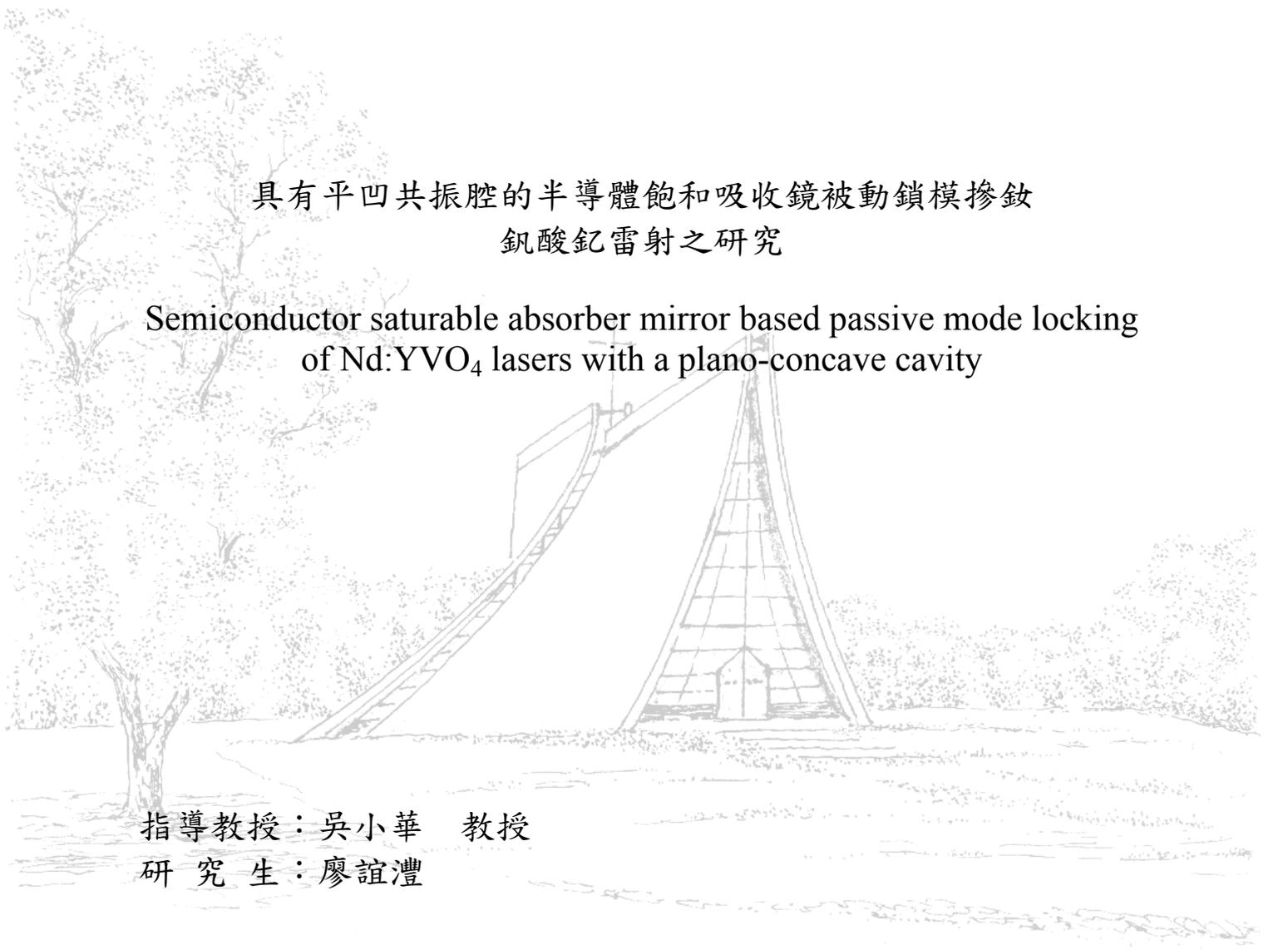


東海大學物理學系 碩士論文

具有平凹共振腔的半導體飽和吸收鏡被動鎖模摻釹
釩酸釷雷射之研究

Semiconductor saturable absorber mirror based passive mode locking
of Nd:YVO₄ lasers with a plano-concave cavity



指導教授：吳小華 教授
研究生：廖誼澧

中華民國一百年七月二十七日

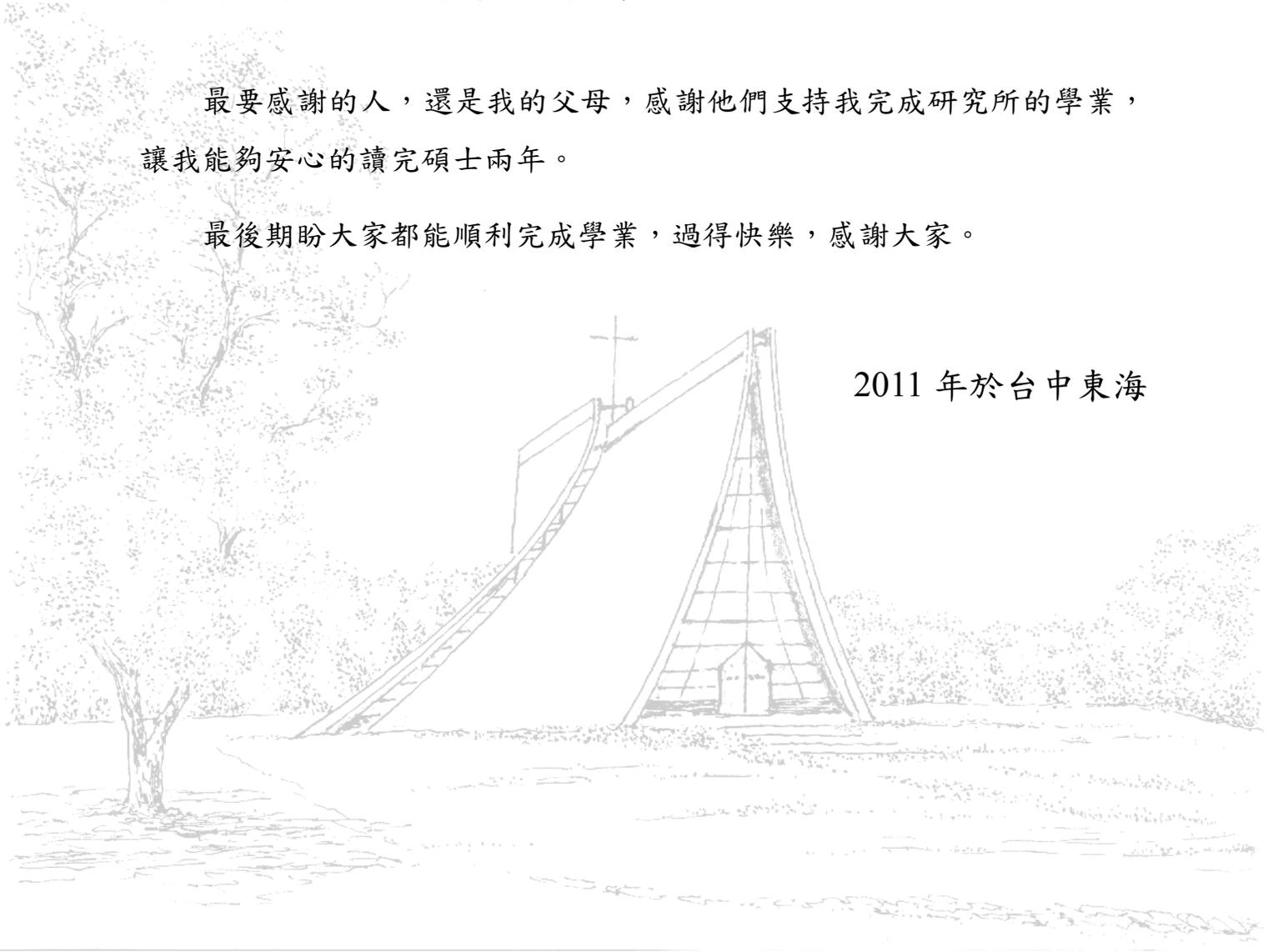
誌謝

這篇論文能夠完成，首先一定先要感謝吳小華老師這兩年的指導，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。尤其是實驗部份，讓我學會許多儀器的操作。不過我更希望解決問題的能力能加強，這是我目前更要學習。

最要感謝的人，還是我的父母，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。

2011 年於台中東海



中文摘要

本論文探討以半導體飽和吸收鏡(SESAM)和平凹共振腔來進行被動鎖模摻釹釩酸鈮(Nd:YVO_4)雷射之研究。使用兩種雷射晶體，一種是薄的 Nd:YVO_4 (1mm 厚度)和另外一種是厚的(4mm 厚度)。在薄的雷射晶體，發現有兩種不一樣的操作狀態，一種為多脈衝雷射，一種為單脈衝雷射。在比較小的傾斜角度下的雷射晶體，輸出為多脈衝連續波鎖模可得到重覆率為 500MHz，脈衝的寬度為 4 ps，和輸入功率為 780mW 下可獲得輸出功率為 230mW。當傾斜角度慢慢增加，輸出為單脈衝連續波鎖模可得到脈衝的寬度為 9.2ps，和輸入功率為 780mW 下可獲得輸出功率為 205mW。

我們也使用 Nd:YVO_4 (厚的)為雷射晶體，改變共振腔的腔長，腔長改變從 80 公分到 5 公分，在不同的腔長下，都可以產生連續波鎖模。對應的重覆頻率介於 185MHz 和 2.5 GHz 之間，脈衝寬度為 8.5 ps 和 14.7 ps 之間。

Abstract

This thesis investigates passive mode-locking of Nd: YVO₄ lasers by using the semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) and a plano-concave cavity. Two kinds of laser crystals are used. One is a thin Nd: YVO₄ (1 mm in thickness) crystal and another is thick one (4 mm in thickness). For the thin laser crystal, there are two states of output which are characterized in multiple-pulse and single-pulse operations. At small tilt angle of laser crystal, multiple-pulse continuous wave mode-locked output is observed with the repetition rate of 500 MHz, pulse width of 4 ps, and output power of 230 mW under pump power of 780mW. By increasing the tilt angle, single-pulse continuous wave mode-locked output can be obtained with the pulse width of 9.2 ps and output power of 205mW at the same conditions as multiple-pulse case.

For the thick Nd: YVO₄ crystal, single-pulse continuous wave mode-locked output can be obtained with cavity lengths between 80 cm and 5 cm corresponding to the repetition rates between 185 MHz and 2.5 GHz. The pulse width obtained is between 8.5 ps and 14.7 ps.

目錄

誌謝	-----	i
中文摘要	-----	ii
英文摘要	-----	iii
目錄	-----	iv
圖表目錄	-----	vi
第一章	緒論	-----1
第二章	理論	-----5
2.1	穩定連續波鎖模之條件	-----5
2.2	共振腔內光點大小之計算	-----12
第三章	平行平板雷射晶體的被動鎖模	-----18
3.1	實驗架構與方法	-----19
3.2	飽和吸收鏡為 $A_0=2\%$ 的鎖模	-----23
3.3	多脈衝雷射	-----23
3.4	單脈衝雷射	-----27
3.4.1	$\theta=20$ 度的單脈衝雷射	-----27
3.4.2	$\theta=30$ 度的單脈衝雷射	-----31
3.5	實驗結果與討論	-----34
第四章	楔形平板雷射晶體的被動鎖模	-----36
4.1	實驗架構	-----36
4.2	飽和吸收鏡為 $A_0=0.5\%$ 的鎖模	-----38
4.2.1	曲率半徑為 80 公分的鎖模	-----38
4.2.2	曲率半徑為 50 公分的鎖模	-----41
4.2.3	曲率半徑為 30 公分的鎖模	-----44
4.2.4	曲率半徑為 15 公分的鎖模	-----48
4.2.5	曲率半徑為 10 公分的鎖模	-----50
4.2.6	曲率半徑為 8 公分的鎖模	-----52
4.2.7	曲率半徑為 5 公分的鎖模	-----54
4.3	飽和吸收鏡為 $A_0=2\%$ 的鎖模	-----56
4.3.1	曲率半徑為 80 公分的位置	-----56
4.3.2	曲率半徑為 50 公分的位置	-----56
4.3.3	曲率半徑為 30 公分的位置	-----60
4.4	實驗結果與討論	-----63
第五章	結論與未來展望	-----66
5.1	結論	-----66
5.2	未來展望	-----68



參考文獻	-----	69
附錄一	-----	70
附錄二	-----	71



圖表目錄

圖 2-1	連續波鎖模及 Q 開關鎖模-----	5
圖 2-2-1	雷射晶體以及曲率半徑為 R 的凹面鏡所組成的圖-----	12
圖 2-2-2	曲率半徑固定為 30 公分，在雷射晶體和半導體飽和吸收鏡以及輸出耦合鏡上光點大小之關係圖-----	16
圖 2-2-3	光束半徑對不同腔長的之關係圖-----	16
圖 3-1	實驗裝置圖-----	19
圖 3-1-2	半導體雷射輸出功率與輸入電流的關係圖-----	21
圖 3-1-3	Nd:YVO ₄ (薄的)雷射晶體的輸出功率與輸入功率之關係 ---	22
圖 3-3-1	雷射晶體和半導體飽和吸收鏡 $\theta=15$ 度的輸出功率和輸入功率之關係圖-----	25
圖 3-3-2-(a)	雷射晶體和半導體飽和吸收鏡 $\theta=15$ 度，在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 5ns 所觀測之波形-----	25
圖 3-3-2-(b)	雷射晶體和半導體飽和吸收鏡 $\theta=15$ 度，在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 100 μ s 所觀測之波形-----	26
圖 3-3-3	雷射晶體和半導體飽和吸收鏡 $\theta=15$ 度，自相關干涉儀來量測鎖模脈衝的寬度，在輸入功率為 720 mW 的圖形 -----	26
圖 3-4-1-1	雷射晶體和半導體飽和吸收鏡 $\theta=20$ 度的輸出功率和輸入功率之關係圖-----	28
圖 3-4-1-2-(a)	雷射晶體和半導體飽和吸收鏡 $\theta=20$ 度，在輸入功率 320mW，示波器的橫軸為 5 μ s 所觀測之波形-----	29
圖 3-4-1-2-(b)	雷射晶體和半導體飽和吸收鏡 $\theta=20$ 度，在輸入功率 540mW，示波器的橫軸為 5 μ s 所觀測之波形-----	29
圖 3-4-1-2-(c)	雷射晶體和半導體飽和吸收鏡 $\theta=20$ 度，在輸入功率 800mW，示波器的橫軸為 5 μ s 所觀測之波形-----	30
圖 3-4-1-3	雷射晶體和半導體飽和吸收鏡 $\theta=20$ 度，自相關干涉儀來量測鎖模脈衝的寬度，在輸入功率為 800 mW 的圖形-----	30
圖 3-4-2-1	雷射晶體和半導體飽和吸收鏡 $\theta=30$ 度的輸出功率和輸入功率之關係圖-----	32
圖 3-4-2-2-(a)	雷射晶體和半導體飽和吸收鏡 $\theta=30$ 度，在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 20 μ s 所觀測之波形-----	32
圖 3-4-2-2-(b)	雷射晶體和半導體飽和吸收鏡 $\theta=30$ 度，在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 200 μ s 所觀測之波形-----	33
圖 3-4-2-3	雷射晶體和半導體飽和吸收鏡 $\theta=30$ 度，自相關干涉儀來量測鎖模脈衝的寬度，在輸入功率為 720 mW 的圖形-----	33
圖 3-5-1	Nd:YVO ₄ (薄的)雷射的結果表-----	35
圖 4-1	Nd:YVO ₄ (厚的) 實驗裝置圖-----	36

圖 4-2-1-1-(a)	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 80 公分，在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 5ns 所觀測之波形-----	40
圖 4-2-1-1-(b)	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 80 公分，在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 5 μ s 所觀測之波形-----	40
圖 4-2-1-2	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 80 公分，在輸入功率為 720 mW，射頻頻譜分析儀下脈衝圖-----	41
圖 4-2-1-3	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 80 公分，自相關干涉儀來量測鎖模脈衝的寬度，在輸入功率為 720 mW 的圖- -	41
圖 4-2-2-1-(a)	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 50 公分，在輸入功率為 480 mW，示波器的橫軸為 10 μ s 所觀測之波形 ---	42
圖 4-2-2-1-(b)	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 50 公分，在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 5 μ s 所觀測之波形 ----	43
圖 4-2-2-2	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 50 公分，在輸入功率為 720 mW，射頻頻譜分析儀下脈衝圖 -----	43
圖 4-2-2-3	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 50 公分，自相關干涉儀來量測鎖模脈衝的寬度，在輸入功率為 720 mW 的圖---	44
圖 4-2-3-1	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 30 公分，的輸出功率和輸入功率之關係圖-----	46
圖 4-2-3-2-(a)	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 30 公分，在輸入功率 375mW，示波器的橫軸為 10 μ s 所觀測之波形-----	46
圖 4-3-3-2-(b)	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 30 公分，在輸入功率 540mW，示波器的橫軸為 10 μ s 所觀測之波形-----	47
圖 4-3-3-2-(c)	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 30 公分，在輸入功率 720mW，示波器的橫軸為 5 μ s 所觀測之波形-----	47
圖 4-2-3-3	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 30 公分，在輸入功率為 720 mW，射頻頻譜分析儀下脈衝圖-----	48
圖 4-2-3-4	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 30 公分，自相關干涉儀來量測鎖模脈衝的寬度，在輸入功率為 720 mW 的圖 --	48
圖 4-2-4-1	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 15 公分，在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 20 μ s 所觀測之波形-----	49
圖 4-2-4-2	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 15 公分，在輸入功率為 720 mW，射頻頻譜分析儀下脈衝圖-----	50
圖 4-2-4-3	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 15 公分，自相關干涉儀來量測鎖模脈衝的寬度，在輸入功率為 720 mW 的圖----	50
圖 4-2-5-1	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 10 公分，在輸入功率為 720 mW，射頻頻譜分析儀下脈衝圖-----	52
圖 4-2-5-2	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 10 公分，自相關干涉儀來量測鎖模脈衝的寬度，在輸入功率為 720 mW 的圖 --	52
圖 4-2-6-1	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 8 公分，在輸入功率為	

	720 mW，射頻頻譜分析儀下脈衝圖-----	54
圖 4-2-6-2	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 8 公分，自相關干涉儀來量測鎖模脈衝的寬度，在輸入功率為 720 mW 的圖-----	54
圖 4-2-7-1	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 5 公分，在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 5 μ s 所觀測之波形-----	55
圖 4-2-7-2	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 5 公分，在輸入功率為 720 mW，射頻頻譜分析儀下脈衝-----	56
圖 4-2-7-3	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 5 公分，自相關干涉儀來量測鎖模脈衝的寬度，在輸入功率為 720 mW 的圖-----	56
圖 4-3-2-1-(a)	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，換飽和吸收鏡為 A ₀ =2% 的半導體飽和吸鏡，曲率半徑為 50 公分，在輸入功率為 540 mW，示波器的橫軸為 10 μ s 所觀測之波形-----	58
圖 4-3-2-1-(b)	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 50 公分，在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 5 μ s 所觀測之波形-----	59
圖 4-3-2-2	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 50 公分，在輸入功率為 720 mW，射頻頻譜分析儀下脈衝圖-----	59
圖 4-3-2-3	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 50 公分，自相關干涉儀來量測鎖模脈衝的寬度，在輸入功率為 540 mW 的圖----	60
圖 4-3-3-1	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 30 公分，在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 5 μ s 所觀測之波形-----	62
圖 4-3-2-2	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 30 公分，在輸入功率為 720 mW，射頻頻譜分析儀下脈衝圖-----	62
圖 4-3-3-3	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體，曲率半徑為 30 公分，自相關干涉儀來量測鎖模脈衝的寬度，在輸入功率為 720 mW 的圖----	63
圖表 4-4-1	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體和飽和吸收為 A ₀ =0.5%，在不同的腔長之結果表-----	65
圖表 4-4-2	Nd:YVO ₄ (厚的)雷射晶體和飽和吸收為 A ₀ =2%，在不同的腔長之結果表-----	66

雷射發展至今，固態雷射一直有快速的進展。在一九六〇年，由 T.H. Maiman 發明世界上第一台雷射器-紅寶石雷射。因此雷射技術和應用是非常重要的。

近年來，為了獲得較高的輸出功率，科學家們通常都採用脈衝雷射來進行實驗，更進一步來研究如何產生超短的脈衝雷射?因為短脈衝雷射的應用非常廣，如電信系統、通訊、光學時鐘、光轉換和粒子加速等等[1] [2]。

為了得到短脈衝雷射，我們常使用所謂鎖模(mode locking)的方法，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(acusto-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。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。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[3]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。

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。使用摻釹釩酸鈮(Nd:YVO₄) 其優良的性能中，包括穩定的化學和物理加工性、較低鐳射閾值、較大的受激發射截面、高斜率效率以及寬帶的泵浦光吸收效率，從而使得 Nd:YVO₄ 晶體得到了越來越廣泛的應用。

因此在 2009 年，T. Li 等人使用半導體雷射來激發 Nd:YVO₄ 雷射晶體，利用半導體飽和吸收鏡來獲得穩定的連續波鎖模，在輸入功率為 15 W 之下最大平均輸出功率為 2.06W，其脈衝寬度為 18 ps，峰值功率可達 1.14 KW [4]。在 2010 年，L. Sun 等人使用半導體雷射來激發 Nd:YVO₄ 雷射晶體，利用半導體飽和吸收鏡來獲得穩定的連續波鎖模，在輸入功率為 16 W 之下最大平均輸出功率為 4.76W，其脈衝寬度為 25 ps，峰值功率可達 2.4 KW [5]。

所以在上述實驗中由於半導體飽和吸收鏡在使用於端面鏡的緣故，在共振腔的兩端都為全反射鏡的情況下，使的雷射共振腔都是較複雜的四鏡

式以上的折疊腔，在操作上也困難許多。因為折疊腔中輸出光束會來自不同角度的反射鏡，而過多的反射鏡會使光產生像散的現象，也會造成輸出光束不唯一，及功率分散等缺點。若能改善這個缺失，就可利用不同曲率半徑的凹面鏡來改變共振腔的長度，以符合不同需求的重覆頻率。

在本論文中我們選用 Nd:YVO_4 為雷射晶體，因為摻釹鈮酸鈮較大的吸收截面和受激發射截面以及較寬的螢光譜線，較適合用在產生高功率的被動鎖模雷射[6] [7] [8]。半導體飽和吸收鏡做為反射鏡，部分反射的凹面鏡做為輸出耦合鏡，以二鏡式平凹共振腔來產生鎖模雷射。

本論文在第二章介紹使用半導體飽和吸收鏡來產生連續波鎖模雷射的理論，以及計算共振腔內的光點大小分佈。在第三章中，我們將探討在 Nd:YVO_4 (薄的)雷射晶體和半導體飽和吸收鏡，飽和吸收為 $A_0 = 2\%$ ，在不同的角度之下，所產生連續波鎖模(C-W mode-locking)。在第四章中，我們將探討在 Nd:YVO_4 (厚的)雷射晶體和半導體飽和吸收鏡，飽和吸收為 $A_0 = 0.5\%$ 和 $A_0 = 2\%$ ，在不同的之腔常下，所產生連續波鎖模。第五章將做總結和未來的展望。

下面我們要介紹的是使用半導體飽和吸收鏡來做被動鎖模，經常會產生 Q 開關鎖模(Q-switching mode locking)與連續波鎖模(continuous wave mode-locking)。

2-1 穩定連續波鎖模之條件

在這個章節,我們要介紹由 Kärtner 等人發展[9][10][11]，利用速率方程式來提出連續波鎖模的條。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，但是可以生較高峰值功率的脈衝。

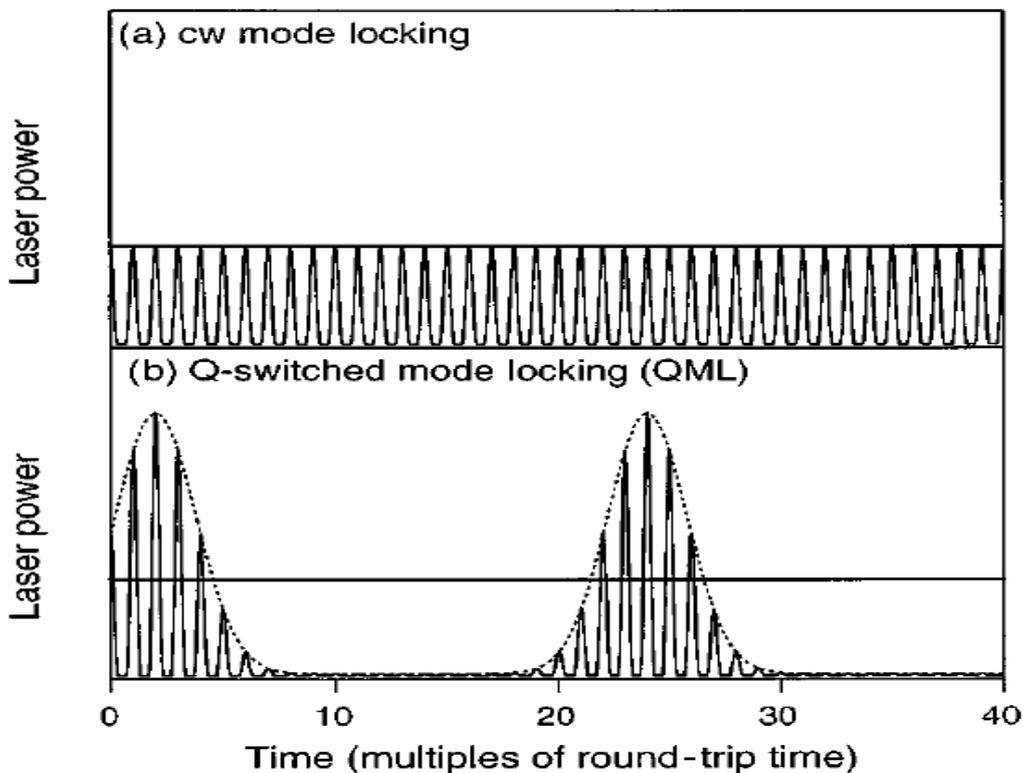


圖 2-1 連續波鎖模及 Q 開關鎖模

使用速率方程式出發，可獲得穩定連續波鎖模的條件：

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

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

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

P : 腔內平均功率 ; T_R : 腔內往返時間 ; E_p : 腔內鎖模脈衝能量

g : 與時間相關之腔內往返增益 ; g_0 : $P=0$ 時之 g

q : 與時間相關之腔內往返飽和吸收 ; q_0 : $P=0$ 時之 q

l : 腔內往返之線性損失 ; $E_{sat,A}$: 飽和吸收體之飽和能量

$E_{sat,L}$: 增益介質之飽和能量 ; τ_L : 雷射增益介質之上層能生命期

τ_A : 飽和吸收體之回復時間 ; $q_p(E_p)$: 脈衝每次往返之能量損失

其中 q_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[8]得下式

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

(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:

