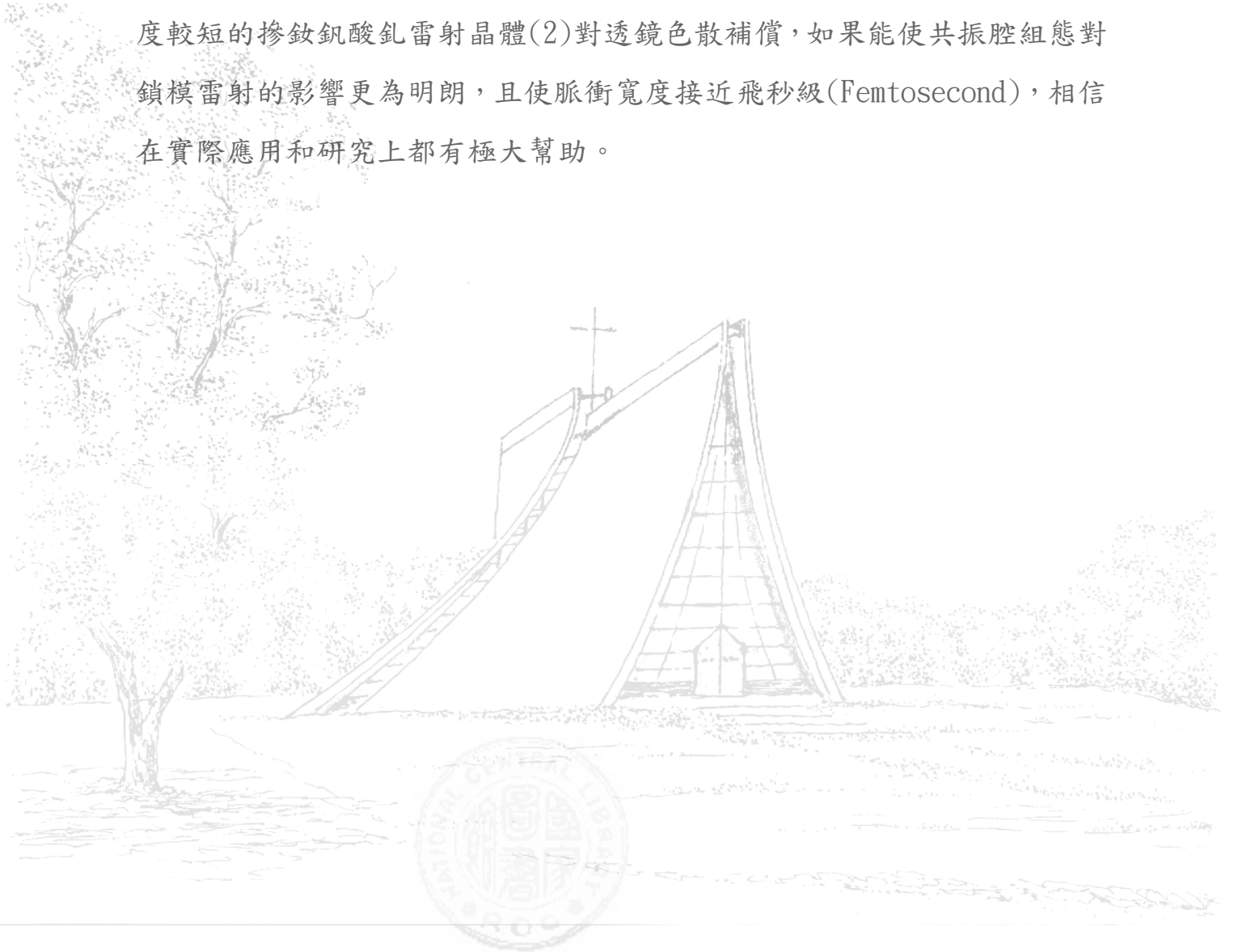
而在找尋最佳輸出功率的實驗中，不論是用何種焦距的透鏡，都觀察到 60cm 腔長在高輸出功率下飽和狀況較 120cm 腔長明顯，並發現長焦距的透鏡有利於增加輸出功率，這是因為長焦距透鏡所聚焦的光點較大，因此可從增益介質獲得較大的增益體積，焦距 10cm 的透鏡輸出功率確實大於 2.5cm，然而，最大的輸出功率卻發生在使用 7.5cm 透鏡的時候，不論是在 60cm 還是 120cm 的共振腔長下皆如此。

而由理論分析和我們的實驗結果顯示，影響此系統鎖模的因素有：SOC 本身的性質，如調制深度、腔長內的往返時間、非飽和損失與飽和恢復時間等等。與雷射晶體(增益介質)的性質有關，如增益截面和上能階生命期等等。要易於產生被動連續波鎖模雷射，飽和吸收輸出耦合鏡(SOC)上的功率密度要夠高，長腔可抑制 Q 開關鎖模，共振腔的調制及輸出光點要為良好的圓形，飽和吸收輸出耦合鏡(SOC)前的透鏡聚焦在 SOC 上的光點要小。