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

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：

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

其中

$$F_{p,A} = \frac{E_p}{A_{eff,A}}$$

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(2-15)式我們可以得到產生連續波鎖模之腔內臨界功率條件：

$$P > P_{th} \equiv \left(F_{sat,L} F_{sat,A} \Delta R A_{eff,L} A_{eff,A} \frac{1}{T_R^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-16)$$

$F_{sat,L}$: 雷射晶體之飽和增益通量 $A_{eff,L}$: 雷射晶體中之有效模面積

$F_{sat,A}$: 飽和吸收鏡之飽和吸收強度 $A_{eff,A}$: 飽和吸收鏡上之有效模面積

ΔR : 調制深度 T_R : 共振腔的往返時間

當腔內脈衝功率高於此臨界脈衝能量就可獲得連續波鎖模脈衝，而當腔內脈衝功率低於此臨界脈衝能量則可獲得 Q 開鎖模脈衝。

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。

以下是(2-16)式的參數：

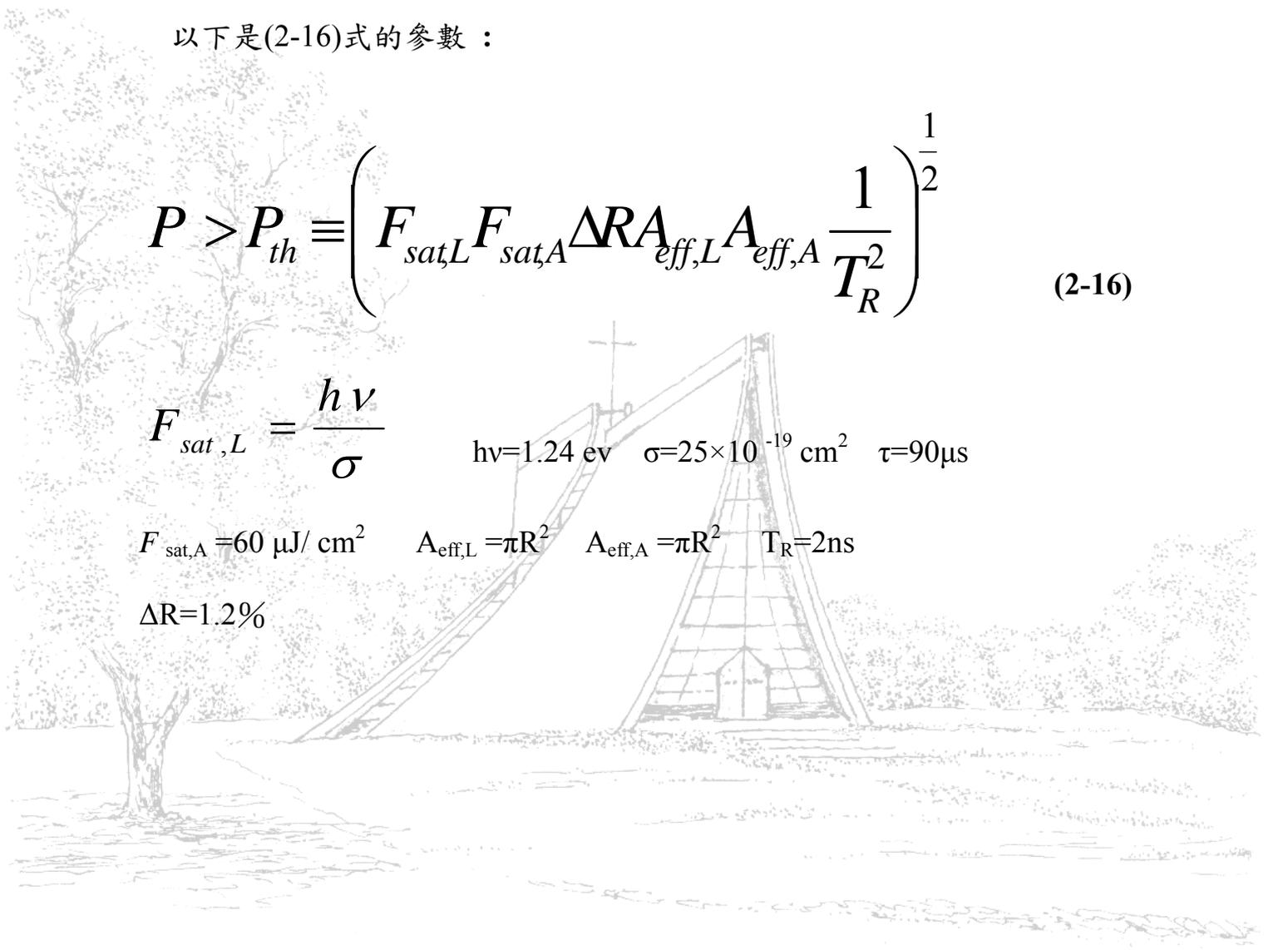
$$P > P_{th} \equiv \left(F_{sat,L} F_{sat,A} \Delta R A_{eff,L} A_{eff,A} \frac{1}{T_R^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-16)$$

$$F_{sat,L} = \frac{h\nu}{\sigma}$$

$$h\nu = 1.24 \text{ eV} \quad \sigma = 25 \times 10^{-19} \text{ cm}^2 \quad \tau = 90 \mu\text{s}$$

$$F_{sat,A} = 60 \mu\text{J}/\text{cm}^2 \quad A_{eff,L} = \pi R^2 \quad A_{eff,A} = \pi R^2 \quad T_R = 2 \text{ ns}$$

$$\Delta R = 1.2\%$$



2.2 共振腔內光點大小之計算

考慮平凹共振腔長度為 L ，兩端面鏡分別為平面鏡(半導體飽和吸鏡)和曲率半徑為 R 的凹面鏡。假設雷射晶體距離平面鏡為 d ，如圖 2-2-1。

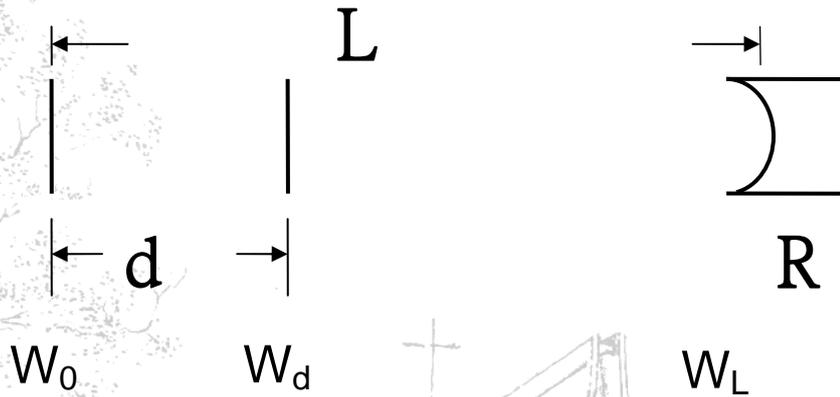


圖 2-2-1 雷射晶體以及曲率半徑為 R 的凹面鏡所組成的圖

則共振腔內光束的傳播矩陣可寫成：

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & L \\ -\frac{2}{R} & 1 - \frac{2L}{R} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 - \frac{2L}{R} & 2L - \frac{2L^2}{R} \\ -\frac{2}{R} & 1 - \frac{2L}{R} \end{bmatrix}$$

在共振腔內的 q 參數可表示為：

$$q(Z + \text{round trip}) = q(Z)$$

利用 ABCD law 可將上式改寫成

$$q(z) = \frac{Aq(z) + B}{Cq(z) + D}$$

化簡上式，並把 $AD-BC=1$ 代入，整理後可得：

$$\frac{1}{q(z)} = -\frac{A-D}{2B} - i \frac{\left[1 - \left(\frac{A+D}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{B}$$

高斯光束的 q 參數可寫成：

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R} - i \frac{\lambda_0}{\pi n w^2(z)}$$

對照二式可得：

$$\frac{n\pi w^2(z)}{\lambda_0} = \frac{B}{\left[1 - \left(\frac{A+D}{2}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$w(z) = \frac{\lambda_0}{n\pi} \frac{B}{\left[1 - \left(\frac{A+D}{2}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}}$$

將 A、B、和 D 代入便可求半導體飽和吸收鏡上之光點大小



$$w_0 = \left[\frac{\lambda_0}{n\pi} \frac{R-2L}{2L} \right]^{\frac{1}{2}}$$

同理，我們也能以此方法計算出位於在雷射晶體的光點大小為

$$w_d = \left[\frac{\lambda}{\pi} \sqrt{L(R-L)} \left(1 + \frac{d^2}{L(R-L)} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

同理，我們也能以此方法計算出位於在曲率半徑為 R 的凹面鏡光點大小為

$$w_L = \left[\frac{\lambda}{\pi} \sqrt{L(R-L)} \left(1 + \frac{L^2}{L(R-L)} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

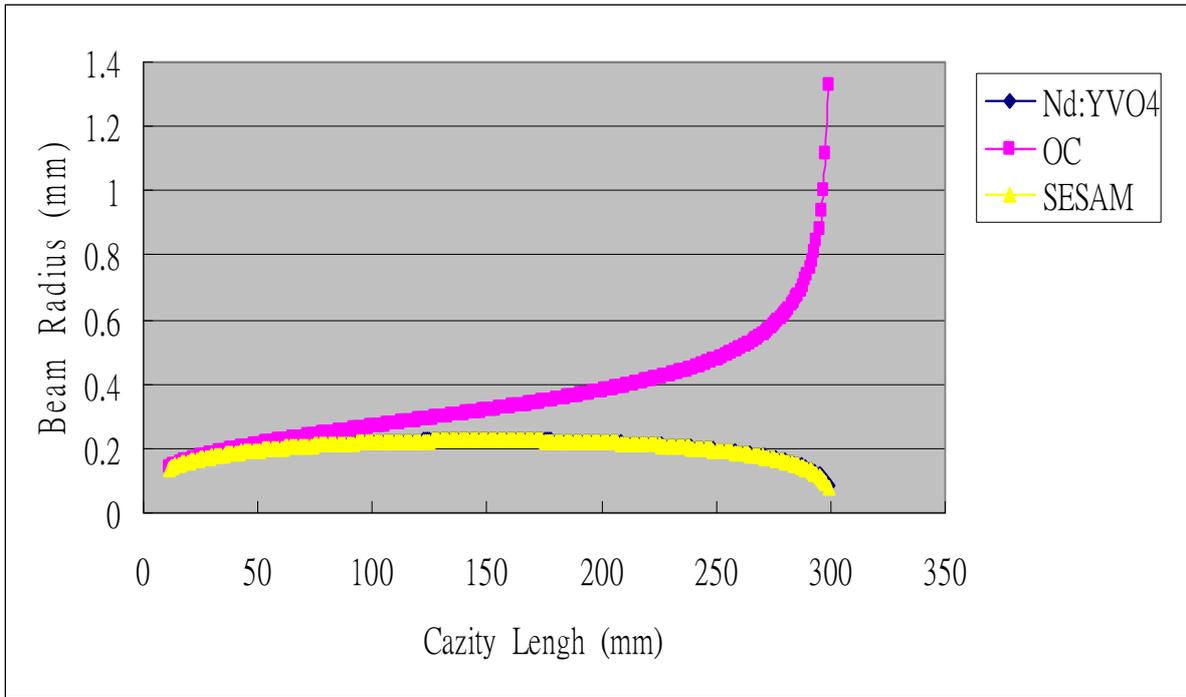


圖 2-2-2 在雷射晶體和半導體飽和吸收鏡以及輸出耦合鏡上光點大小之關係圖

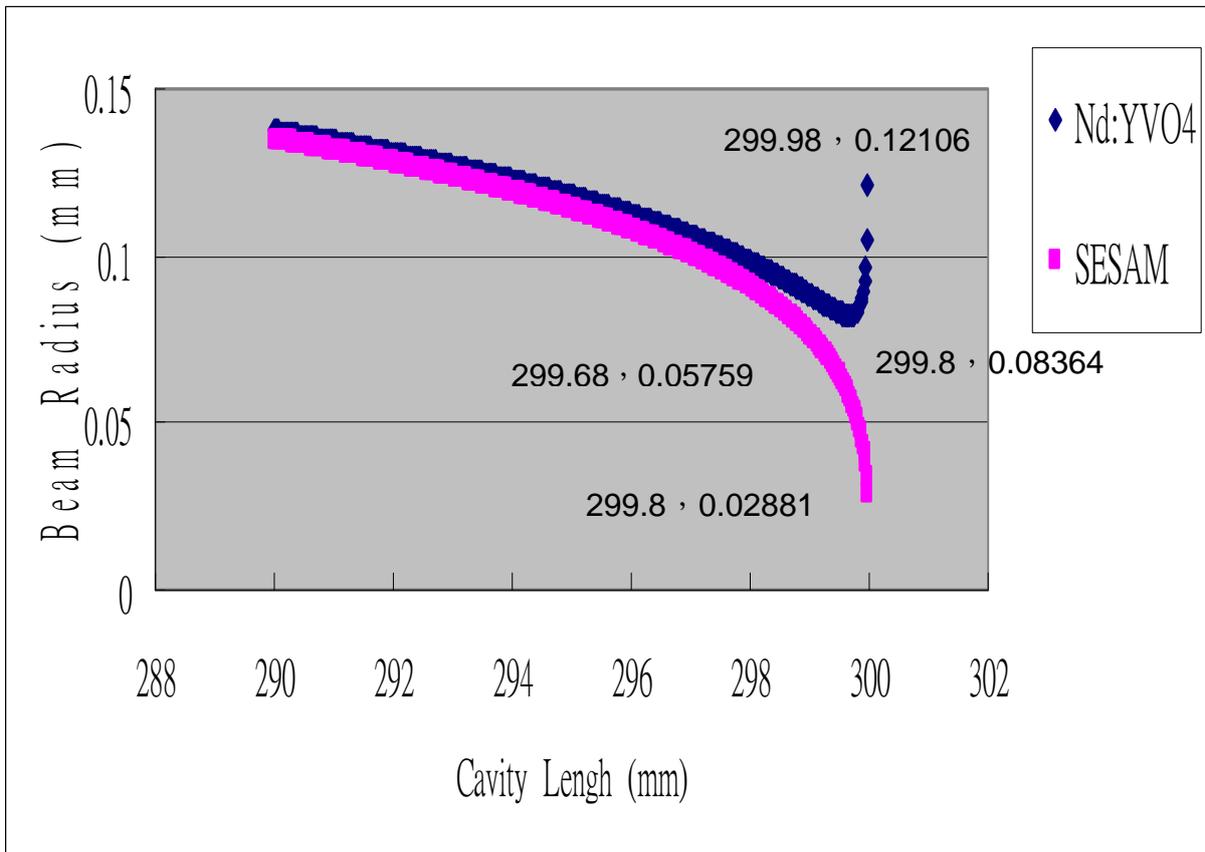


圖 2-2-3 光束半徑對不同腔長的之關係圖

圖 2-2-2 是我們在曲率半徑為 R 和凹面鏡的光腰大小之關係圖，在 $L=11\text{mm}\sim 300\text{mm}$ ， $R=300\text{mm}$ ， $Z=10\text{mm}$ ， $\lambda=0.001064\text{mm}$ ，在雷射晶體和半導體飽和吸收鏡以及輸出耦合鏡上光點大小之關係圖。在曲率半徑固定為 30 公分，Nd: YVO₄ 雷射晶體在腔長 150 mm 的位置，有最大值為 0.225 mm，而輸出耦合鏡上在腔長 11 mm 的位置，有最小值為 0.14 mm，輸出耦合鏡上在腔長 299 mm 的位置，有最大值為 1.325 mm。

圖 2-2-2 光束半徑對腔長的變化關係圖。在 $L=290\text{mm}-299.98\text{mm}$ ， $R=300\text{mm}$ ， $d=10\text{mm}$ ， $\lambda=0.001064\text{mm}$ 。藍色曲線代表 Nd: YVO₄ 雷射晶體的光點大小，紅色曲線代表半導體飽和吸收鏡的光點大小。共振腔只在 285 mm 和 302 mm 的改變，在 Nd: YVO₄ 雷射晶體的最小值位置是在腔長為 299.8mm 和光點大小為 0.08364，對應半導體飽和吸收鏡位置是在腔長為 299.68mm 和光點大小為 0.05759。在 Nd: YVO₄ 雷射晶體的最大值位置是在腔長為 299.98mm 和光點大小為 0.12106，對應半導體飽和吸收鏡位置是在腔長為 299.8mm 和光點大小為 0.02881。

本論文探討利用半導體飽和吸收鏡(SESAM)來進行被動鎖模。共振腔採用平凹腔。雷射晶體(Nd:YVO₄)為 3mm×3mm×1mm 的摻釹釩酸鈮微晶片，其一端面鍍高反射膜(HR coating)並作為雷射共振腔中的一個平面反射鏡，另一端面鍍抗反射膜(AR coating)。由於半導體飽和吸收鏡和雷射晶體端面皆為平面鏡，無法組成平凹腔，因此本論文將雷射晶體端面當作摺疊鏡，再外加一凹面鏡以組成平凹腔。由於雷射晶體傾斜一個角度，光線通過晶體時為斜向入射，因此次共振腔的效應可減弱甚至消除。所謂次共振腔的效應，就是兩面鏡子形成一個共振腔，第二面鏡子雖然做抗反射鍍膜，但是多少會有反射，反射不為零，就會在共振腔來回反射，形成次共振腔。此效應，可能會影響鎖模效果，而且也會有比較大的連續波的成份。

本章將探討在不同傾斜(摺疊)角度下的鎖模行為。

3-1 實驗架構與方法

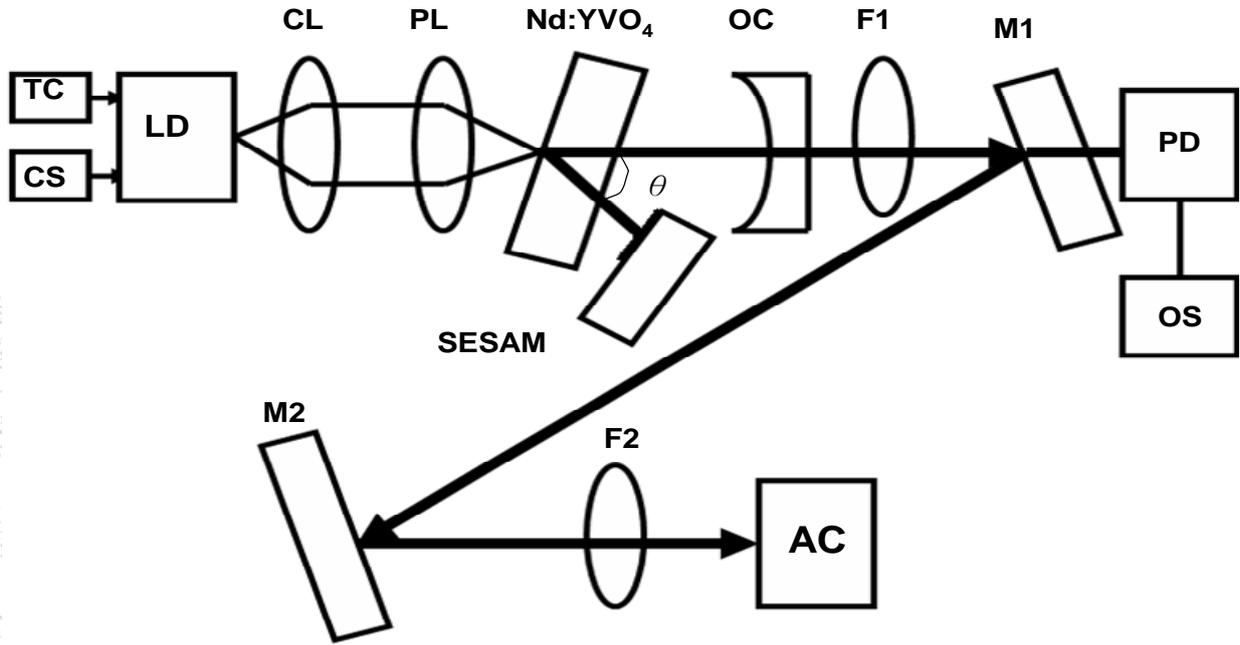


圖 3-1-1 實驗裝置

CS:電流源 TC:溫控器 LD: 雷射二極體 CL:準直透鏡

PL:聚焦透鏡 Nd:YVO₄: 雷射晶體 SESAM: 半導體飽和吸鏡

OC:輸出耦合鏡 F1: 透鏡 F2: 透鏡 M1:反射鏡

M2: 反射鏡 PD:光偵測器 OS:示波器 AC:自相關脈衝測量儀

θ : 摺疊角

本實驗是使用摻釹鈮酸鈮(Nd:YVO_4)為增益介質 ($3\text{mm}\times 3\text{mm}\times 1\text{mm}$)，摻釹量為 2%。實驗裝置如圖 3-1，我們是使用雷射半導體為激發光源，最大操作功率為 900mW 和波長為 808nm。雷射半導體由穩定電流源提供電流，並且以溫度控制器對雷射半導體作溫度控制，使雷射半導體能產生穩定的輸出功率以及波長。雷射工作介質摻釹鈮酸鈮幫浦面鍍激發光(808nm)的高透射膜以及雷射光(1064nm)的高反射鍍膜(HR coating)並作為共振腔的端面鏡用。半導體飽和吸收為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 $A_0=2\%$ ，調制深度 1.2%。腔內使用的透鏡兩面皆鍍上對 808nm 和 1064nm 的抗反射鍍膜。

首先我們將腔長位置固定，再調整雷射晶體，藉由調整雷射晶體和輸出耦合鏡(SOC)這兩個鏡座，使它們的光點盡可能地在同一個高度，產生 lasing，並且使雷射晶體的輸出功率達到最高，再調整半導體飽和吸收鏡，並移動平移台向前推，讓他輸出功率達到最高，最後恢復平移台，再稍微調整透鏡上的旋扭(上下或左右)，或稍微調整半導體飽和吸收鏡的旋扭(上下或左右)，或稍微調整雷射晶體的旋扭(上下或左右)，使整個系統輸出功率達到最高。

最後，我們在共振腔內一些值得探討的是去改變輸入電流，觀察當輸入電流改變時，觀察輸出功率的變化和示波器上的圖形和自相關脈衝測量儀的圖形和射頻頻譜分析儀。

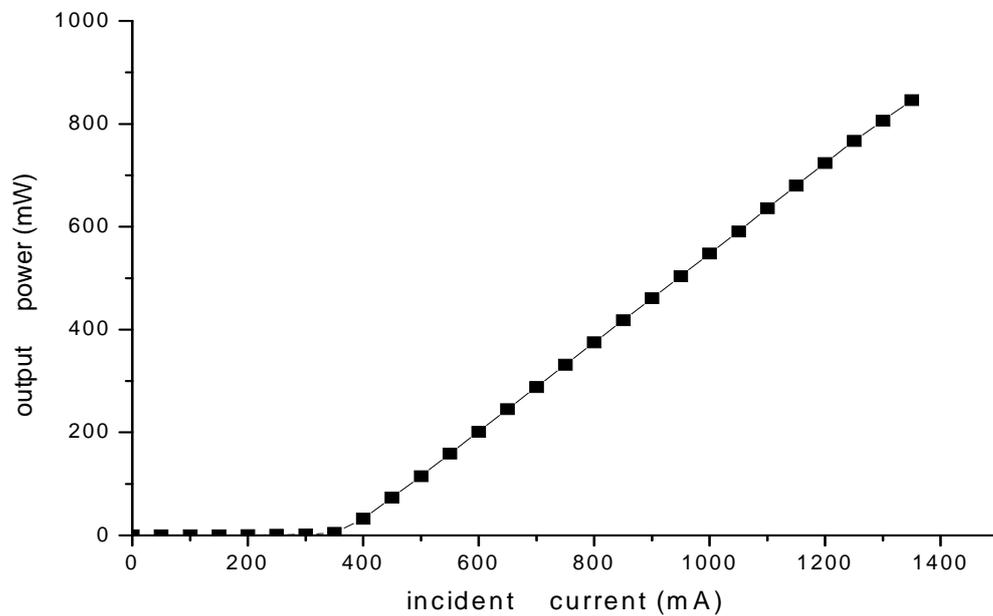
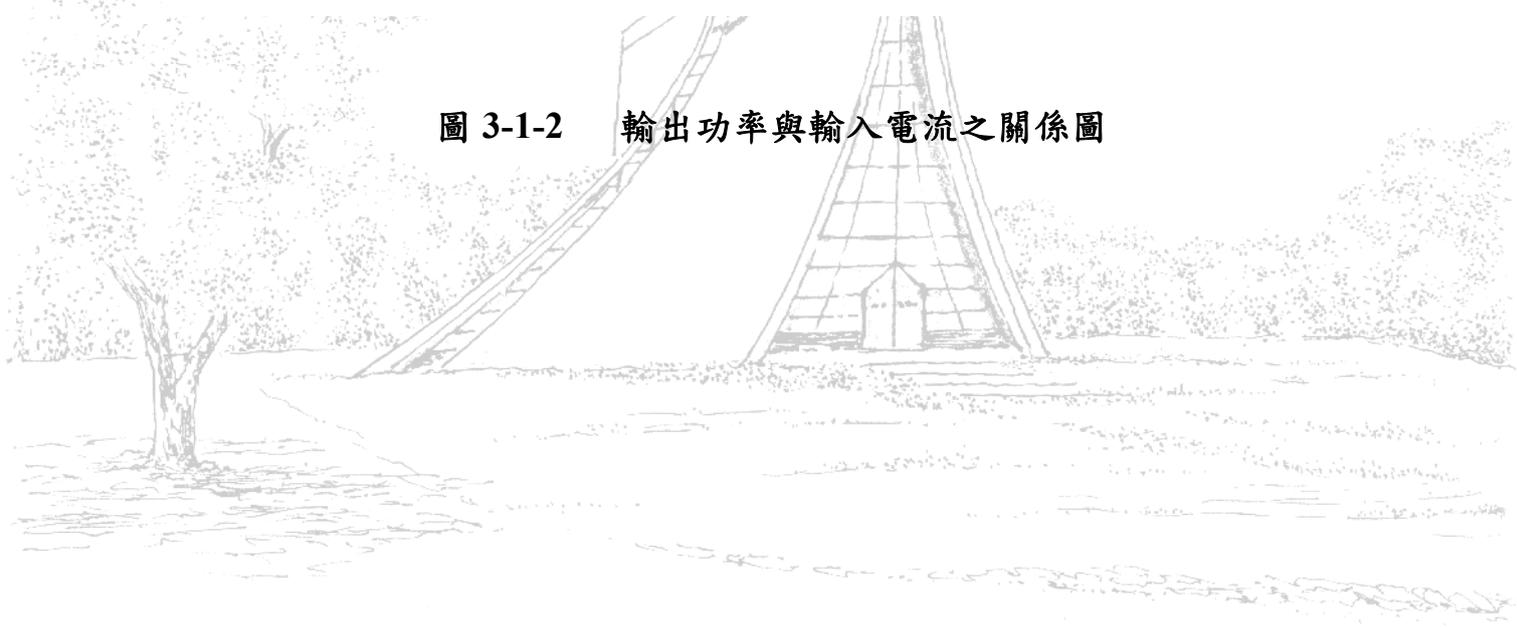


圖 3-1-2 輸出功率與輸入電流之關係圖



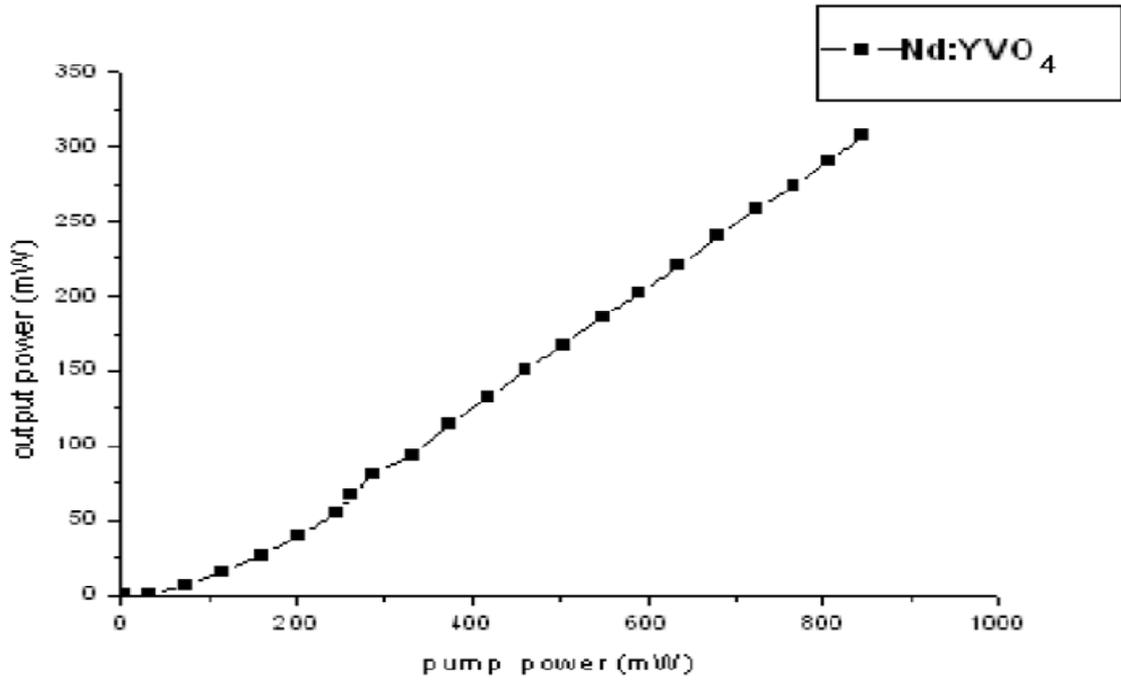


圖 3-1-3 輸出功率與輸入功率之關係圖

圖 3-1-2 是半導體雷射的輸出功率與輸入電流的關係圖。Y 軸代表輸出功率，X 軸代表輸入電流。由圖可知臨界電流從 400mA 開始，電流從 400mA 以後，每增加電流 50mA，他是增加 50mW 的吸收功率。

圖 3-1-3 是 Nd:YVO₄(薄的)雷射晶體的輸出功率與輸入功率之關係圖。Y 軸代表輸出功率，X 軸代表輸入功率。由圖可知，臨界功率從 100mW 開始，最大輸入功率為 830W，輸出功率最大為 320mW。由圖可知每增加 100mW 吸收功率，他是增加 25mW 的輸出功率。

3.2 飽和吸收鏡為 $A_0=2\%$ 的鎖模

我們在此章節的架構是使用 Nd:YVO₄(薄的) 雷射晶體和半導體飽和吸收鏡，且飽和吸收為 $A_0 = 2\%$ 。共振腔採用平凹腔，在曲率半徑固定為 30cm，反射率為 98% 的凹面鏡為輸出耦合鏡。我們將雷射晶體置入平凹共振腔，平凹共振腔是由半導體飽和吸收鏡和一個凹面鏡組成平凹共振腔，在不同的傾斜的角度下，發現有兩種不一樣的操作狀態，一種為多脈衝雷射，一種為單脈衝雷射。以下我們將探討形成多脈衝雷射和單脈衝雷射。

3.3 多脈衝雷射

我們在此節就是調整雷射晶體和半導體飽和吸收鏡的摺疊角度成 15 度 ($\theta=15$ 度)，結果發現形成多脈衝。在這個架構之下，輸入電流為 1200mA 之下，形成多脈衝，討論和結果如下。

圖 3-3-1 是輸出功率和輸入功率之關係圖。Y 軸代表輸出功率，X 軸代表輸入功率。由圖可知我們可以得到最大輸入功率為 780W，輸出功率最大為 230mW。

然後我們把圖 3-1-3 和圖 3-3-1 來比較一下。圖 3-1-3 是 Nd:YVO₄(薄的)雷射晶體的輸出功率與輸入功率之關係圖，而圖 3-3-1 是雷射晶體加了半導體飽和吸收鏡，改成這種摺疊的三鏡式的共振腔。

由圖 3-1-3 知道他在輸入功率為 780mW，輸出功率為 270mW，

而圖 3-3-1 是加了半導體飽和吸收鏡，得到最大輸入功率為 780mW，輸出功率最大為 230mW。這表示加了半導體飽和吸收鏡，會增加損失，功率會下降。

接著我們使用光偵測器和示波器所觀測產生鎖模的情況，圖 3-3-2-(a) 和圖 3-3-2-(b) 是我們在這裝置之下使用飽和吸收為 $A_0 = 2\%$ 的半導體飽和吸收體所產生的連續波鎖模的圖形。

其中圖 3-3-2-(a) 是在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 5ns 所產生的連續波鎖模的圖形。

圖 3-3-2-(b) 是在輸入功率為 720mW，示波器的橫軸為 100 μ s 所產生的連續波鎖模的圖形。

圖 3-3-3 是我們使用 COHERENT 公司所生產，型號:FR103 Autocorrelator 自相關干涉儀來量測鎖模脈衝的寬度，自相關干涉儀可測量 100 ps 以內的脈衝寬度。此時是在輸入功率為 720mW，這個圖形顯示其為多脈衝的圖形。然後我們計算他的脈衝的寬度，換算後所得之脈衝的寬度為 3.98 ps，峰值功率為 102 W。

最後我們探討在這個架構之下，他形成多脈衝的原因，可能是摺疊的角度不夠大，於是再去做更大的角度。

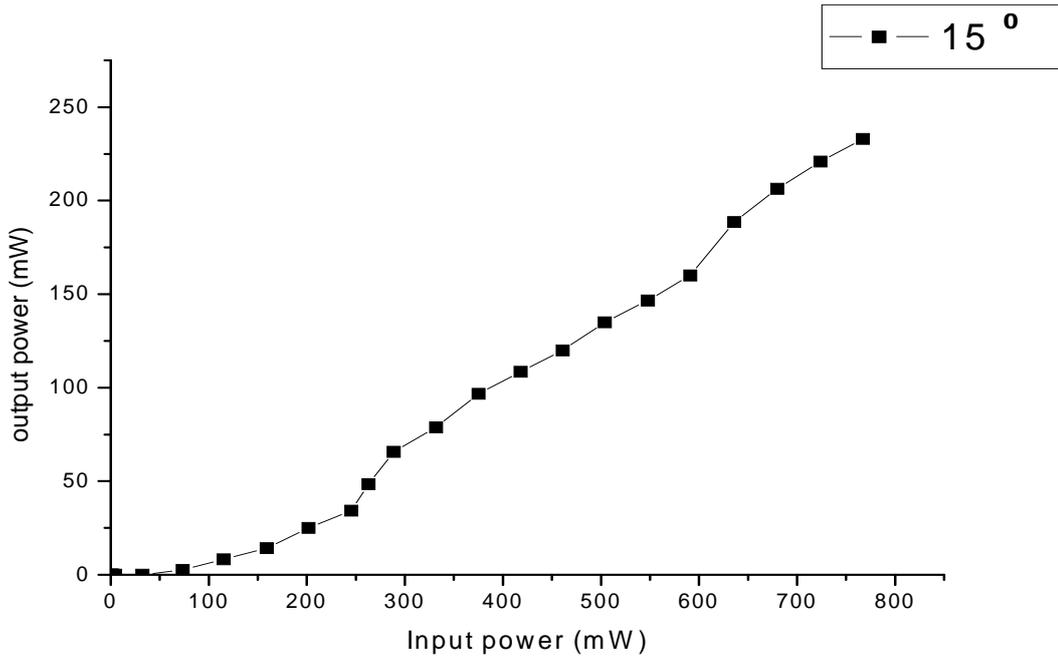


圖 3-3-1 輸出功率和輸入功率之關係圖

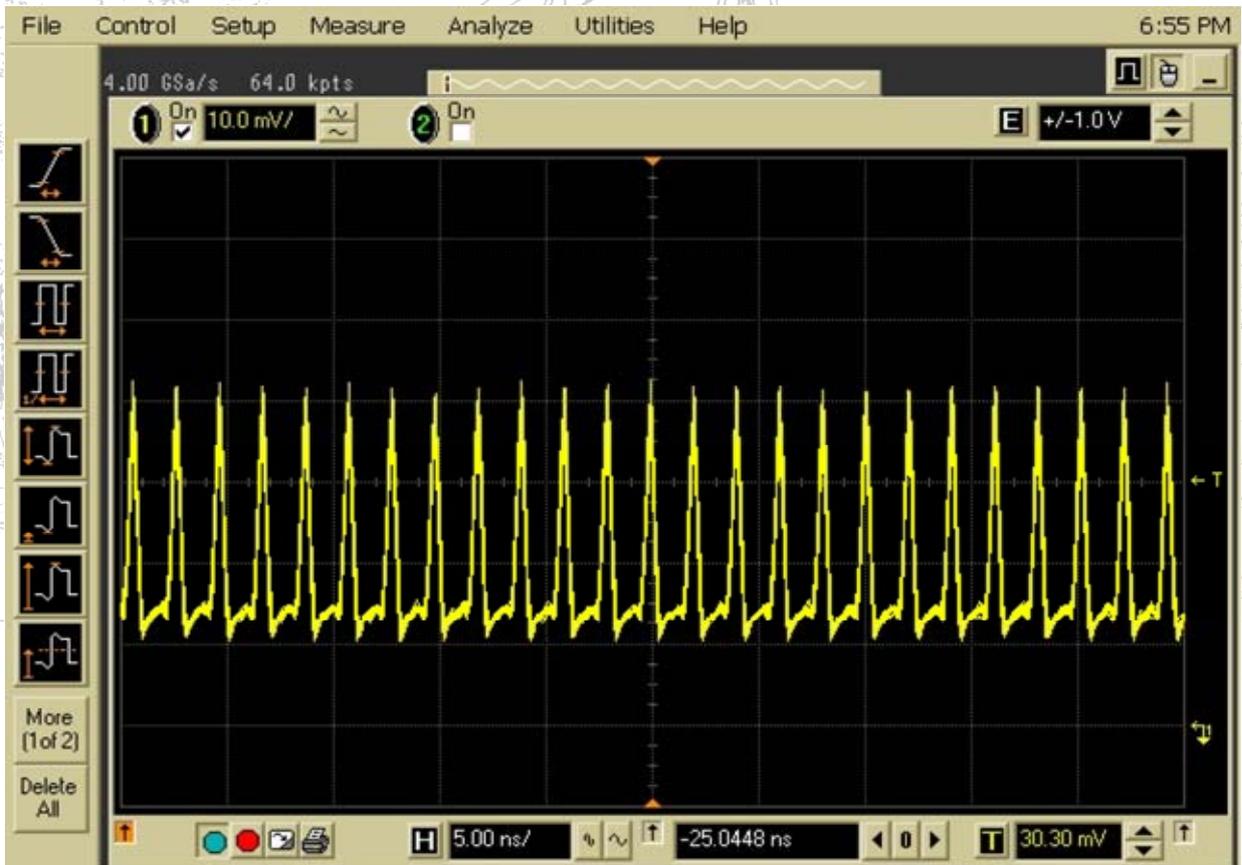


圖 3-3-2-(a) 在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 5ns 所觀測之波形

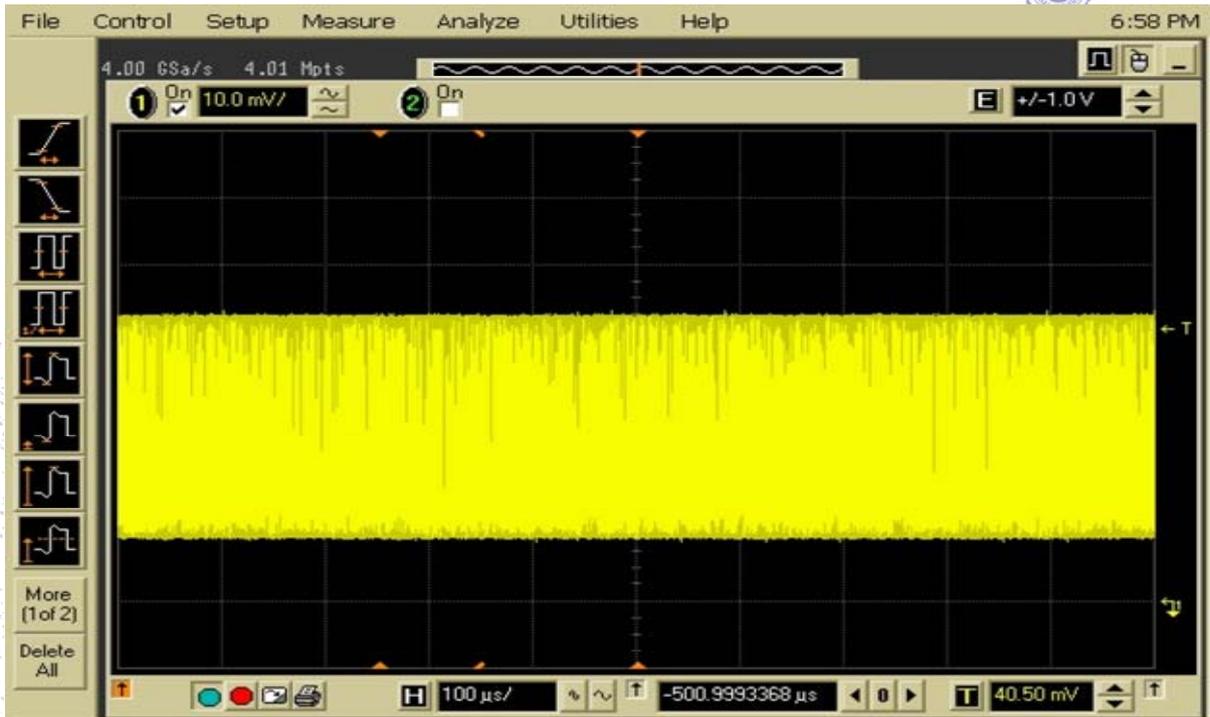


圖 3-3-2-(b) 在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 100 μ s 所觀測之波形

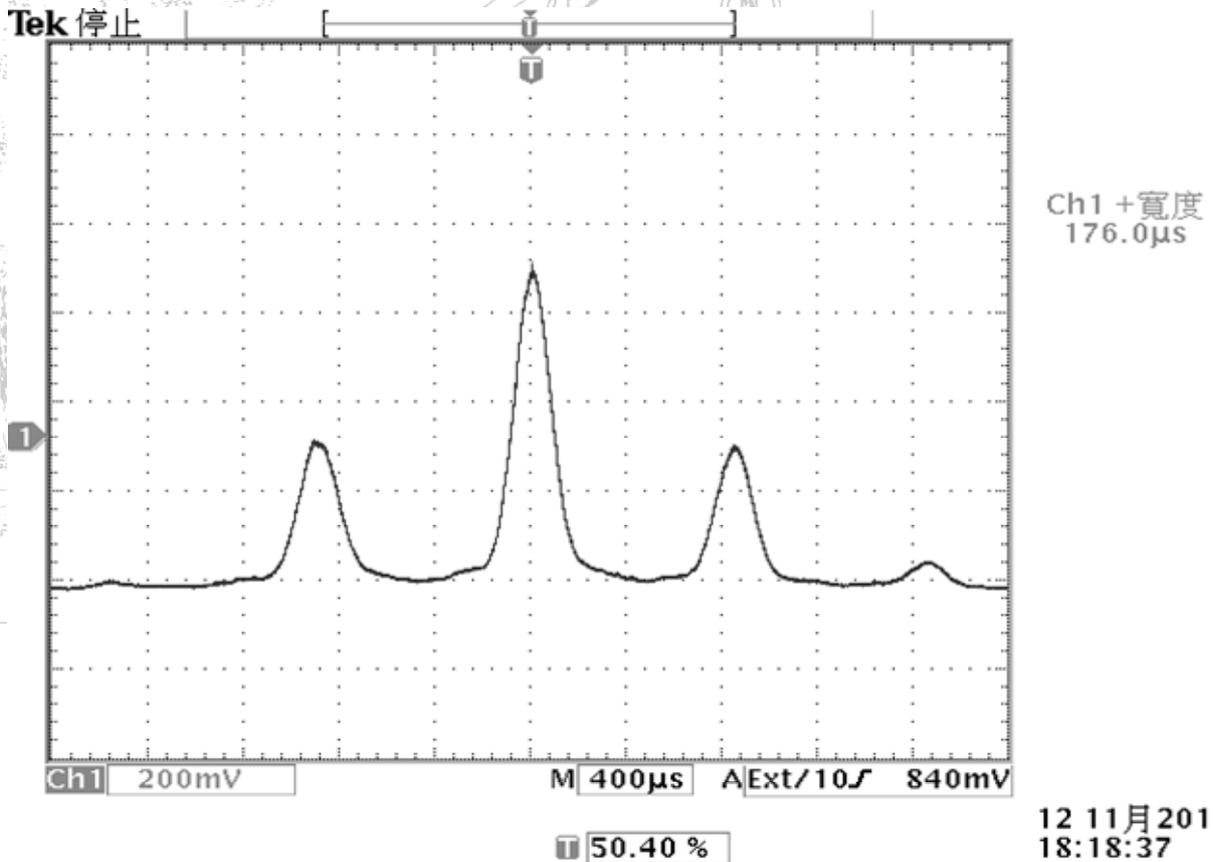


圖 3-3-3 在輸入功率為 720 mW，以自相關干涉儀測量之鎖模脈衝圖形

3.4 單脈衝雷射

我們在此章節就是調整雷射晶體和半導體飽和吸收鏡的摺疊角度成 20 度($\theta=20$ 度)，結果發現形成單脈衝。

3.4.1 20 度的單脈衝雷射

這是我們在做被動鎖模雷射實驗時所產生單脈衝雷射。我們在這裝置之下使用 Nd:YVO₄(薄的)和飽和吸收為 $A_0 = 2\%$ 的半導體飽和吸收體，在調整雷射晶體和半導體飽和吸收鏡的摺疊角度成 20 度($\theta=20$ 度)，曲率半徑固定為 30cm,輸入電流為 1200mA,討論和結果如下。

圖 3-4-1-1 是輸出功率和輸入功率之關係圖，Y 軸代表輸出功率，X 軸代表輸入功率。由圖可知我們可以得到最大輸入功率為 780 mW，輸出功率最大為 205mW。其中輸入功率為 105 mW 到 160m W 代表是連續波，160 mW 到 330 mW 代表是不穩定的 Q 開關鎖模，330 mW 到 550 mW 代表是穩定的 Q 開關鎖模，550 mW 到 780 mW 代表是產生連續波鎖模。

接著我們使用光偵測器和示波器(頻寬為 1GHz)觀測雷射光輸出波形，其中圖 3-4-1-2-(a) 是輸入功率為 320 mW，示波器的橫軸為 5 μ s，所觀測的波形，此波形顯示此時雷射的輸出為不穩定的 Q 開關鎖模。圖 3-4-1-2-(b) 代表是當輸入功率為 540 mW，示波器的橫軸為 5 μ s，所觀測的波形，此波形顯示此時雷射的輸出為穩定的 Q 開關鎖模。圖 3-4-1-2-(c) 代表是當輸入功率為 800mW，示波器的橫軸為 5 μ s，所觀測的波形，此波形顯示此時雷

射的輸出為穩定的連續波鎖模。

以下的圖 3-4-1-3 是自相關干涉儀來量測鎖模脈衝的寬度，代表是當輸入功率為 800mW 所產生連續波鎖模。此時所看到的是單脈衝圖形，然後我們計算他的脈衝的寬度，換算後所得之脈衝的寬度為 5.2 ps ， 最大峰值功率為 61.7W 。