和其他被動鎖模的實驗結果相較之下，我們在極低的幫浦功率下達成連續波被動鎖模，並且在輸入功率接近 1W 下，有 200 多 mW 的高功率輸出，而且架設構造簡單。

5.2 未來工作與展望

我們已成功地用極低的功率在二極體摻釹鈮酸釷雷射達成連續波被動鎖模，並且找到最佳輸出功率的情況，未來希望更深入研究晶體前激發光束分佈對連續波鎖模之影響，且縮短脈衝寬度，可行方法有兩個，(1)換長度較短的摻釹鈮酸釷雷射晶體(2)對透鏡色散補償，如果能使共振腔組態對鎖模雷射的影響更為明朗，且使脈衝寬度接近飛秒級(Femtosecond)，相信在實際應用和研究上都有極大幫助。



參考文獻

- [1] U. Keller et al., Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers: an A-FPSA . Opt Lett, 1992,17(7):505~507
- [2] R. Fluck et al. , Diode-pumped passively mode-locked 1.3 μ m Nd:YVO₄ and Nd:YLF lasers by use of semiconductor absorbers , Opt Lett , 1996,21(17):1378~1380
- [3] B. Braun et al., 56ps passively Q-switched diode-pumped microchip laser. Opt Lett , 1997,22(6):381~383
- [4] Bingyuan Zhang et al., Passively mode locking of a diode-end-pumped Nd:GdVO₄ laser with a semiconductor saturable absorber mirror ,Opt Lett ,2003,28:1829-1831
- [5] Sanjun Zhang et al., Passively mode locking of a diode-end-pumped Nd:GdVO₄ laser with a semiconductor saturable absorber mirror,Opt Lett,2004,40:505~508
- [6] Bingyuan Zhang et al., Passive mode locking of diode-end-pumped Nd:GdVO₄ laser with an In_{0.25}Ga_{0.75}As output coupler , Opt. Commun. , 2005 , 244:311-314
- [7] A. I. Zagumennyi, V. G. Ostroumov, I. A. Shcherbakov et al., The Nd:GdVO₄ crystal : a new material for diode-pumped lasers , Sov. J. Quantum Electron. 22 , 1071(1992).
- [8] D.N.Papadopoulos et al., Passively mode-locked diode-pumped Nd:YVO₄ oscillator operating at an ultralow repetition rate, Opt Lett,2003,28:1838-1840



- [9] G.J.Spuhler et al., Output-coupling semiconductor saturable absorber, APPLIED PHYSICS LETTERS 2001,2733-2735
- [10] HERMANN A.HAUS et al... Parameter Ranges for CW Passive Mode Locking. IEEE J. Quantum Electronics, Vol.QE-12 March 1976
- [11] Shu Namiki et al.. Energy rate equations for mode-locked lasers . **J. Opt . Soc . Am .B** ,2099-2111(1997).
- [12] 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
- [13] U. Keller et al. ,Passively mode-locked high-power Nd:YAG lasers. with multiple laser heads., Applied physic B 2000,71:19-25
- [14] 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)

附錄 1:

掺钕钒酸钷晶体(Nd:GdVO₄)参数:

大小:4x4x8 mm

Nd doped :0.5%

Crystal structure	Tetragona
Space Group	I4 ₁ /amd
Lattice paramete	a=0.721nm, b=0.635nm
Lasing Transition	⁴ F _{3/2} ⁴ I _{11/2}
Lasing wavelength	1062.9nm
Emission Cross Section (at 1064nm)	7.6x10 ⁻¹⁹ cm ²
Absorption Cross Section (at 808nm)	4.9x10 ⁻¹⁹ cm ²
Absorption Coefficient (at 808nm)	74cm ⁻¹
Index of Refractivity (at 1064nm)	n ₀ =1.972, n _e =2.192
Thermal Conductivity (<110>)	11.7W/(mxK)
Density	5.47g/cm ³

Crystal	Nd:GdVO₄
Laser wavelengths	1062.9nm-1340nm
Emission bandwidth (linewidth at 1064nm)	No dara
Effective laser cross section (emission cross section at 1064nm)	7.6x10 ⁻¹⁹ cm ⁻²
Polarization	Parallel to c-axis
Radioactive lifetime (microseconds) at 1% Nd doping	-95μs
Pump wavelength	808.4nm
Peak pump absorption at 1% doping	-57 cm ⁻¹
Thermal conductivity, W/nK	11.7
Doping concentration range	0.1-3.0%

附錄 2:

半導體飽和吸收輸出耦合鏡(SOC)的參數:

Chip area : 5mm × 5mm

Chip thickness 400 μm ; semi-insulating GaAs

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 μJ/cm²

Relaxation time constant $t \leq 10 \text{ ps}$

附錄 3:

1.5 W 半導體雷射 輸入電流 VS 輸出功率表：