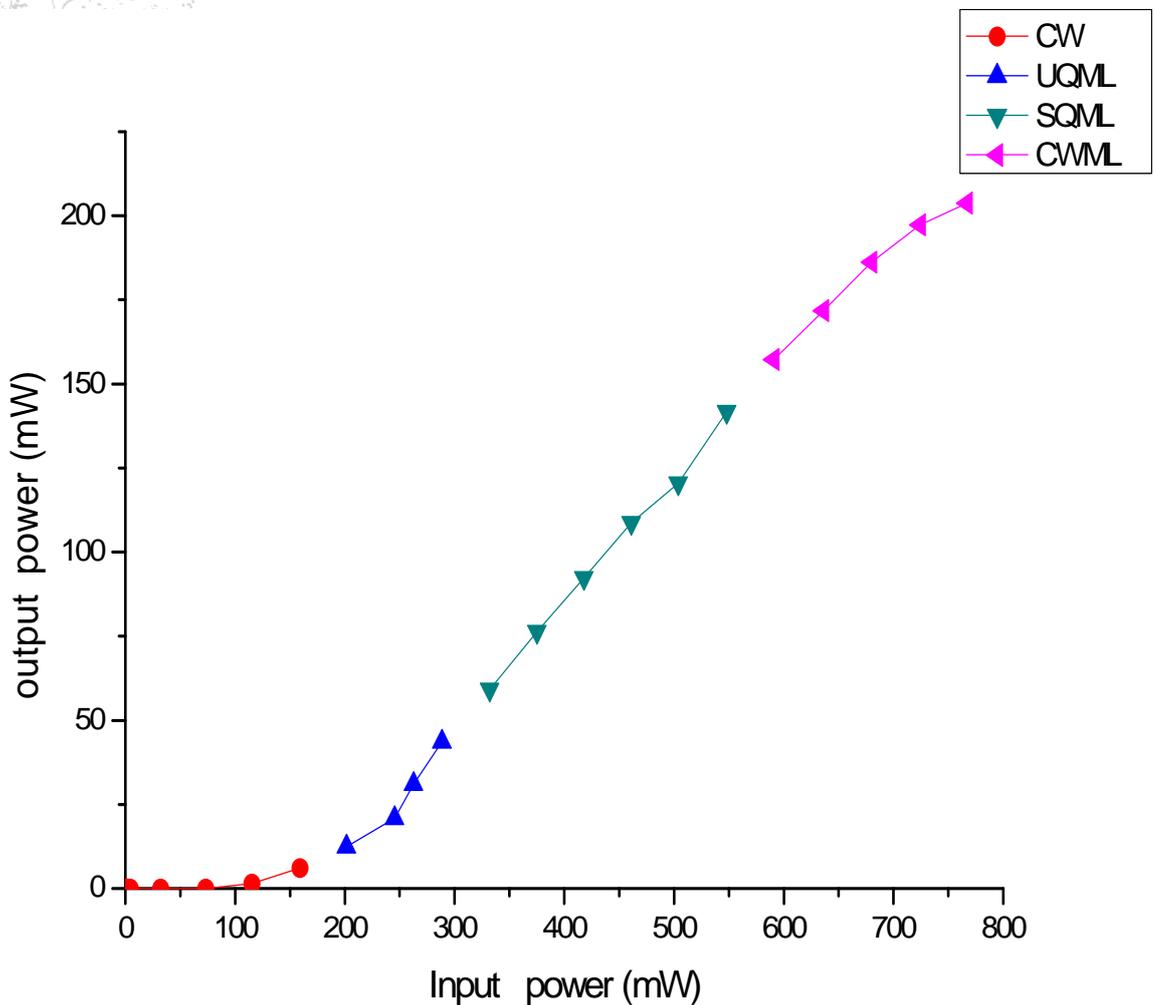


圖 3-4-1-1 輸入功率和輸出功率之關係圖

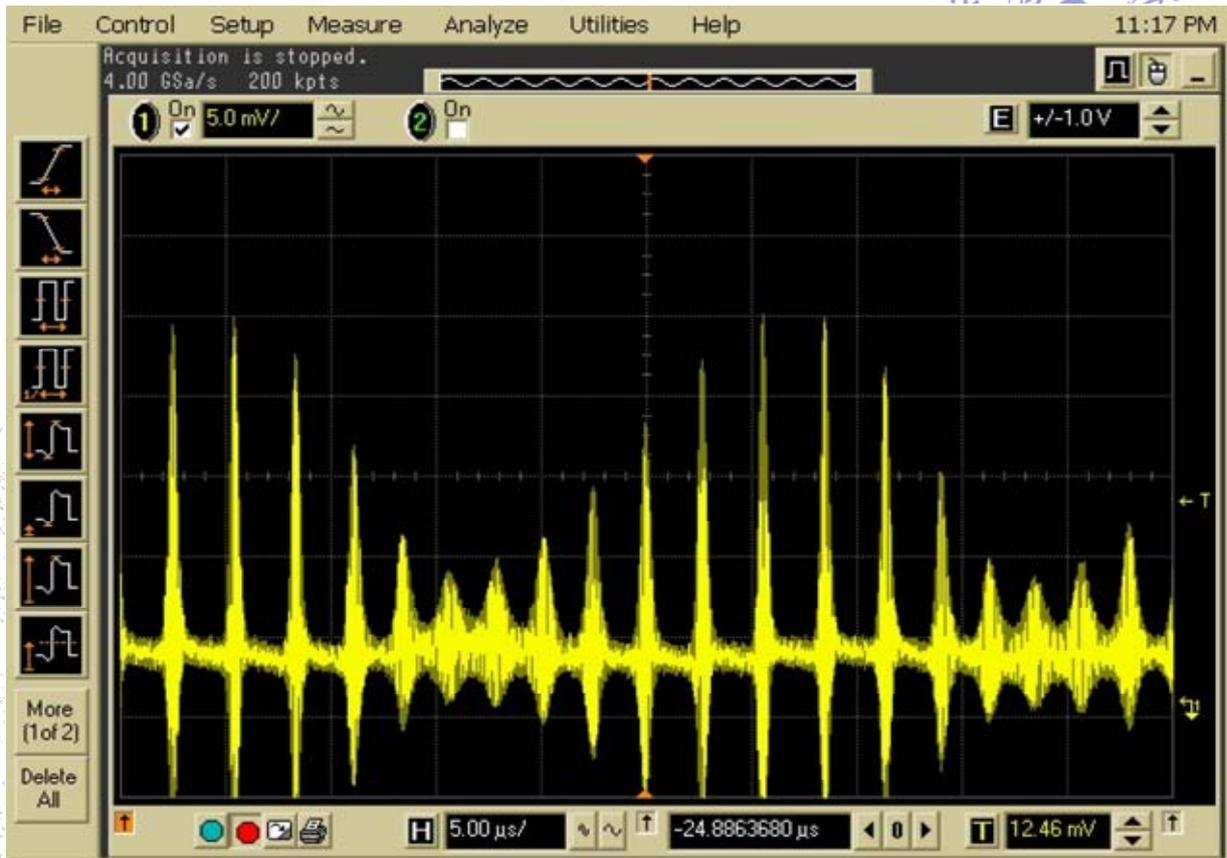


圖 3-4-1-2-(a) 在輸入功率為 320mW，示波器的橫軸為 5 μ s 所觀測之波形

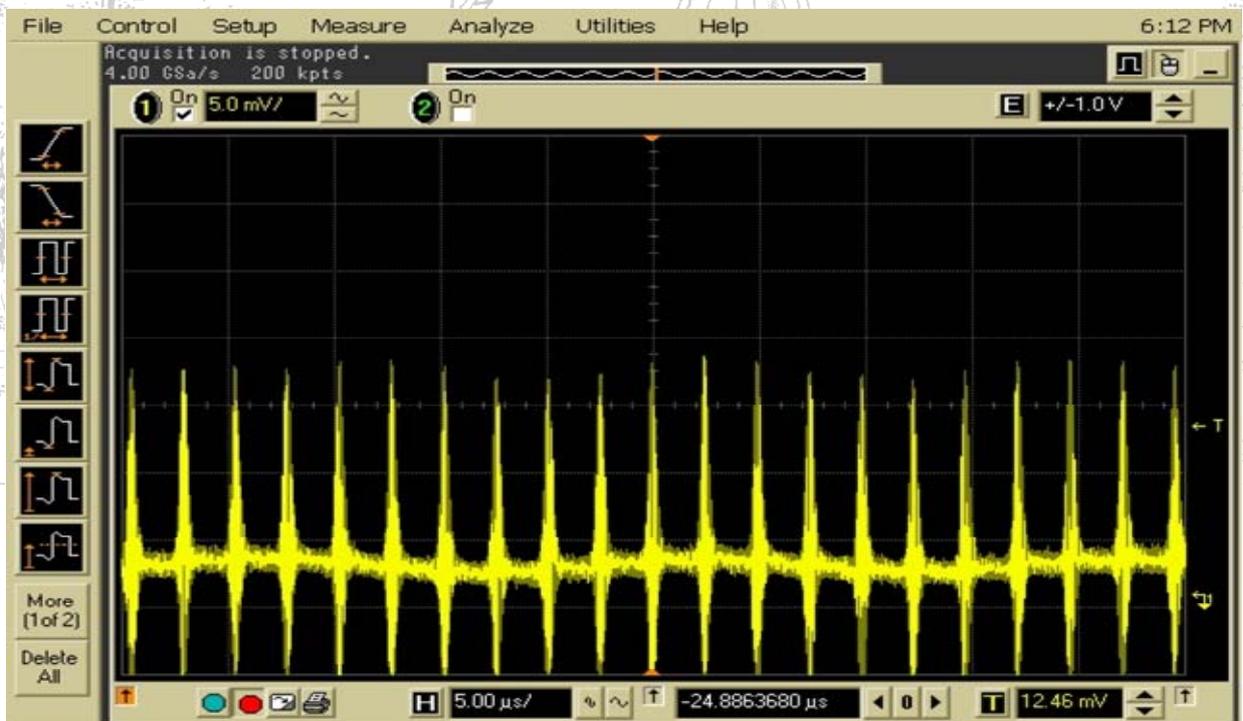


圖 3-4-1-2-(b) 在輸入功率為 540mW，示波器的橫軸為 5 μ s 所觀測之波形

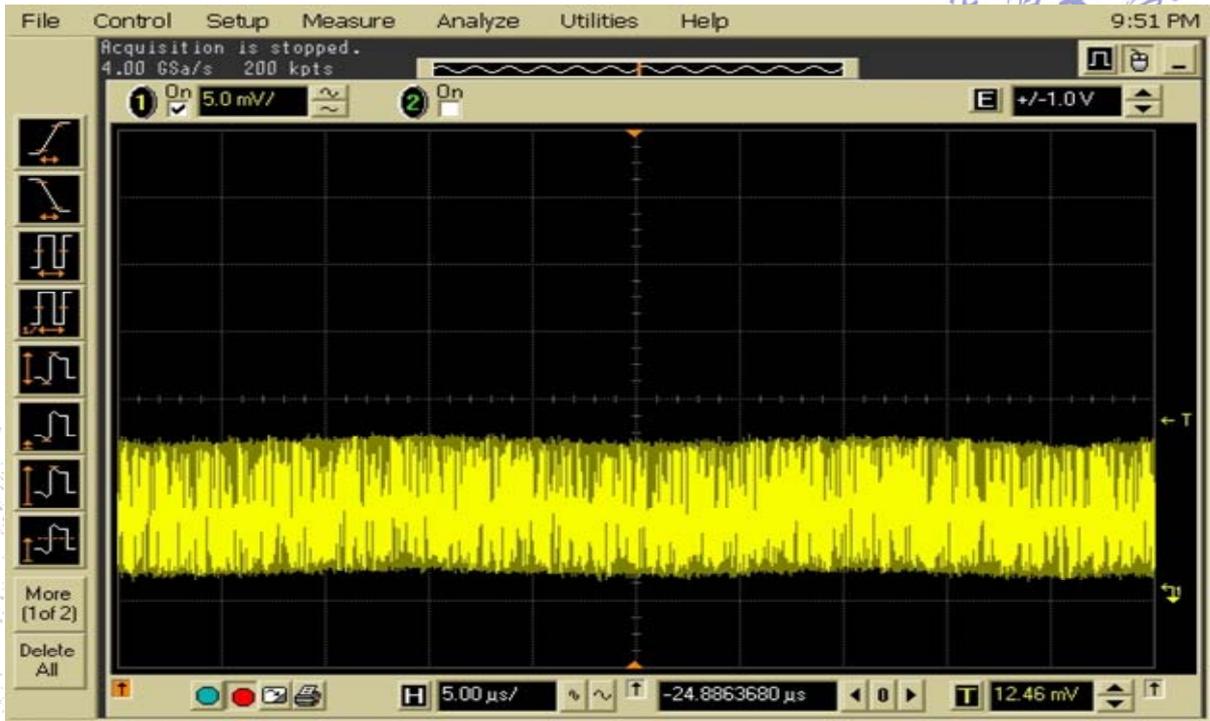


圖 3-4-1-2(c) 在輸入功率為 800mW，示波器的橫軸為 5 μ s 所觀測之波形

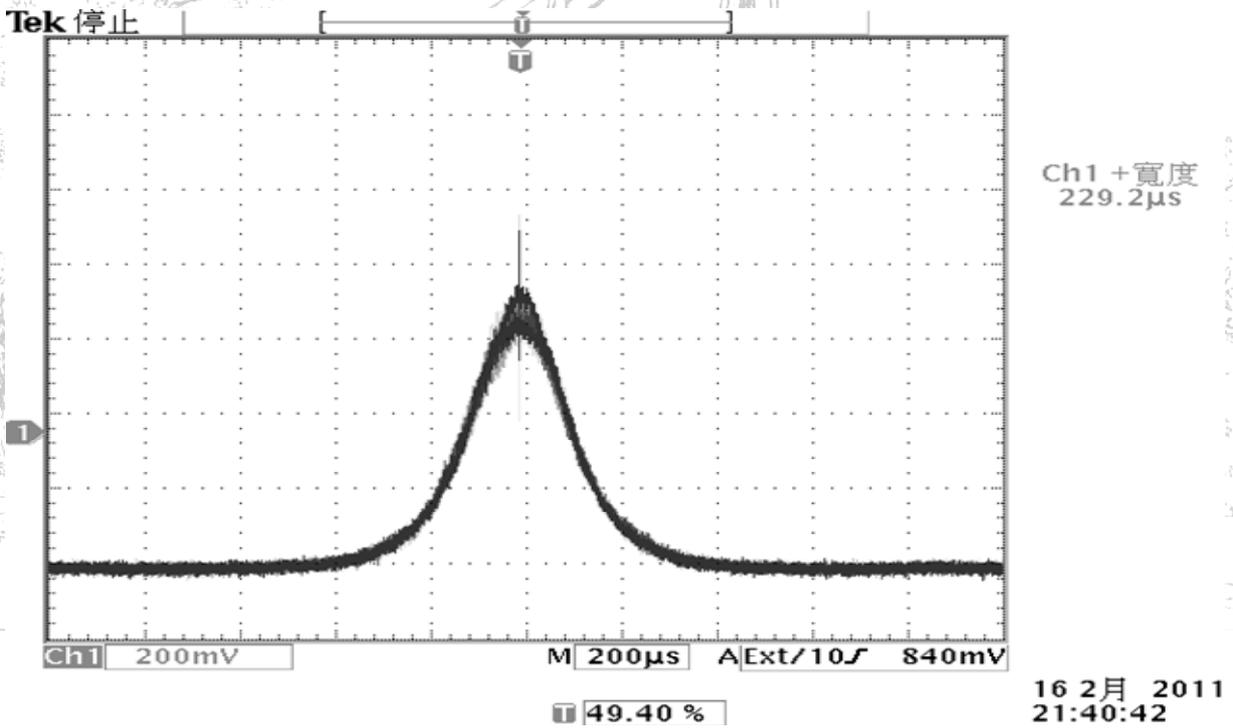


圖 3-4-1-3 在輸入功率為 800mW，以自相關干涉儀測量之鎖模脈衝圖形

3.4.2 30 度的單脈衝雷射

這是我們在做被動鎖模雷射實驗時所產生單脈衝雷射。我們在這裝置之下使用 Nd:YVO₄(薄的)和飽和吸收為 $A_0 = 2\%$ 的半導體飽和吸收體，在調整雷射晶體和半導體飽和吸收鏡的摺疊角度成 30 度 ($\theta=30$ 度)，曲率半徑固定為 30cm，輸入電流為 1200mA，討論和結果如下。

圖 3-4-2-1 是輸出功率和輸入功率之關係圖，Y 軸代表輸出功率，X 軸代表輸入功率。由圖可知我們可以得到當輸入功率為 150 mW 時，才開始有輸出功率。而我們得到最大輸入功率為 780 mW，輸出功率最大為 190mW。

接著我們使用光偵測器和示波器所觀測產生鎖模的情況，圖 3-4-2-2-(a) 和圖 3-4-2-2-(b) 是在輸入功率為 720 mW，產生單脈衝的連續波鎖模雷射。

其中圖 3-4-2-2-(a) 是在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 20 μ s 所產生的連續波鎖模的圖形。

圖 3-4-2-2-(b) 是在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 200 μ s 的連續波鎖模的圖形。

圖 3-4-2-3 是自相關干涉儀下鎖模脈衝之圖形，他是在輸入輸入功率為 720 mW，此時所看到的是單脈衝圖形，然後我們計算他的脈衝的寬度，換算後所得之脈衝的寬度為 9.2 ps，最大峰值功率為 102W。

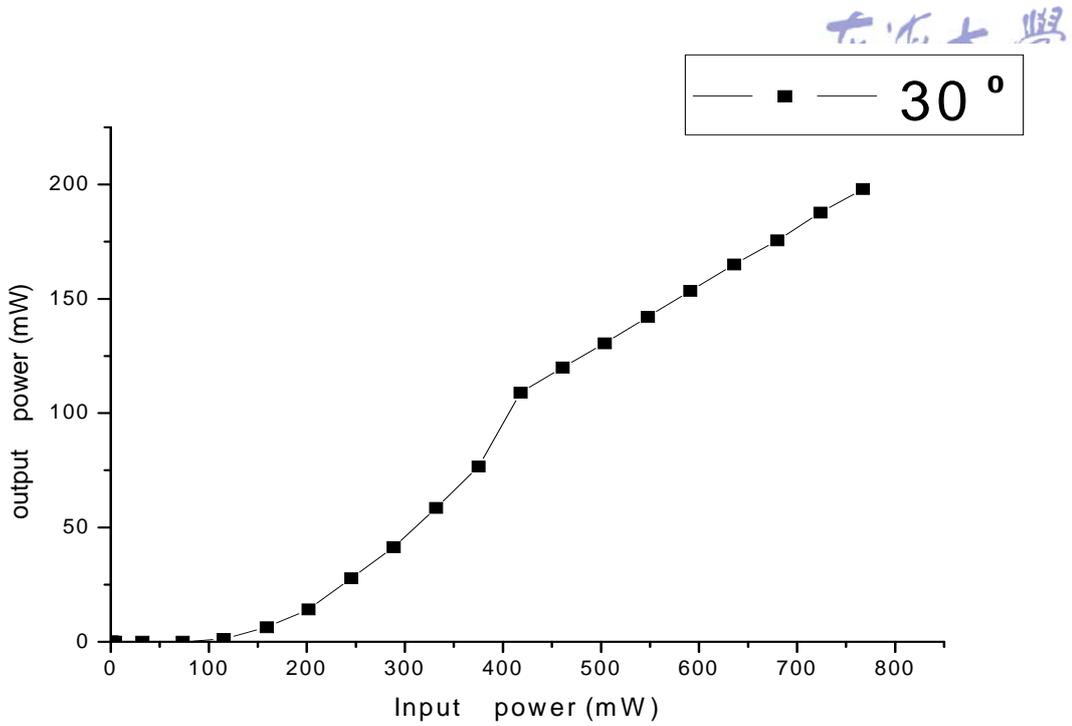


圖 3-4-2-1 輸出功率和輸入功率之關係圖

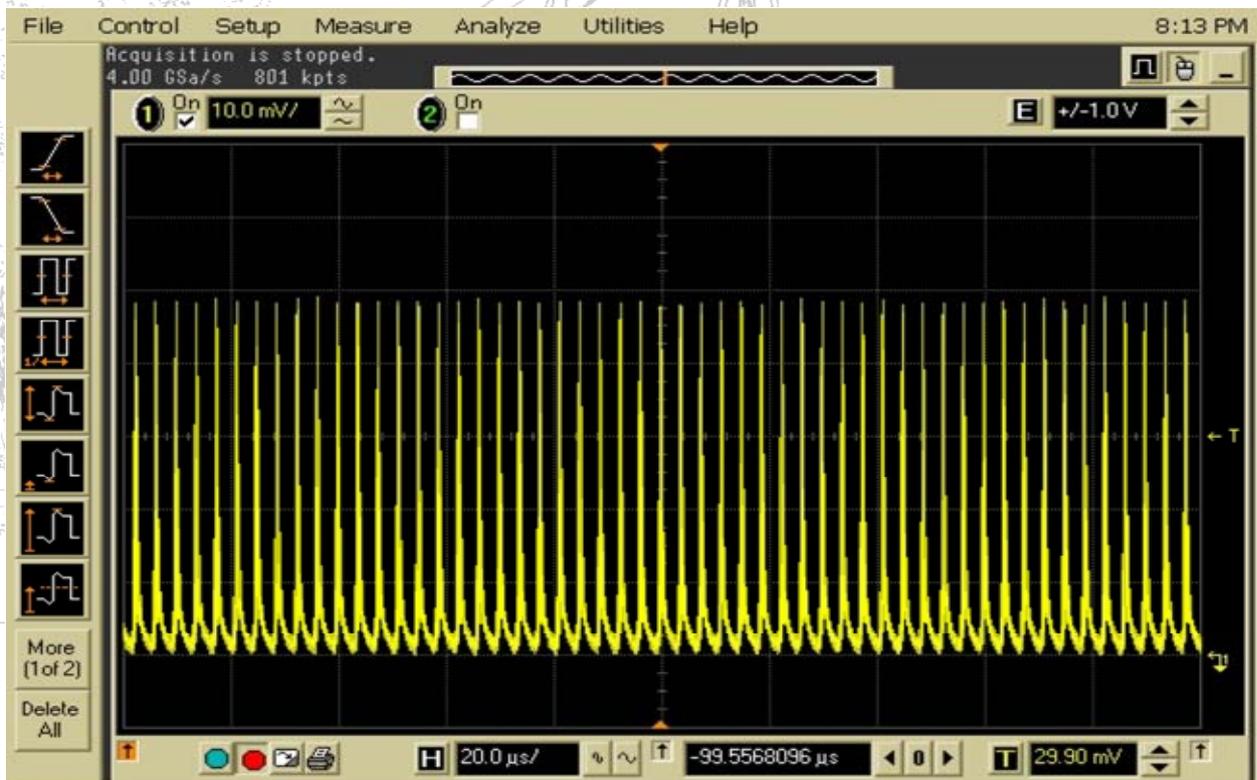


圖 3-4-2-2(a) 在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 20μs 所觀測之波形

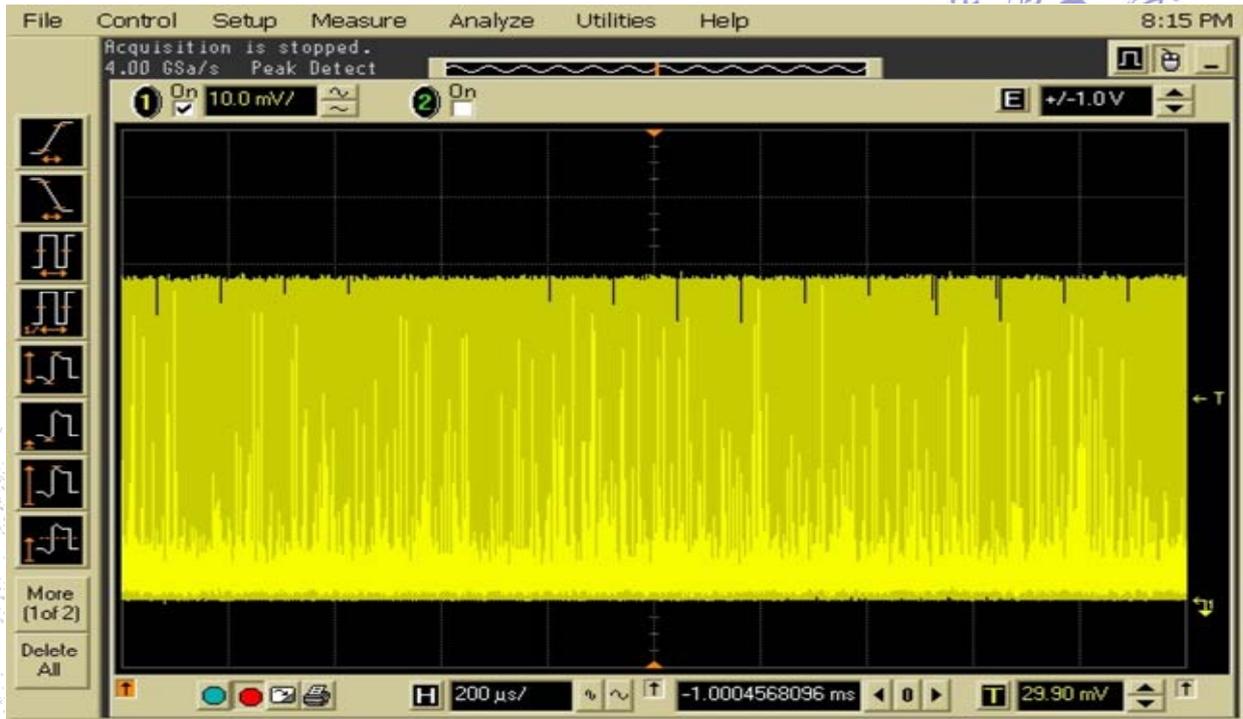


圖 3-4-2-2-(b) 在輸入輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 200 μ s 所觀測之波形

Tek 停止

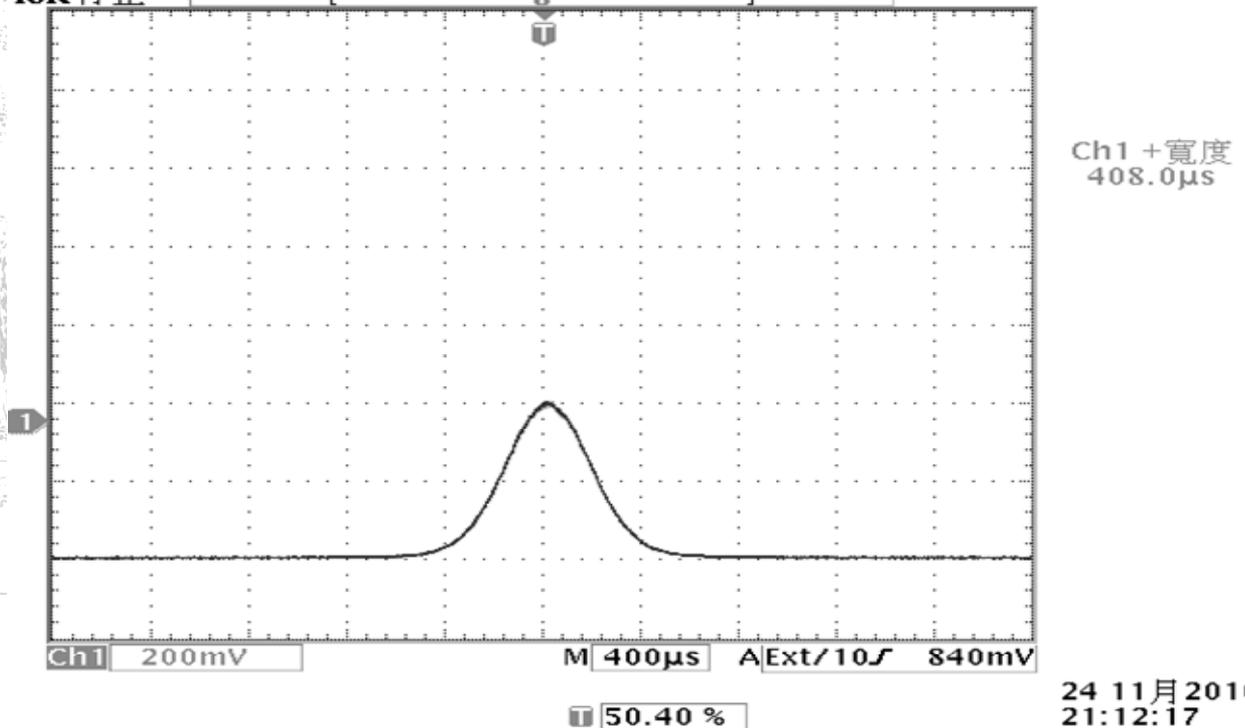
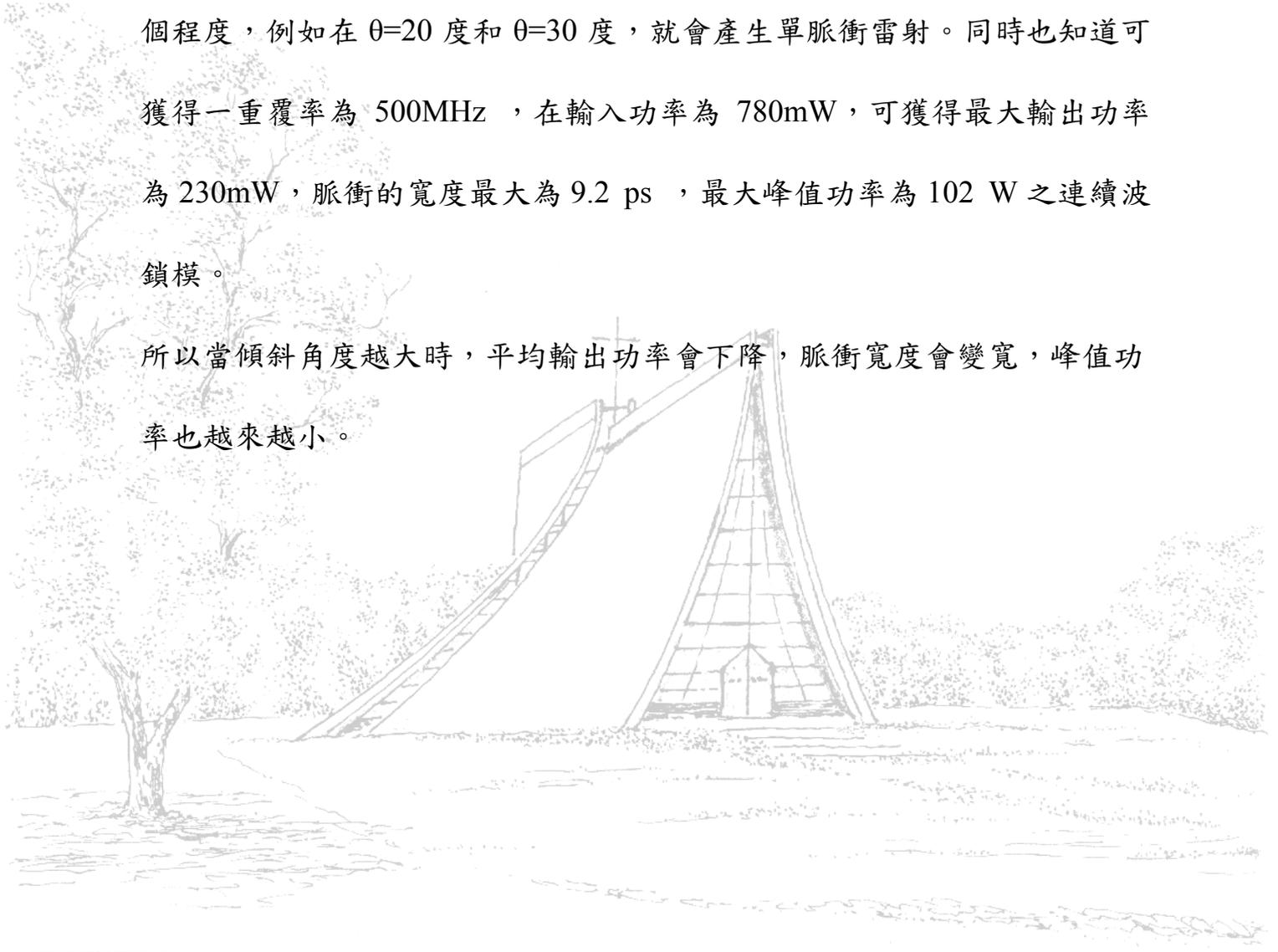


圖 3-4-2-3 在輸入功率為 720 mW，以自相關干涉儀測量之鎖模脈衝圖形

3.5 結果與討論

在這個實驗裝置之下，使用 Nd:YVO₄(薄的) 雷射晶體和飽和吸收為 $A_0 = 2\%$ ，在曲率半徑都為 30 公分，只改變摺疊角度。由圖表 3-5-1 知道，當角度小的時候，例如在 $\theta = 15$ 度，就會產生多脈衝雷射，當角度大到某一個程度，例如在 $\theta = 20$ 度和 $\theta = 30$ 度，就會產生單脈衝雷射。同時也知道可獲得一重覆率為 500MHz，在輸入功率為 780mW，可獲得最大輸出功率為 230mW，脈衝的寬度最大為 9.2 ps，最大峰值功率為 102 W 之連續波鎖模。

所以當傾斜角度越大時，平均輸出功率會下降，脈衝寬度會變寬，峰值功率也越來越小。



重覆率為 500 MHz

	多脈衝	單脈衝	(輸入功 780mW) 輸出功率	(輸入功 720mW) 脈衝寬度	峰值功 率
15°	○		230mW	3.98ps	102W
20°		○	205mW	5.2ps	61.7W
30°		○	190mW	9.2ps	76.3W

圖表 3-5-1 Nd:YVO₄(薄的)雷射的結果表

第四章 楔形平板雷射晶體的被動鎖模



這一章是要探討為了要得到短脈衝和高頻率，所以換 Nd:YVO₄(厚的)雷射晶體，在飽和吸收鏡為 $A_0 = 0.5\%$ 和 $A_0 = 2\%$ 的半導體飽和吸鏡 (SESAM)產生連續波鎖模。但是同時為了要知道高頻會有多高?所以在這實驗當中，我們不斷改變曲率半徑，從 80 公分到 5 公分。

4-1 實驗架構

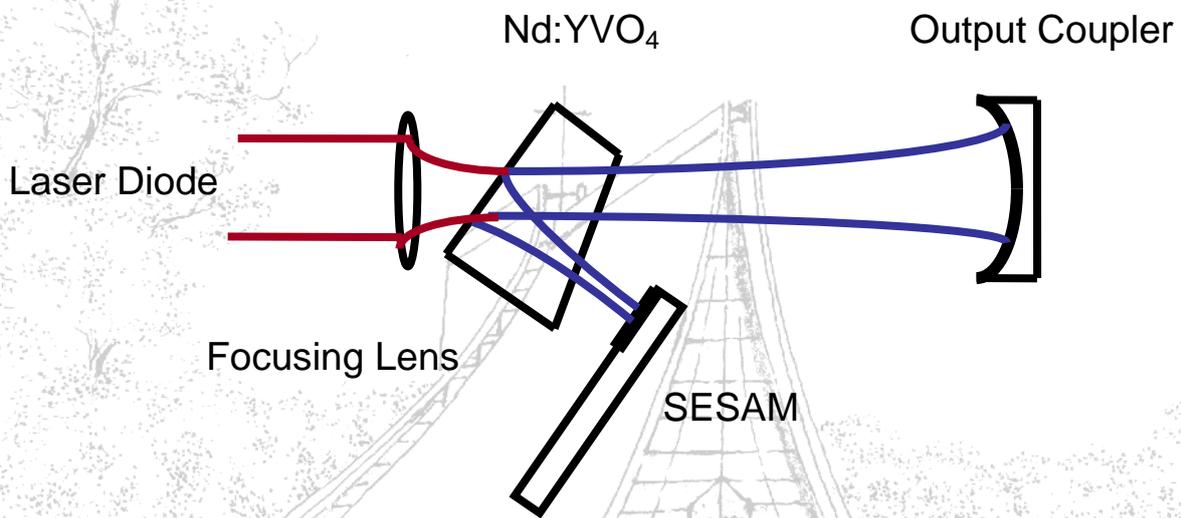


圖 4-1 實驗裝置

Nd:YVO₄: 雷射晶體

Focusing Lens: 聚焦合鏡

SESAM: 半導體飽和吸鏡

OC: 輸出耦合鏡

本實驗是使用摻鉍釷酸鈮(Nd:YVO_4)為雷射晶體($4\text{mm}\times 4\text{mm}\times 4\text{mm}$)，摻鉍量為 1%，實驗裝置如圖 4-1。我們是使用雷射半導體為激發光源，雷射半導體由穩定電流源提供電流，並且以溫度控制器對雷射半導體作溫度控制，使雷射半導體能產生穩定的輸出功率以及波長。雷射工作介質摻鉍釷酸幫浦面鍍激發光(808nm)的高透射膜以及雷射光(1064nm)的高反射鍍膜(HR coating)並作為共振腔的端面鏡用。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 $A_0 = 0.5\%$ ，調制深度 1.2%。腔內使用的透鏡兩面皆鍍上對 808nm 和 1064nm 的抗反射鍍膜。

首先我們將腔長位置固定,再調整雷射晶體，藉由調整雷射晶體和輸出耦合鏡(SOC)這兩個鏡座，使它們的光點盡可能地在同一個高度，產生 lasing，並且使雷射晶體的輸出功率達到最高，再調整半導體飽和吸收鏡，並移動平移台向前推，讓他輸出功率達到最高，最後恢復平移台，再稍微調整透鏡上的旋扭(上下或左右)，或稍微調整半導體飽和吸收鏡的旋扭(上下或左右)，或稍微調整雷射晶體的旋扭(上下或左右)，使整個系統輸出功率達到最高。

最後，我們在共振腔內改變曲率半徑，曲率半徑從 80 公分到 5 公分，觀察輸出功率的變化和示波器上的圖形和自相關脈衝測量儀的圖形和射頻頻譜分析儀。

4-2 飽和吸收鏡為 $A_0 = 0.5\%$ 的鎖模

為了得到短脈衝和高頻率，所以做了曲率半徑的改變。我們的架構是換 Nd:YVO₄(厚的) 雷射晶體，和飽和吸收鏡為 $A_0 = 0.5\%$ 的半導體飽和吸收鏡(SESAM)，在這個架構之下做了曲率半徑的改變，討論和結果如下。

4.2.1 曲率半徑為 80 公分的鎖模

我們的架構是換 Nd:YVO₄(厚的) 雷射晶體，和飽和吸收鏡為 $A_0 = 0.5\%$ 的半導體飽和吸收鏡(SESAM)，曲率半徑為 80cm，在這個裝置之下無法產生穩定的 Q 開鎖模，原因是 80cm 是屬於極端的曲率半徑，所以無法產生穩定的 Q 開鎖模。討論和結果如下。

我們先使用光偵測器和示波器所觀測產生鎖模的情況，圖 4-2-1-1-(a) 和圖 4-2-1-1-(b) 是連續波鎖模的圖形。其中圖 4-2-1-1-(a) 是在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 5ns 所產生的連續波鎖模的圖形。圖 4-2-1-1-(b) 是在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 5 μ s 所產生的連續波鎖模的圖形。

圖 4-2-1-2 是射頻頻譜分析儀下脈衝之圖形，他是在輸入功率為 720 mW，此時所看到的是連續波鎖模雷射，他的頻率為 185.096 MHz。

圖 4-2-1-3 是自相關干涉儀下鎖模脈衝之圖形，他是在輸入功率為 720 mW，此時所看到的是單脈衝圖形，換算後所得之脈衝的寬度為 12.6 ps。

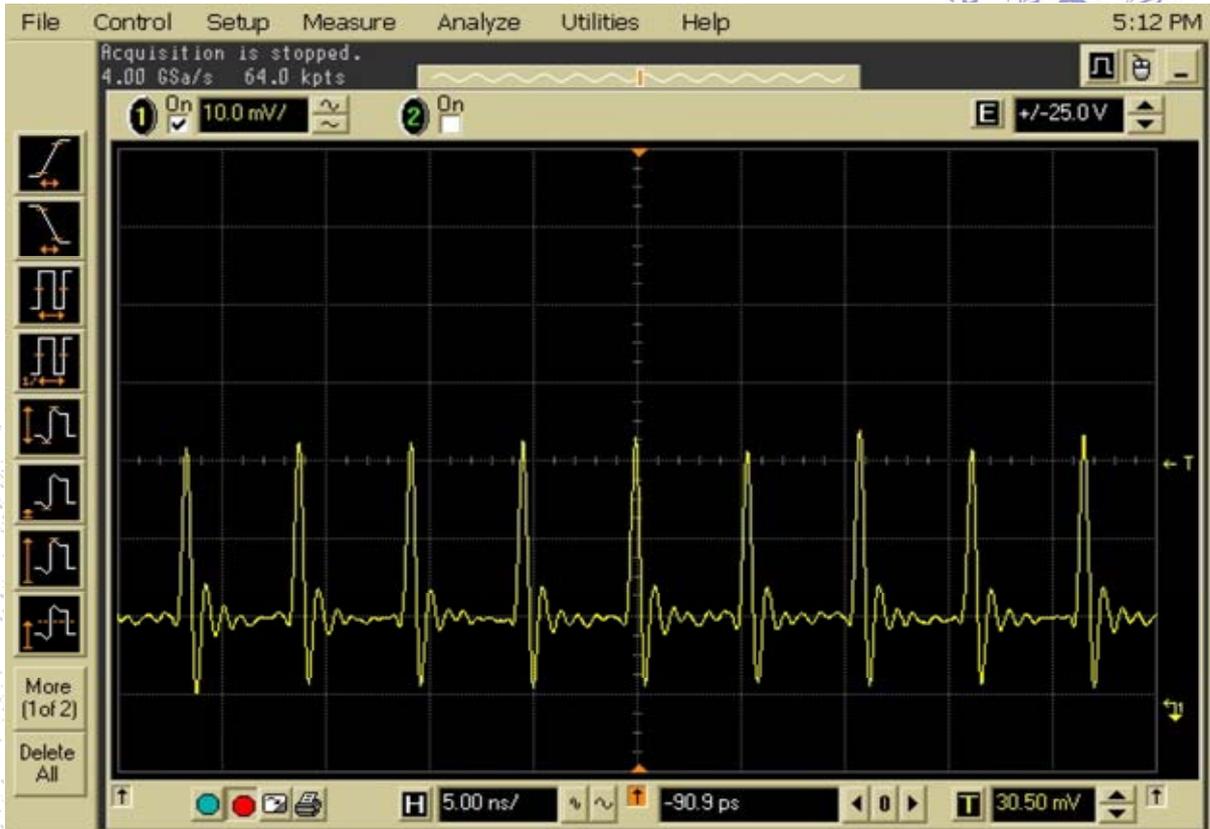


圖 4-2-1-1-(a) 在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 5ns 所觀測之波形

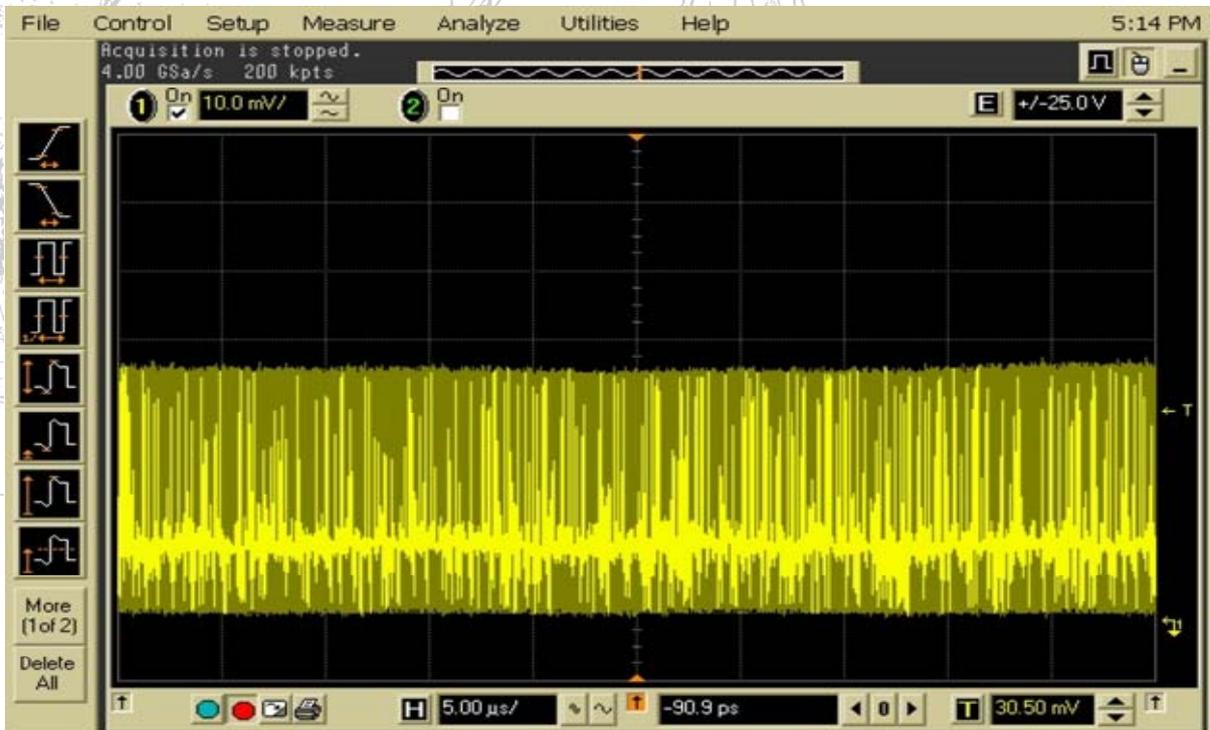


圖 4-2-1-1-(b) 在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 5μs 所觀測之波形

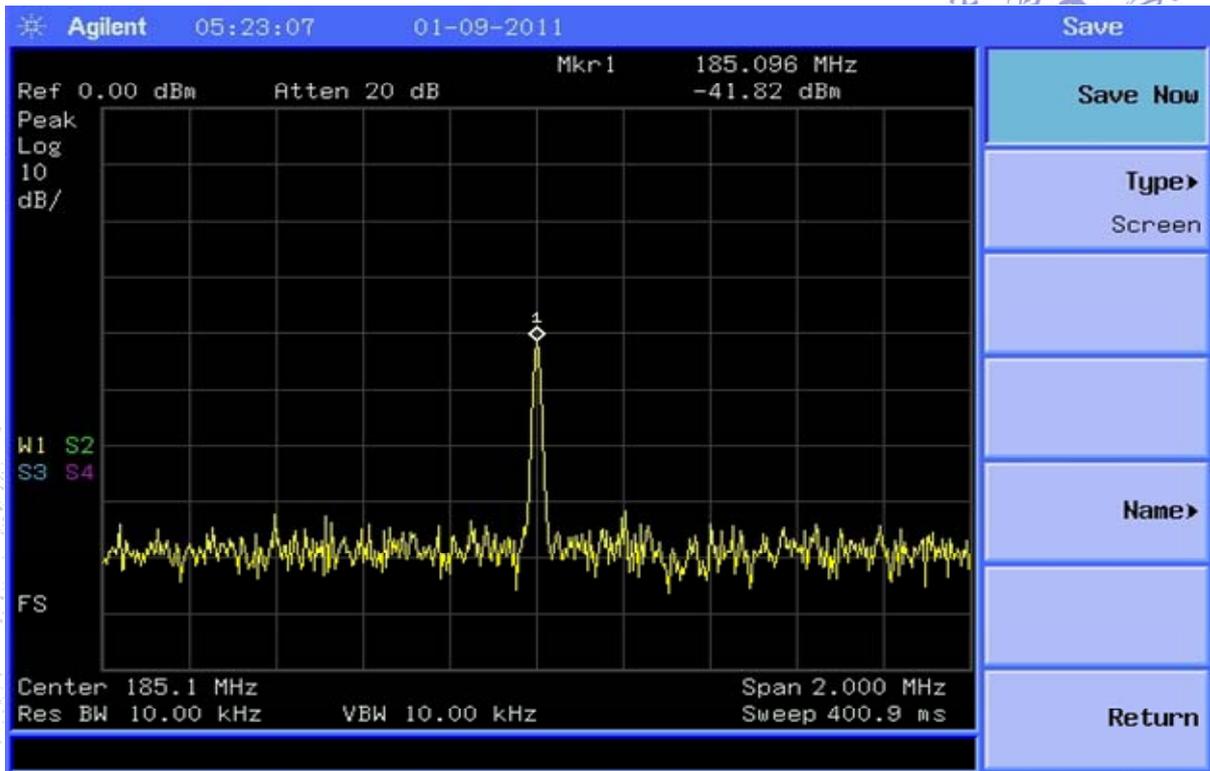


圖 4-2-1-2 在輸入功率為 720 mW，射頻頻譜分析儀下之圖形

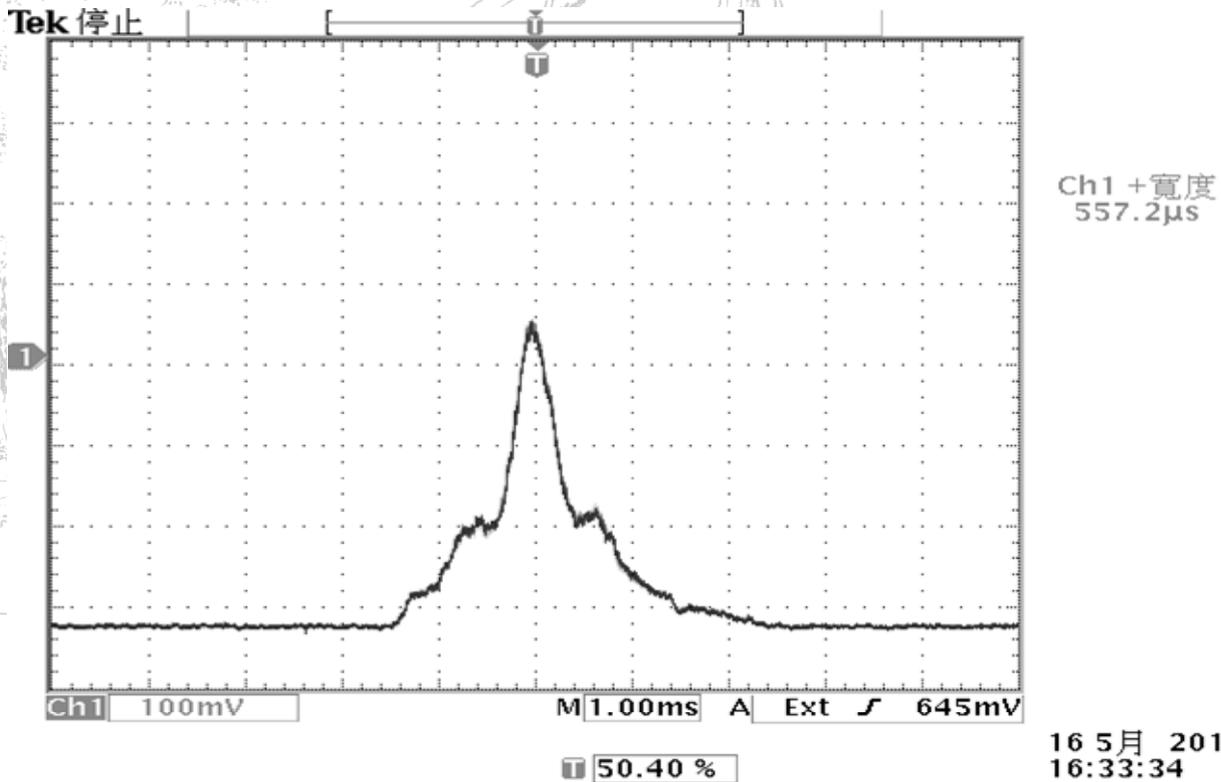


圖 4-2-1-3 在輸入功率為 720 mW，以自相關干涉儀測量之鎖模脈衝圖形

4.2.2 曲率半徑為 50 公分的鎖模

我們先使用光偵測器和示波器所觀測產生鎖模的情況，圖 4-2-2-1-(a) 示波器所觀測之 Q 開關鎖模，在輸入功率為 480 mW，示波器的橫軸為 $10\mu\text{s}$ 。圖 4-2-2-1-(b) 是示波器所觀測之連續波鎖模，在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 $5\mu\text{s}$ 。

圖 4-2-2-2 是射頻頻譜分析儀下脈衝之圖形，他是在輸入功率為 720 mW，此時所看到的是連續波鎖模雷射，他的頻率為 292.348 MHz。

圖 4-2-2-3 是自相關干涉儀下鎖模脈衝之圖形，他是在輸入功率為 720 mW，此時所看到的是單脈衝的圖形，換算後所得之脈衝的寬度為 11.5 ps。

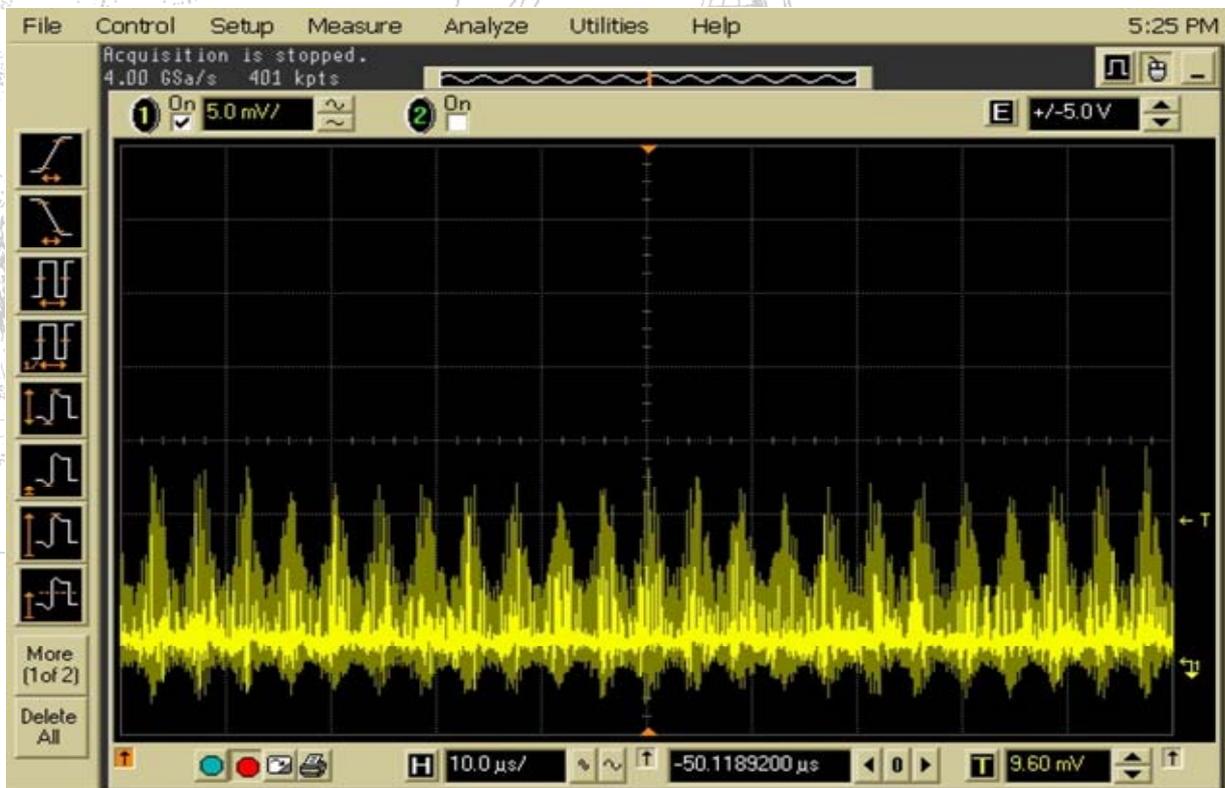


圖 4-2-2-1-(a) 在輸入功率為 480 mW，示波器的橫軸為 $10\mu\text{s}$ 所觀測之波形

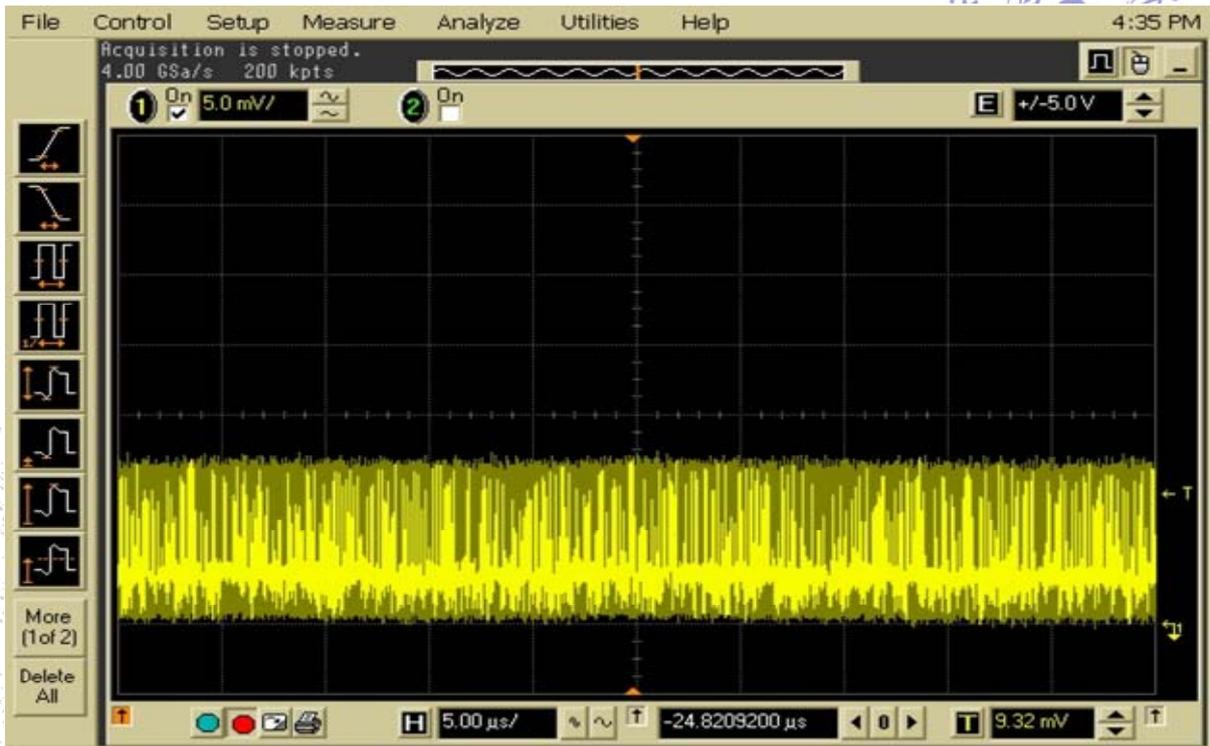


圖 4-2-2-1(b) 在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 5 μ s 所觀測之波形

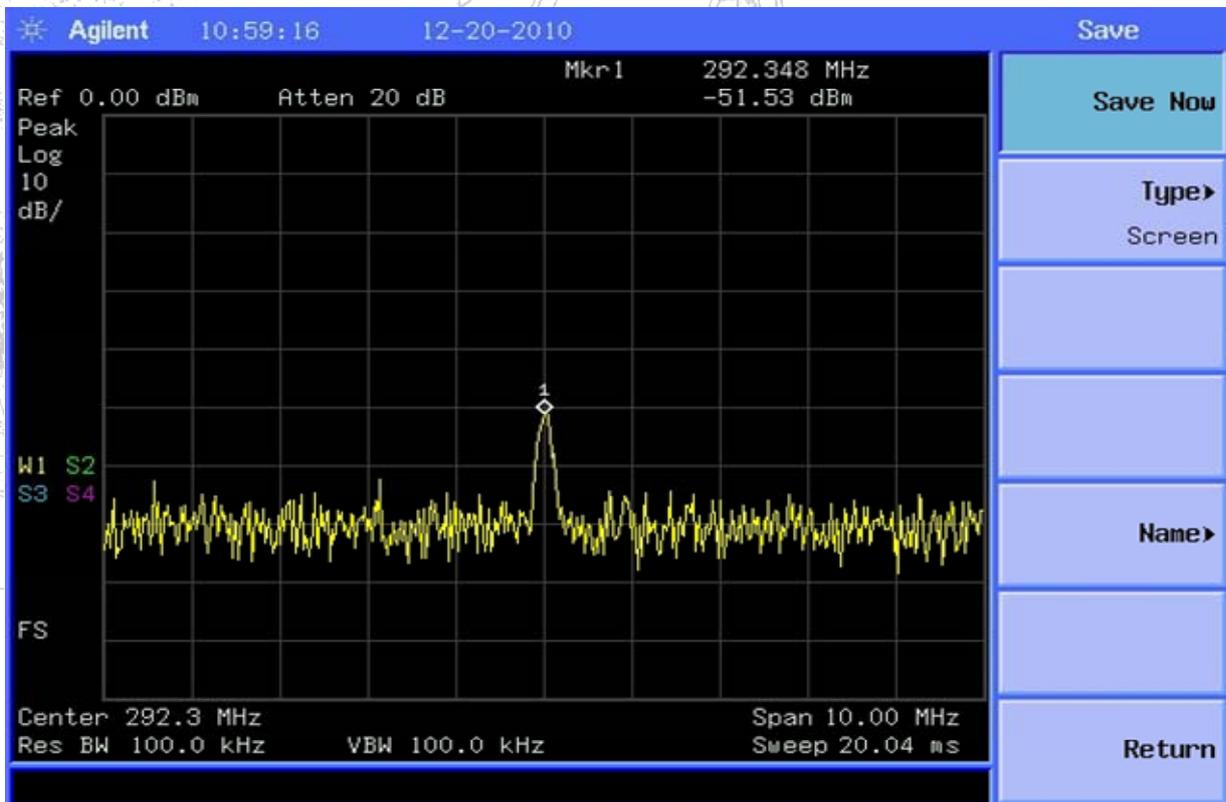


圖 4-2-2-2 在輸入功率為 720 mW，射頻頻譜分析儀下之圖形

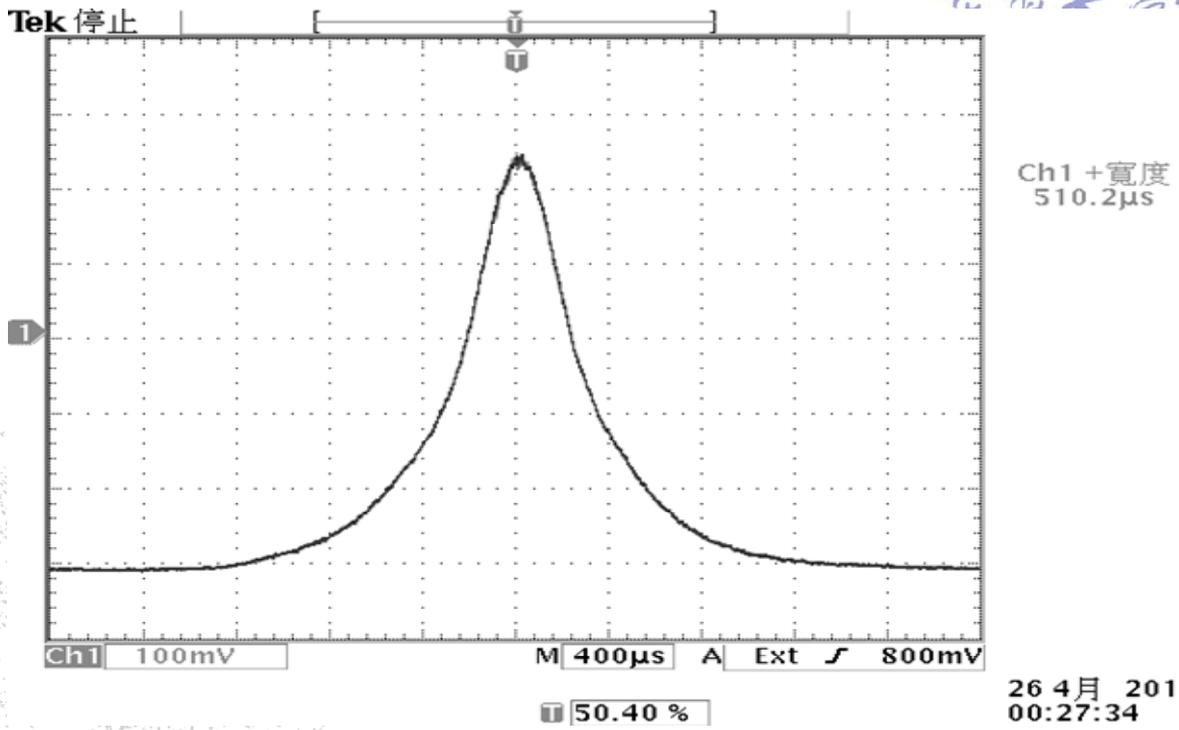
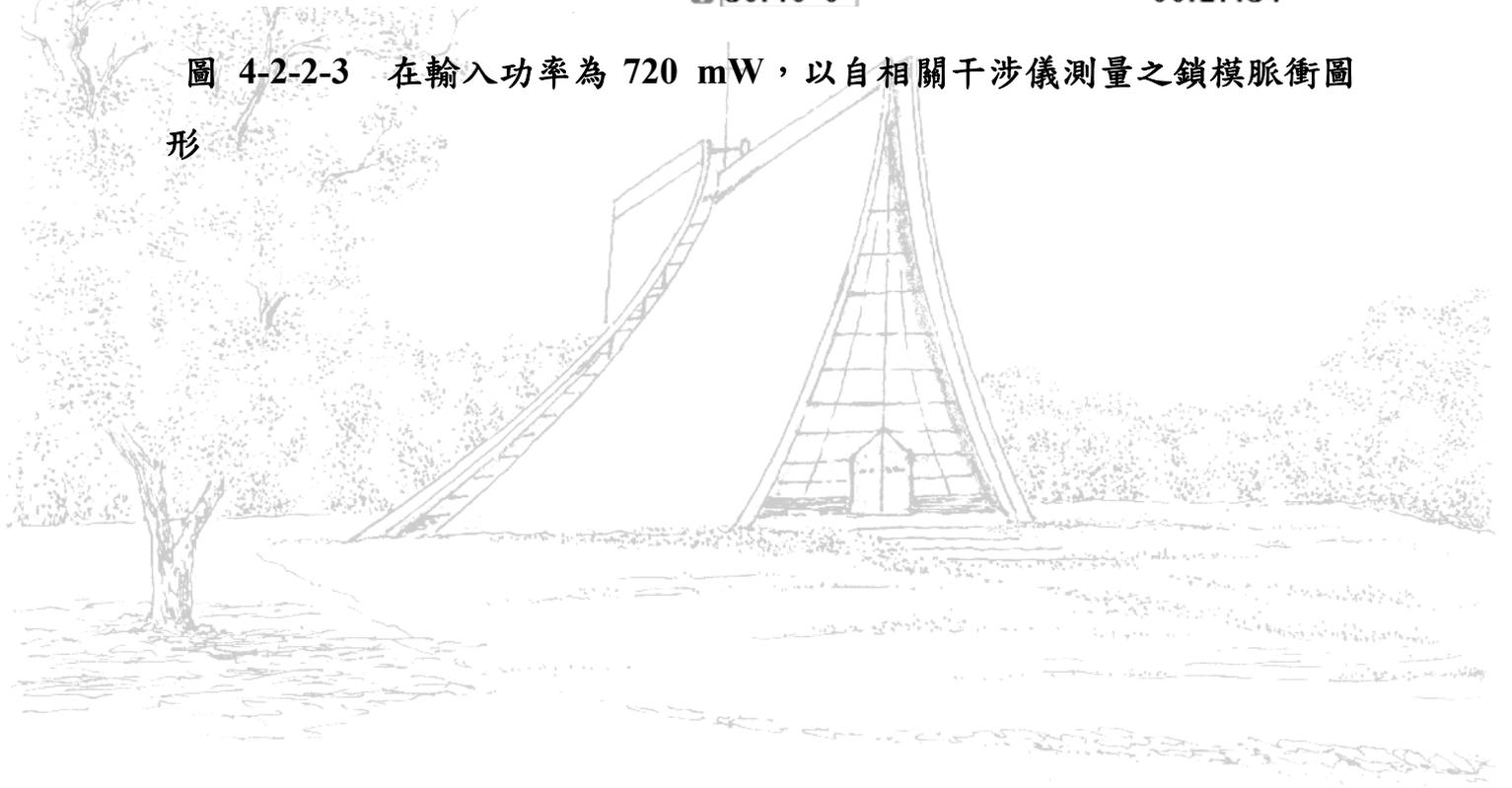


圖 4-2-2-3 在輸入功率為 720 mW，以自相關干涉儀測量之鎖模脈衝圖形



4.2.3 曲率半徑為 30 公分的鎖模

圖 4-2-3-1 是輸出功率和輸入功率之關係圖，Y 軸代表輸出功率，X 軸代表輸入功率。由圖可知我們可以得到最大輸入功率為 860 mW，輸出功率最大為 240mW。其中輸入功率為 50 mW 到 160m W 代表是連續波，160 mW 到 450 mW 代表是不穩定的 Q 開關鎖模，450 mW 到 660 mW 代表是穩定的 Q 開關鎖模，660 mW 到 860 mW 代表是產生連續波鎖模。

我們再使用光偵測器和示波器所觀測產生鎖模的情況，其中圖 4-2-3-2-(a) 代表是輸入功率為 375 mW，示波器的橫軸為 10 μ s，所觀測的波形，此波形顯示此時雷射的輸出為不穩定的 Q 開關鎖模。圖 4-3-3-2-(b) 代表是當輸入功率為 540 mW，示波器的橫軸為 10 μ s，所觀測的波形，此波形顯示此時雷射的輸出為穩定的 Q 開關鎖模。圖 4-3-3-2-(c) 代表是當輸入功率為 720mW，示波器的橫軸為 5 μ s，所觀測的波形，此波形顯示此時雷射的輸出為穩定的連續波鎖模。

圖 4-2-3-3 是射頻頻譜分析儀下脈衝之圖形，他是在輸入功率為 720mW，此時所看到的是連續波鎖模雷射，他的頻率為 479.283 MHz。

圖 4-2-3-4 是自相關干涉儀下鎖模脈衝之圖形，他是在輸入功率為 720mW，此時所看到的是單脈衝圖形，換算後所得之脈衝的寬度為 12.8 ps。

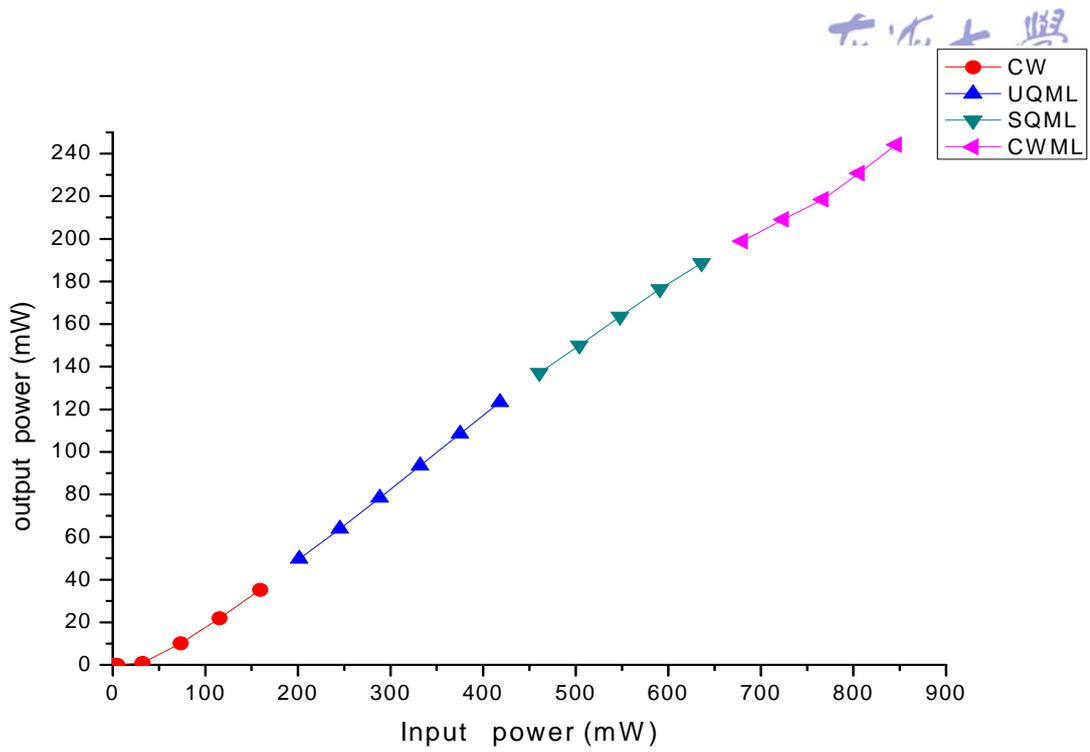


圖 4-2-3-1 輸入功率和輸出功率之關係圖

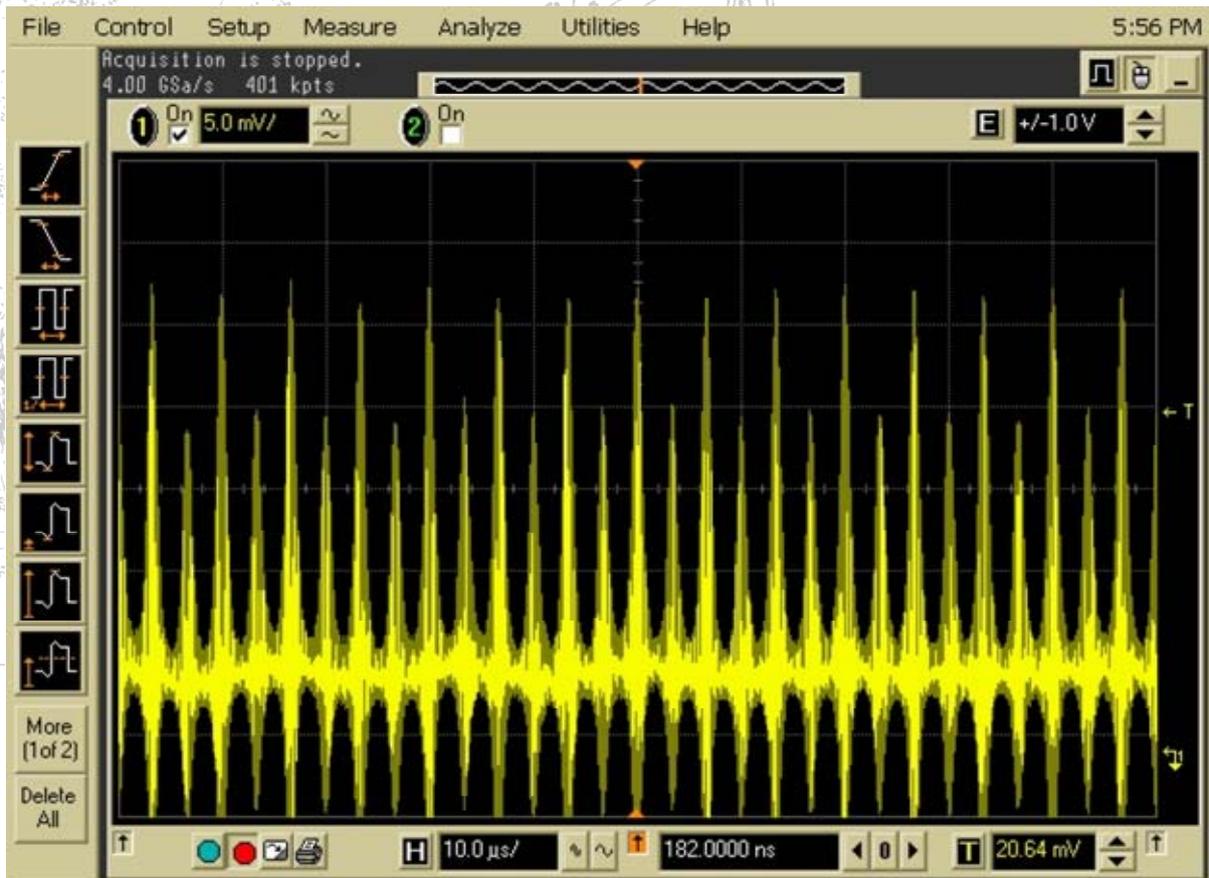


圖 4-2-3-2-(a)在輸入功率為 375 mW，示波器的橫軸為 10 μ s 所觀測之波形

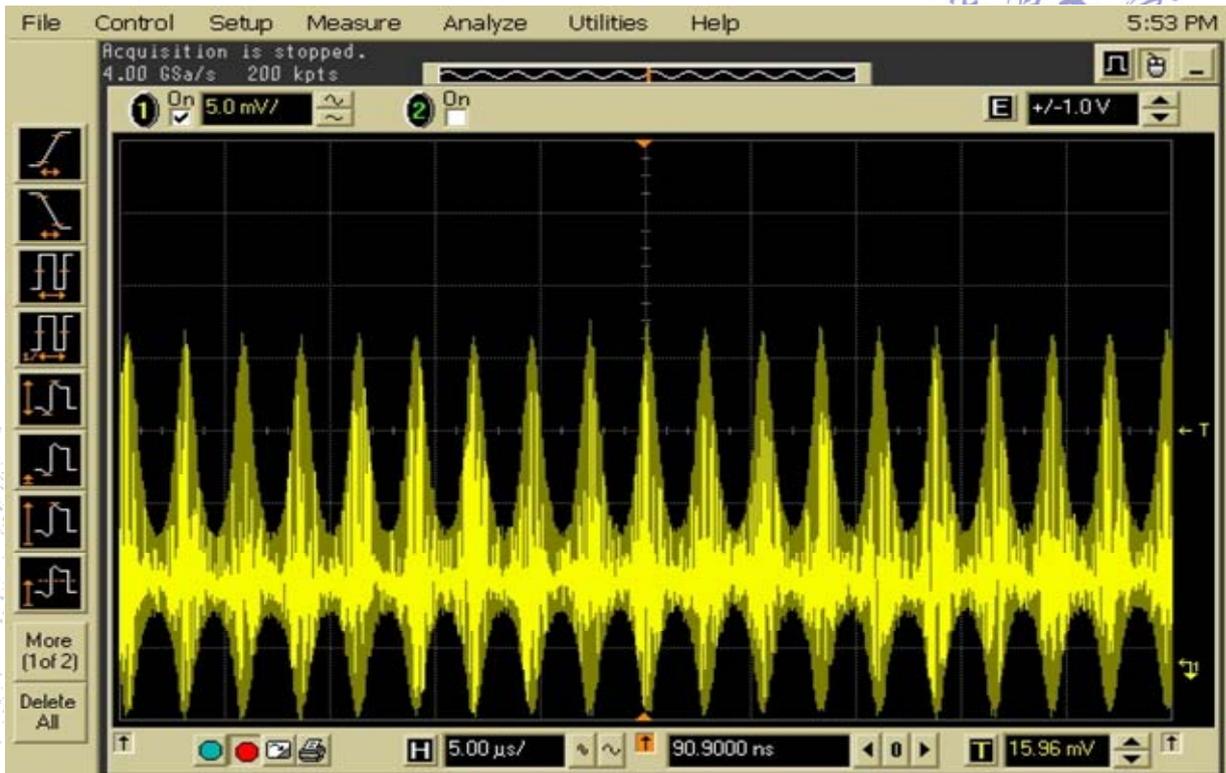


圖 4-2-3-2-(b) 在輸入功率為 540 mW，示波器的橫軸為 5 μ s 所觀測之波形

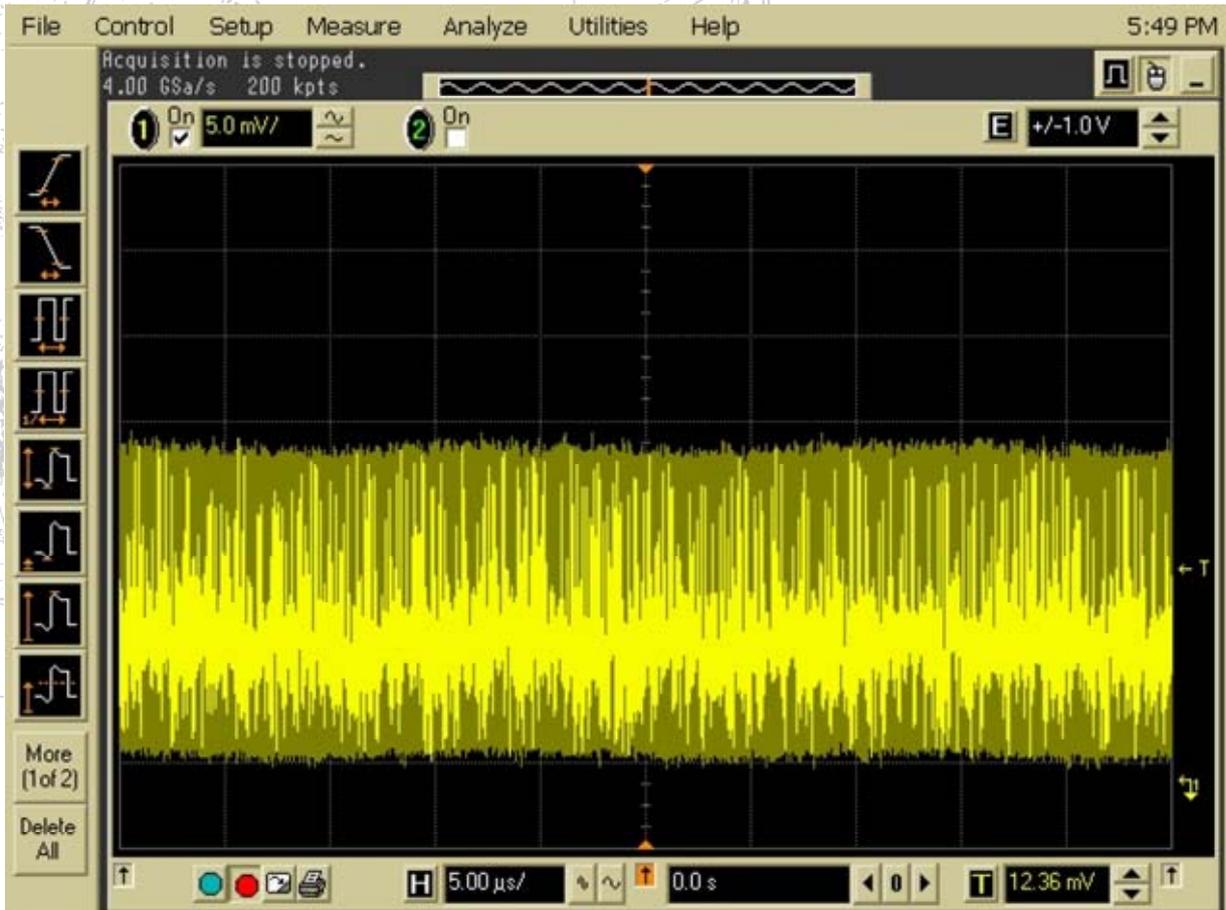


圖 4-2-3-2-(c) 在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 5 μ s，所觀測之波形

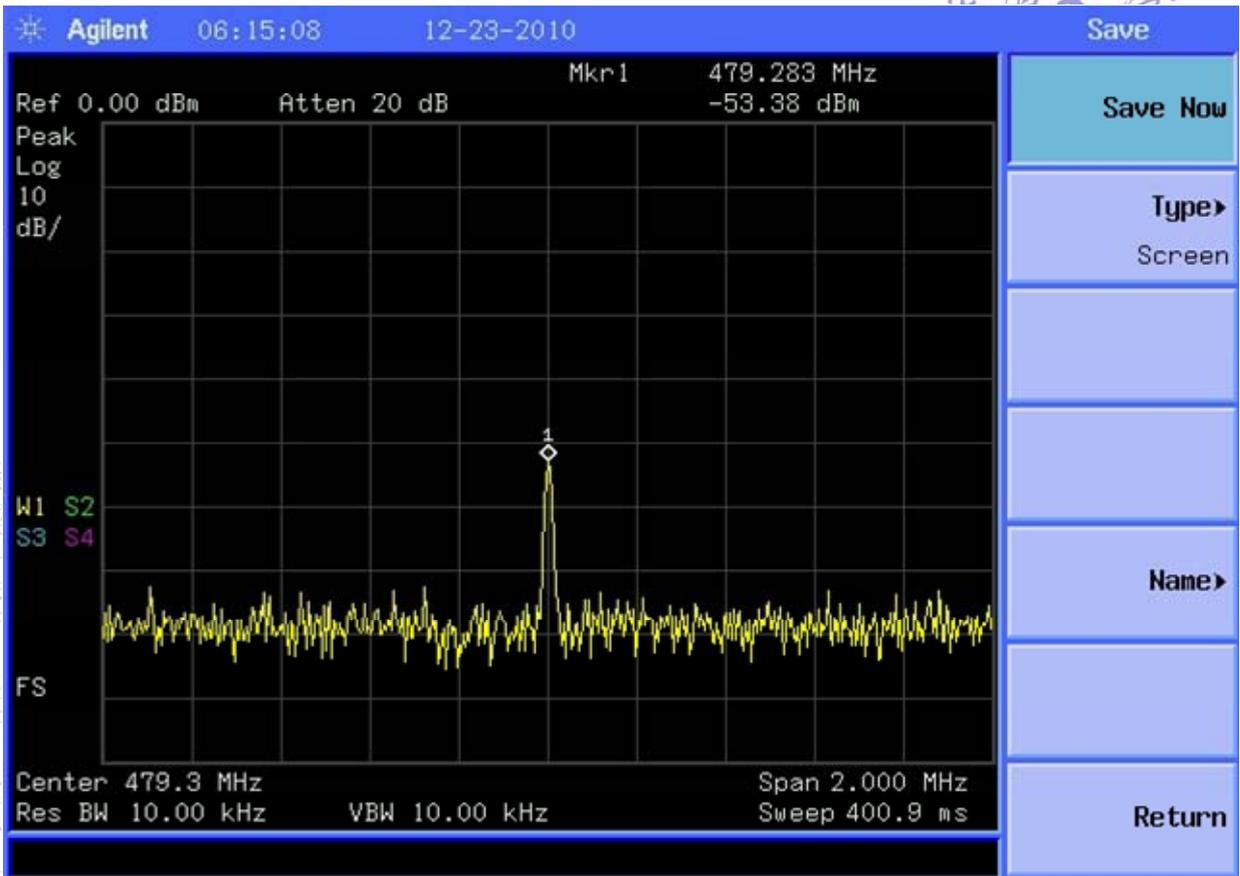


圖 4-2-3-3 在輸入功率為 720 mW，射頻頻譜分析儀下之圖形

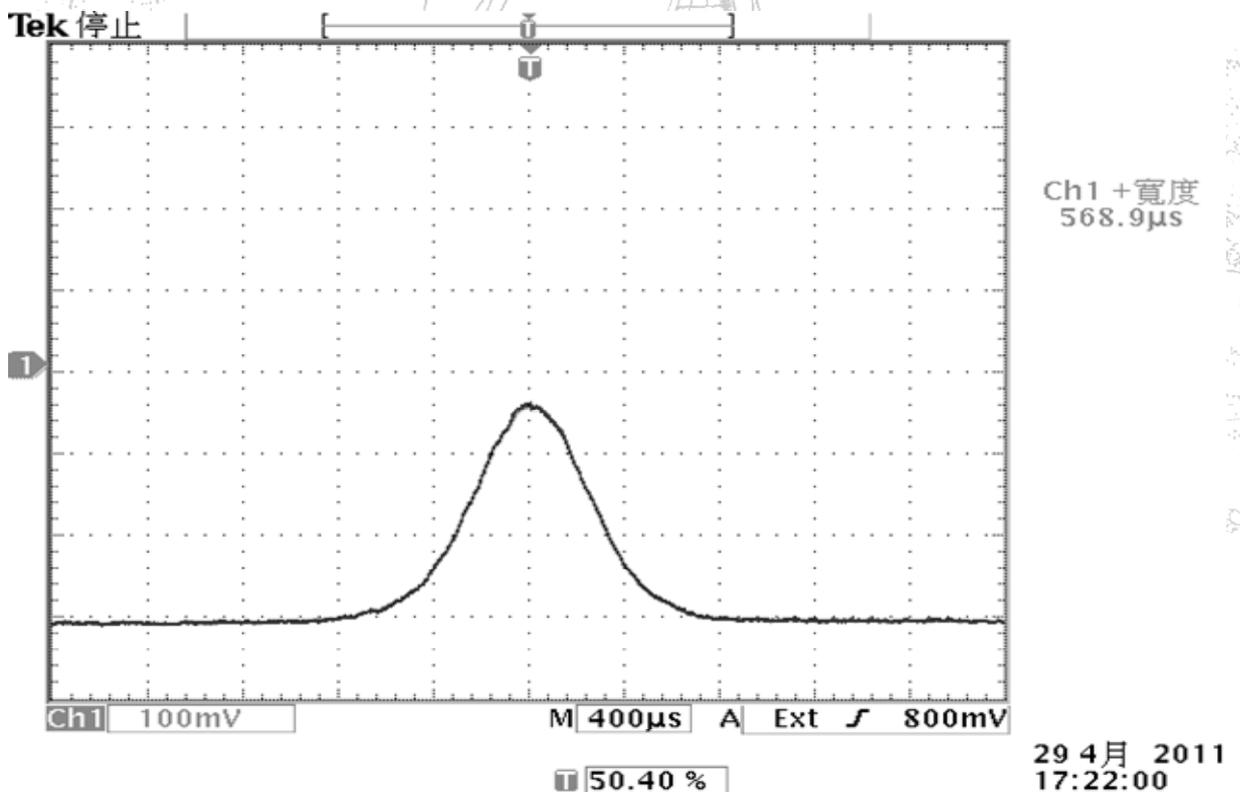


圖 4-2-3-4 在輸入功率為 720 mW，以自相關干涉儀測量之鎖模脈衝圖形

4.2.4 曲率半徑為 15 公分的鎖模

我們先使用光偵測器和示波器所觀測產生鎖模的情況，圖 4-2-4-1 是示波器所觀測之連續波鎖模，在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 20 μ s 所產生的連續波鎖模的圖形。

圖 4-2-4-2 是射頻頻譜分析儀下脈衝之圖形，是在輸入功率為 720 mW，此時所看到的是連續波鎖模雷射，他的頻率為 913.952 MHz。

圖 4-2-4-3 是自相關干涉儀下鎖模脈衝之圖形，是在輸入輸入功率為 720 mW，此時所看到的是單脈衝雷射，換算後所得之脈衝的寬度為 9.5 ps。

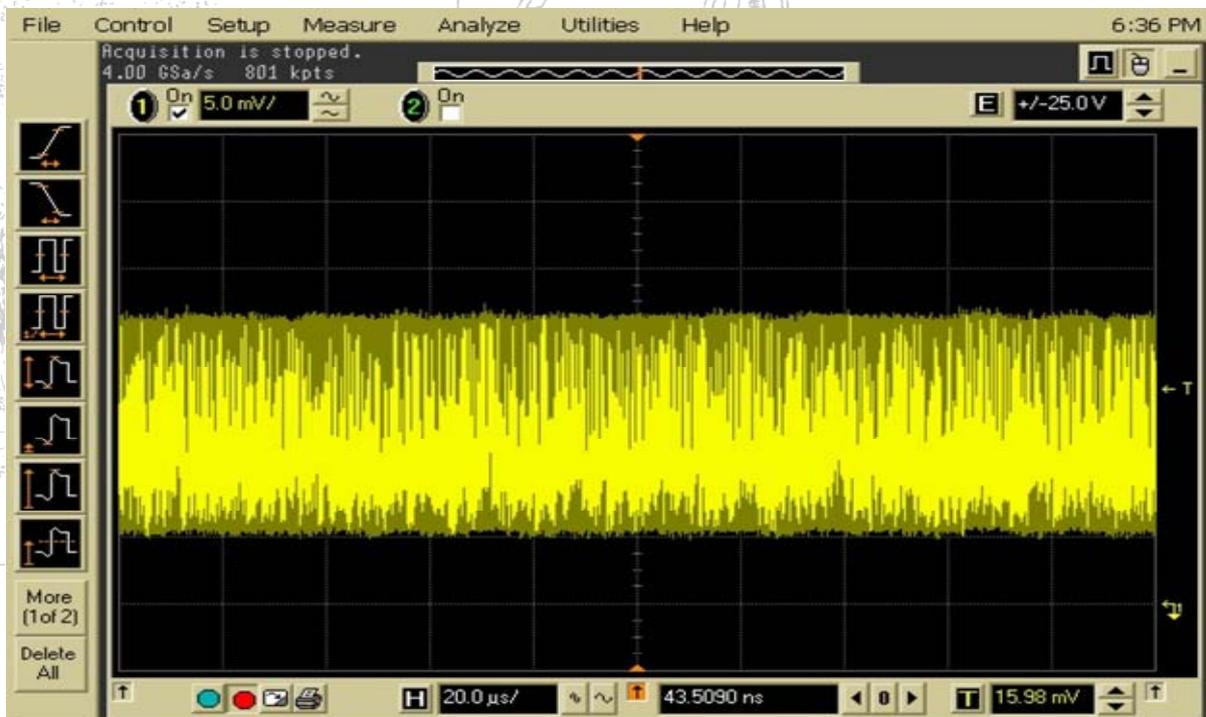


圖 4-2-4-1 在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 20 μ s 所觀測之波形

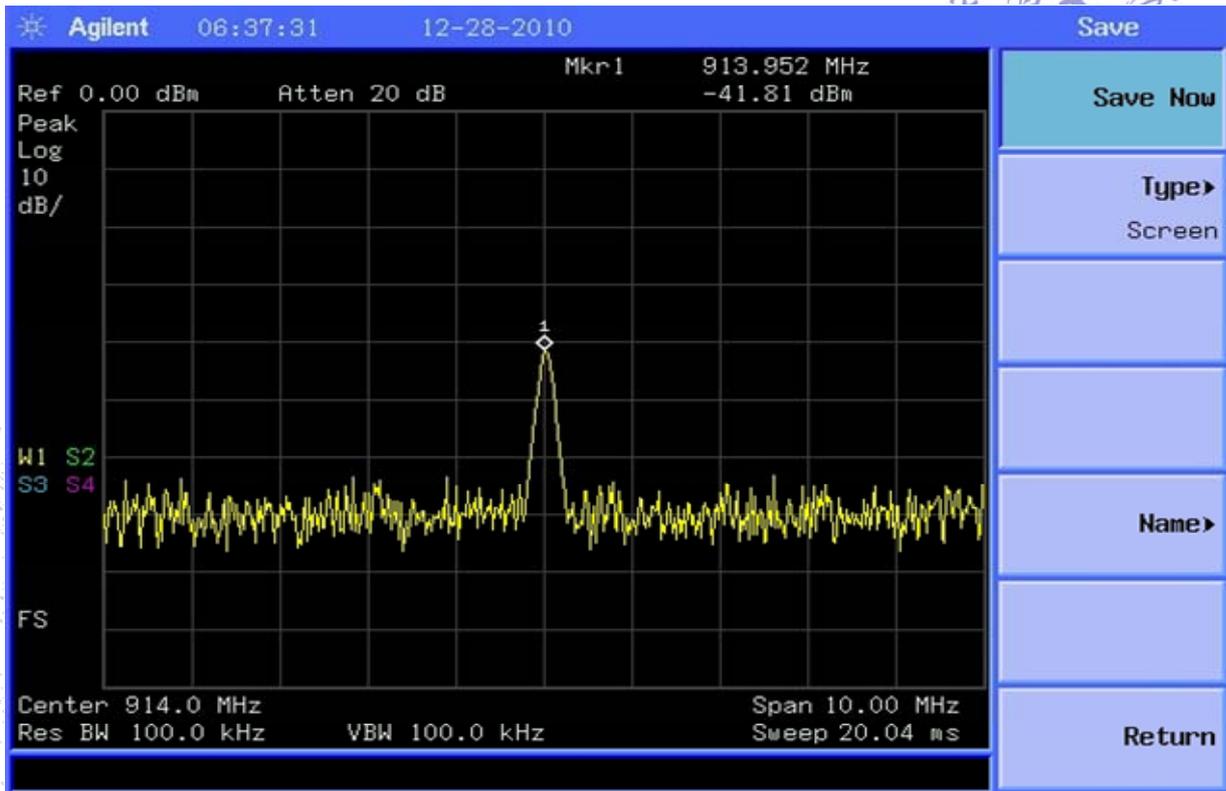


圖 4-2-4-2 在輸入功率為 720 mW，射頻頻譜分析儀下之圖形

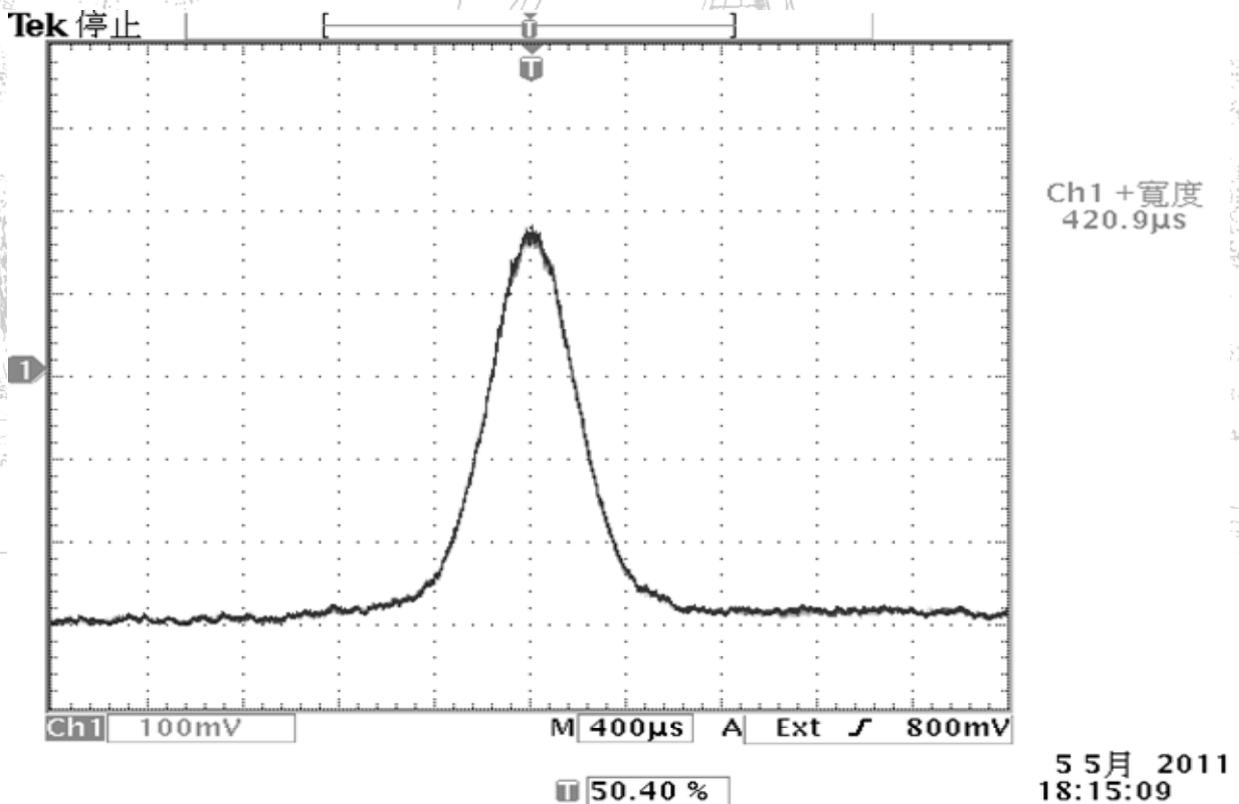
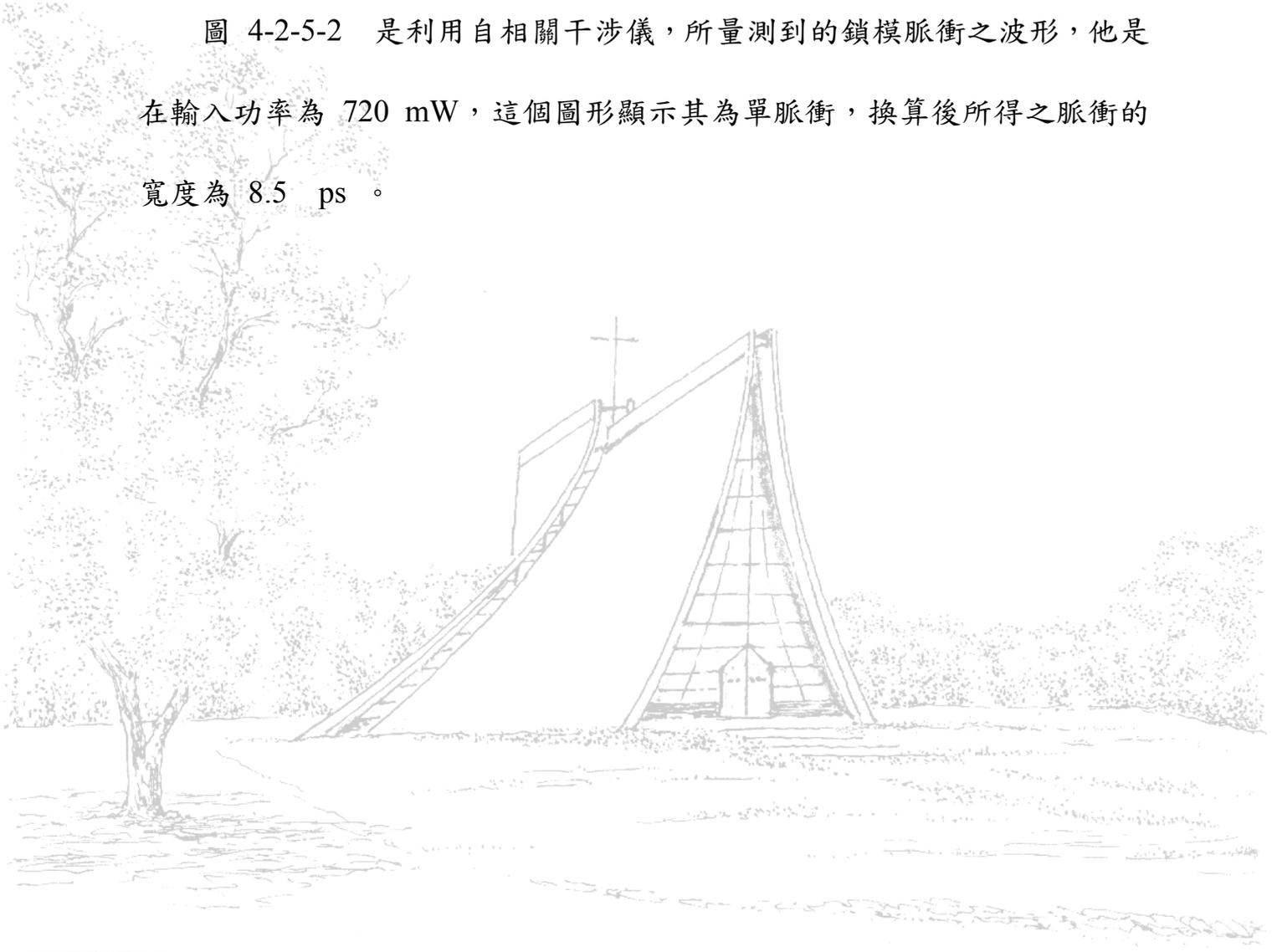


圖 4-2-4-3 在輸入功率為 720 mW，以自相關干涉儀測量之鎖模脈衝圖形

4.2.5 曲率半徑為 10 公分的鎖模

圖 4-2-5-1 是在曲率半徑為 10 公分，他是在輸入功率為 720 mW，用射頻頻譜分析儀所量測到的脈衝頻譜，此頻譜顯示為連續波鎖模雷射，他的重覆頻率為 1.32348 GHz。

圖 4-2-5-2 是利用自相關干涉儀，所量測到的鎖模脈衝之波形，他是在輸入功率為 720 mW，這個圖形顯示其為單脈衝，換算後所得之脈衝的寬度為 8.5 ps。



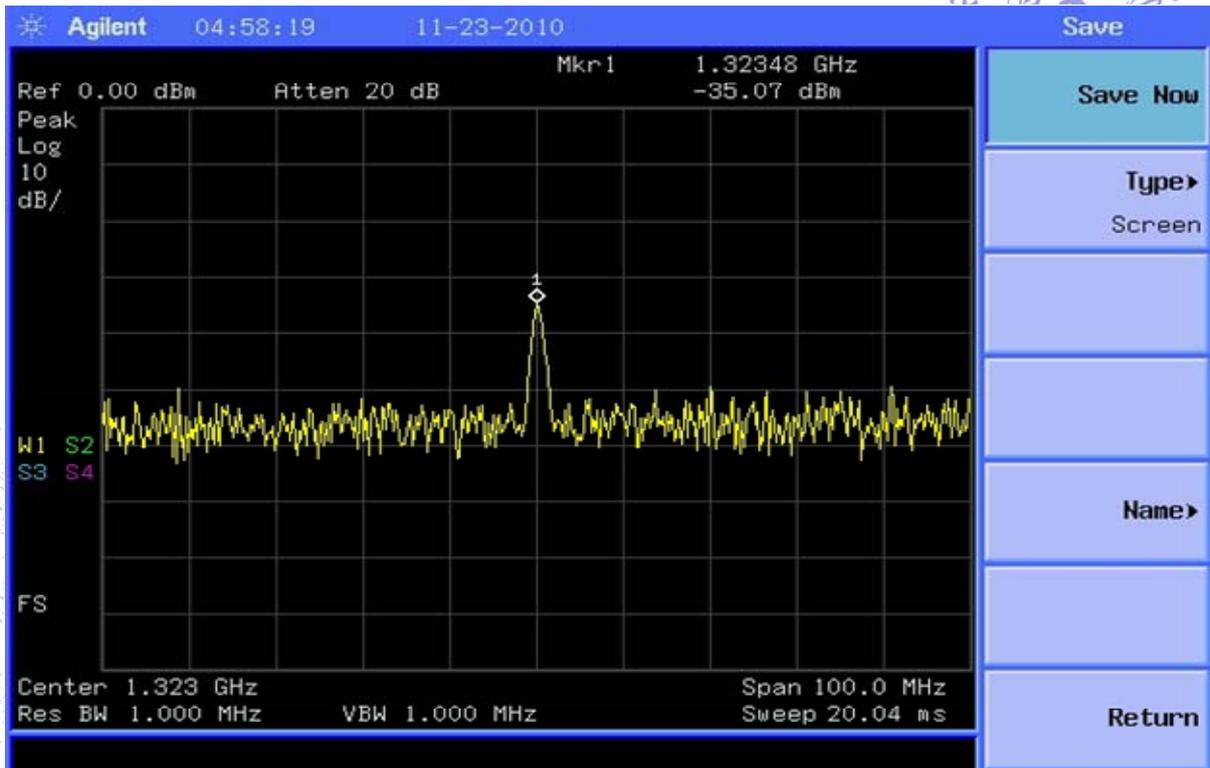


圖 4-2-5-1 在輸入功率為 720 mW，射頻頻譜分析儀下之圖形

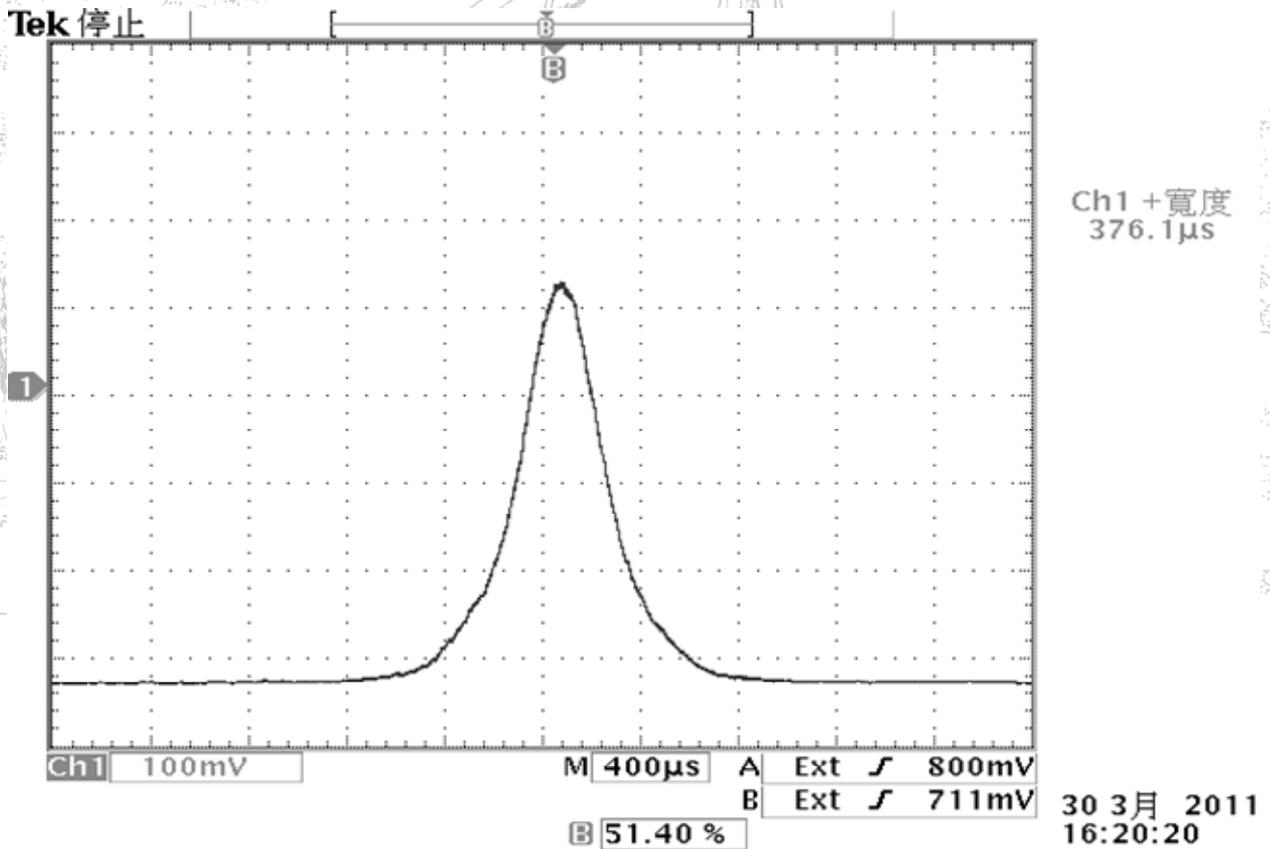
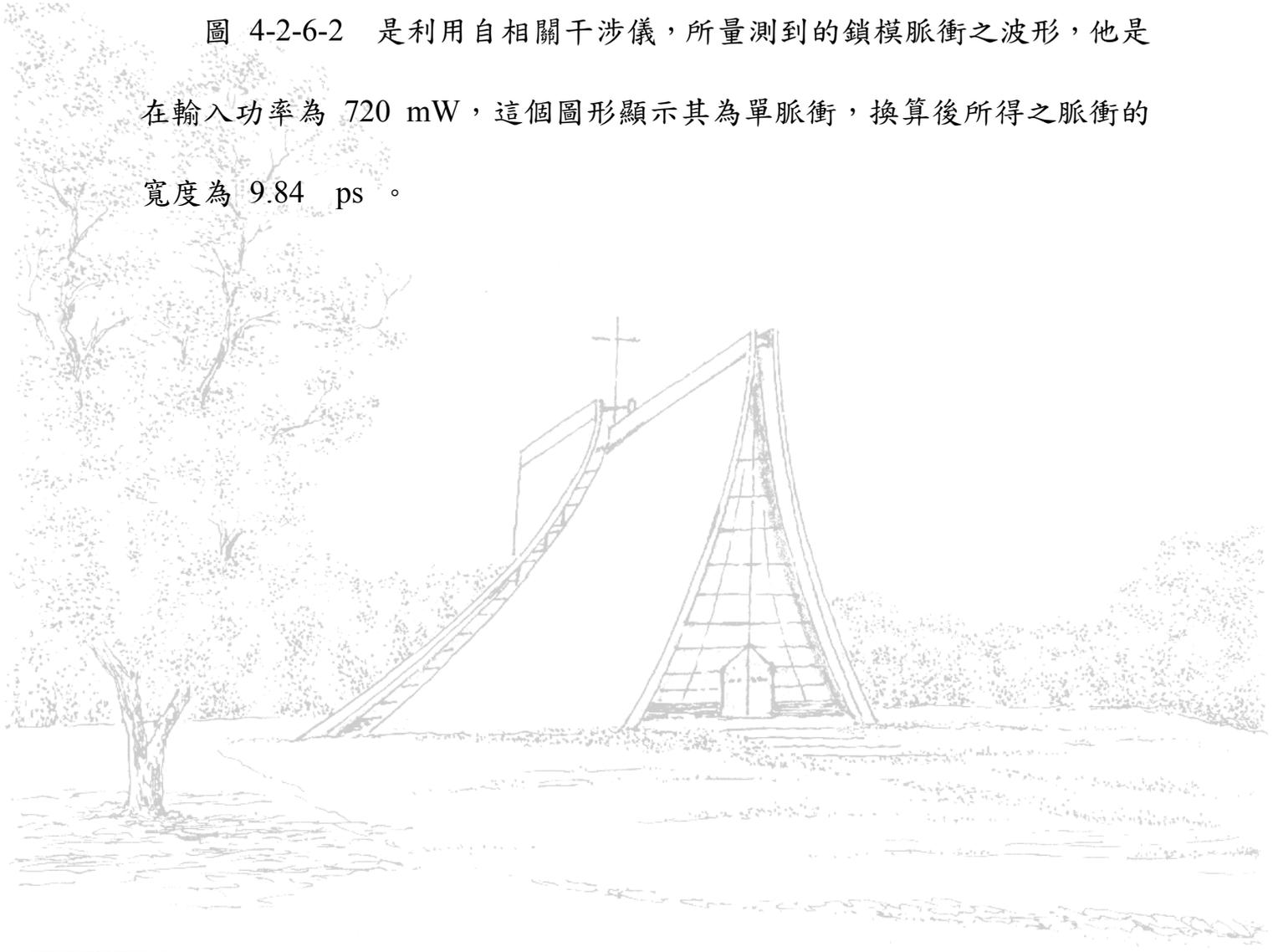


圖 4-2-5-2 在輸入功率為 720 mW，以自相關干涉儀測量之鎖模脈衝圖形

4.2.6 曲率半徑為 8 公分的鎖模

圖 4-2-6-1 是在曲率半徑為 8 公分，他是在輸入功率為 720 mW，用射頻頻譜分析儀所量測到的脈衝頻譜，此頻譜顯示為連續波鎖模雷射，他的重覆頻率為 1.62520 GHz。

圖 4-2-6-2 是利用自相關干涉儀，所量測到的鎖模脈衝之波形，他是在輸入功率為 720 mW，這個圖形顯示其為單脈衝，換算後所得之脈衝的寬度為 9.84 ps。



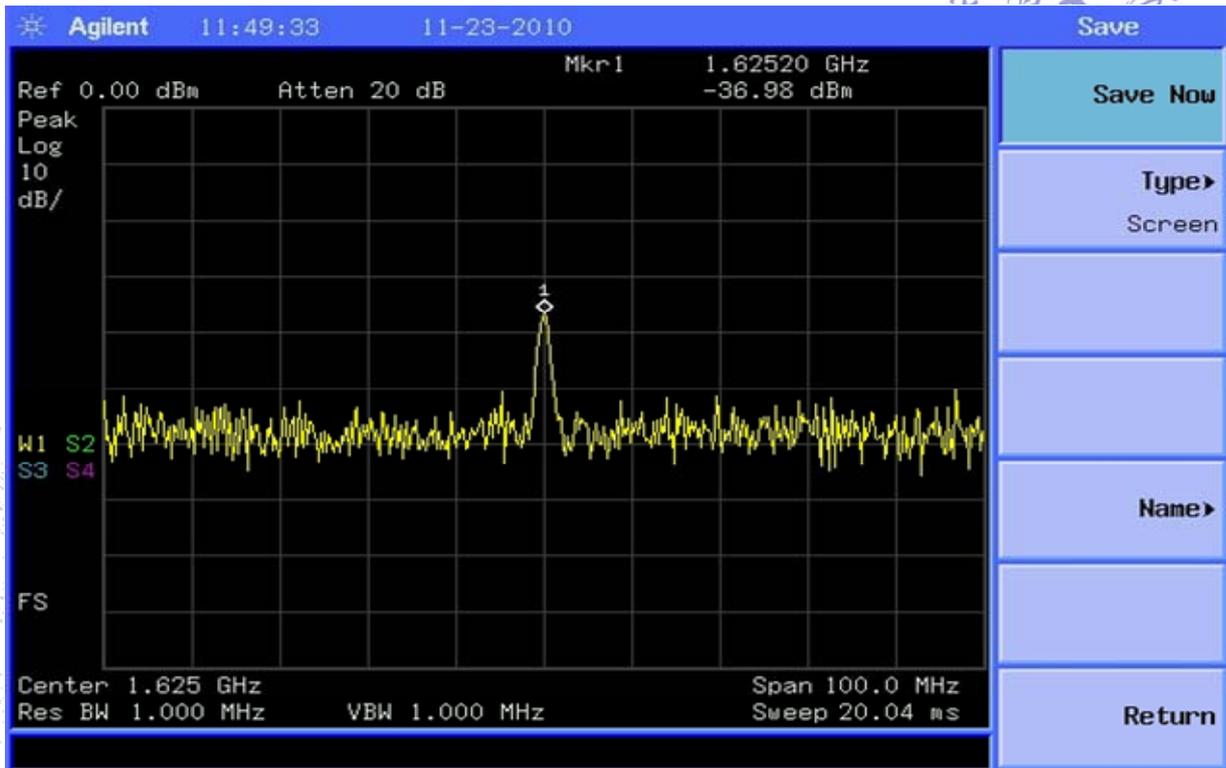


圖 4-2-6-1 在輸入功率為 720 mW，射頻頻譜分析儀下之圖形

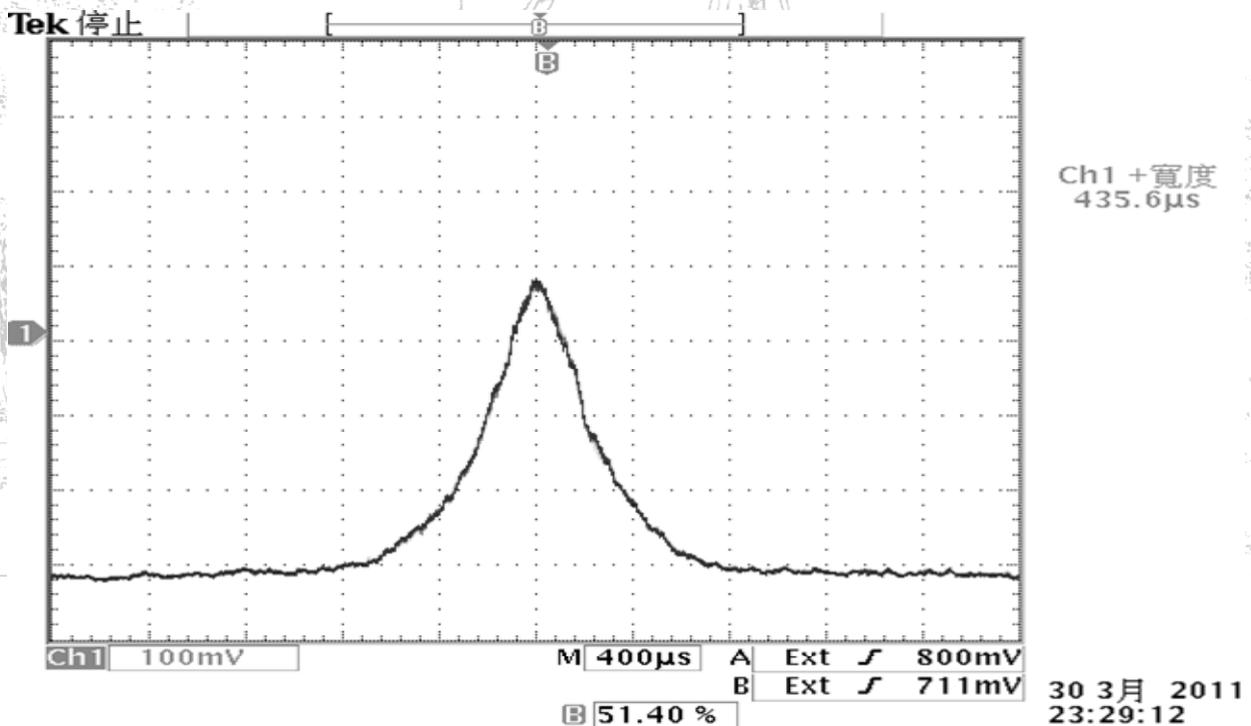


圖 4-2-6-2 在輸入功率為 720 mW，以自相關干涉儀測量之鎖模脈衝圖形

4.2.7 曲率半徑為 5 公分的鎖模

我們使用示波器所觀測產生鎖模的情況，圖 4-2-7-1 是示波器所觀測之波形，輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 $5\mu\text{s}$ 。因為他的頻率很高，故使用示波器無法觀測連續波鎖模雷射。

圖 4-2-7-2 是射頻頻譜分析儀下脈衝之圖形，他是在輸入功率為 720 mW，此時所看到的是連續波鎖模雷射，他的頻率為 2.5362565 GHz。

圖 4-2-7-3 是自相關干涉儀下鎖模脈衝之圖形，他是在輸入功率為 720 mW，此時所看到的是單脈衝的圖形，換算後所得之脈衝的寬度為 14.7 ps。

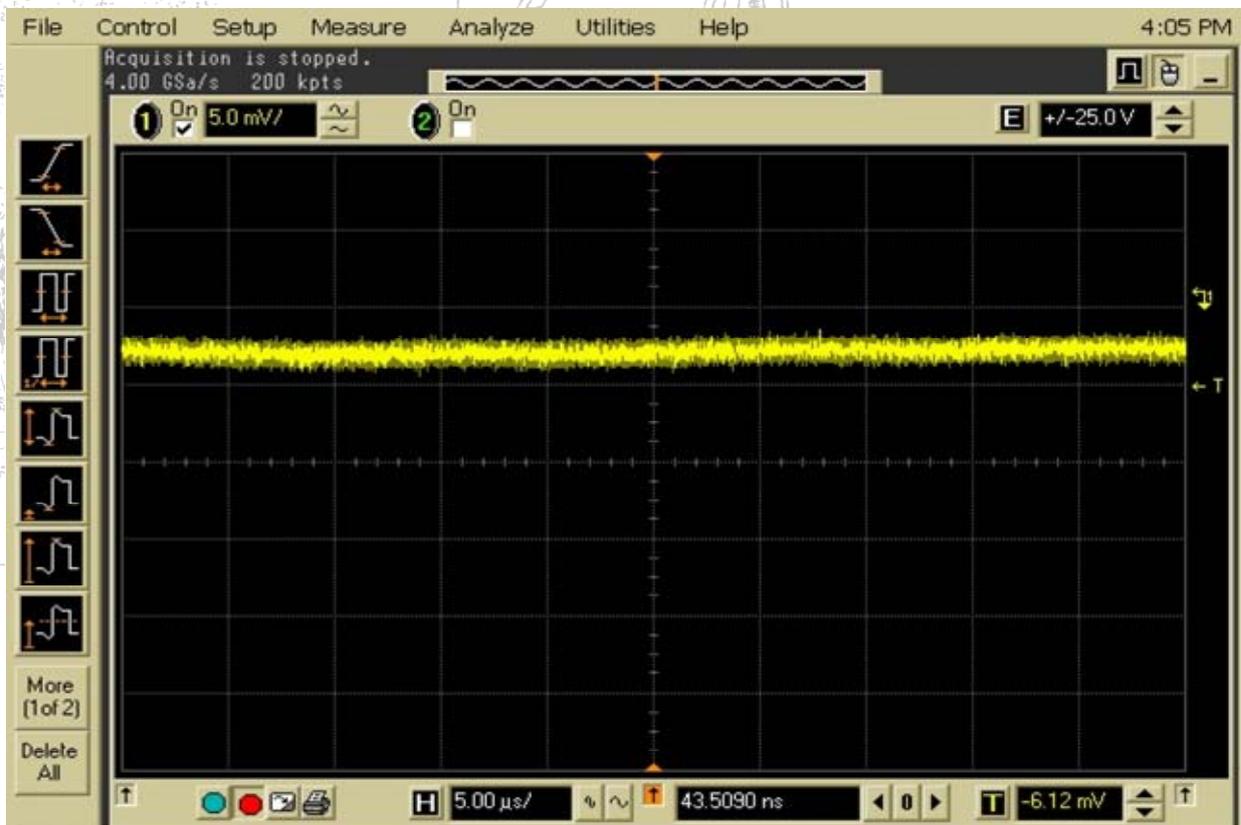


圖 4-2-7-1 在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 $5\mu\text{s}$ 所觀測之波形

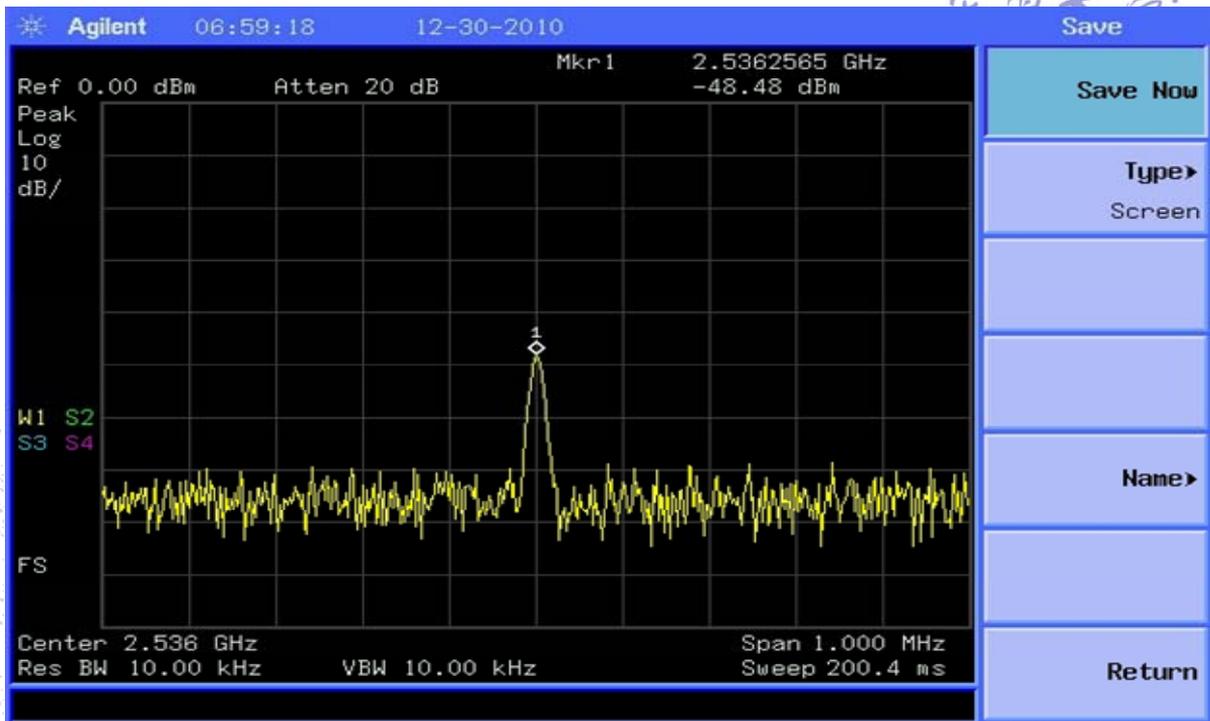


圖 4-2-7-2 在輸入功率為 720 mW，射頻頻譜分析儀下之圖形

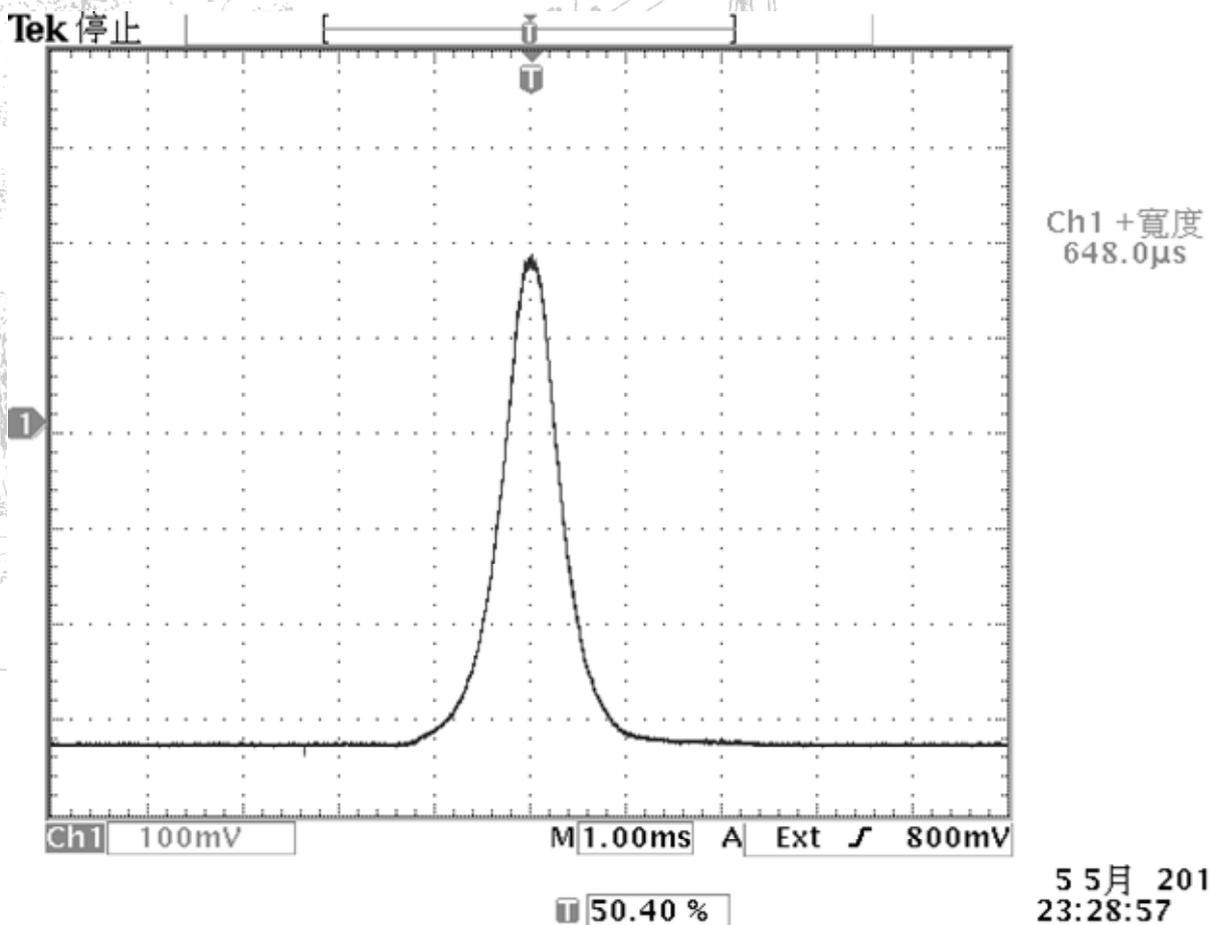


圖 4-2-7-3 在輸入功率為 720 mW，以自相關干涉儀測量之鎖模脈衝圖形

4-3 換飽和吸收鏡為 $A_0 = 2\%$ 的半導體飽和吸收鏡(SESAM)

由前一節做了腔長的改變，我們就試著再改變飽和吸收鏡為 $A_0 = 2\%$ 的半導體飽和吸收鏡(SESAM)，曲率半徑從 80 公分的位置到 30 公分的位置。

4.3.1 曲率半徑為 80 公分的鎖模

我們的架構是換 Nd:YVO₄(厚的) 雷射晶體，和飽和吸收鏡為 $A_0 = 2\%$ 的半導體飽和吸收鏡(SESAM)，曲率半徑為 80cm。在這個裝置之下，由於示波器無法產生連續波鎖模，所以沒記錄任何資料。

4.3.2 曲率半徑為 50 公分的鎖模

我們使用示波器所觀測產生鎖模的情況，圖 4-3-2-1-(a) 是示波器所觀測之 Q 開關鎖模，是輸入功率為 540 mW，示波器的橫軸為 10 μ s，所觀測的波形，此波形顯示此時雷射的輸出為穩定的 Q 開關鎖模。

圖 4-3-2-1-(b) 是示波器所觀測之連續波鎖模，輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 10 μ s，所觀測的波形，此波形顯示此時雷射的輸出為穩定的連續波鎖模。

圖 4-3-2-2 是射頻頻譜分析儀下脈衝之圖形，他是在輸入功率為 720 mW，此時所看到的是連續波鎖模雷射，他的頻率為 295.84MHz。

圖 4-3-2-3 是自相關干涉儀下鎖模脈衝之圖形，他是在輸入功率為 540 mW，此時所看到的是多脈衝的圖形，換算後所得之脈衝的寬度為 11.1

ps。

我們在這個實驗過程中,在晶體 Nd:YVO4 (厚的), 和飽和吸收鏡為 $A_0 = 2\%$ 的半導體飽和吸鏡, 在曲率半徑 50cm, 若產生穩定的 Q 開關鎖模, 則有自相關干涉儀下(Autocorrelator)鎖模脈衝的圖形, 若產生連續波鎖模, 則沒有自相關干涉儀下鎖模脈衝的圖形。

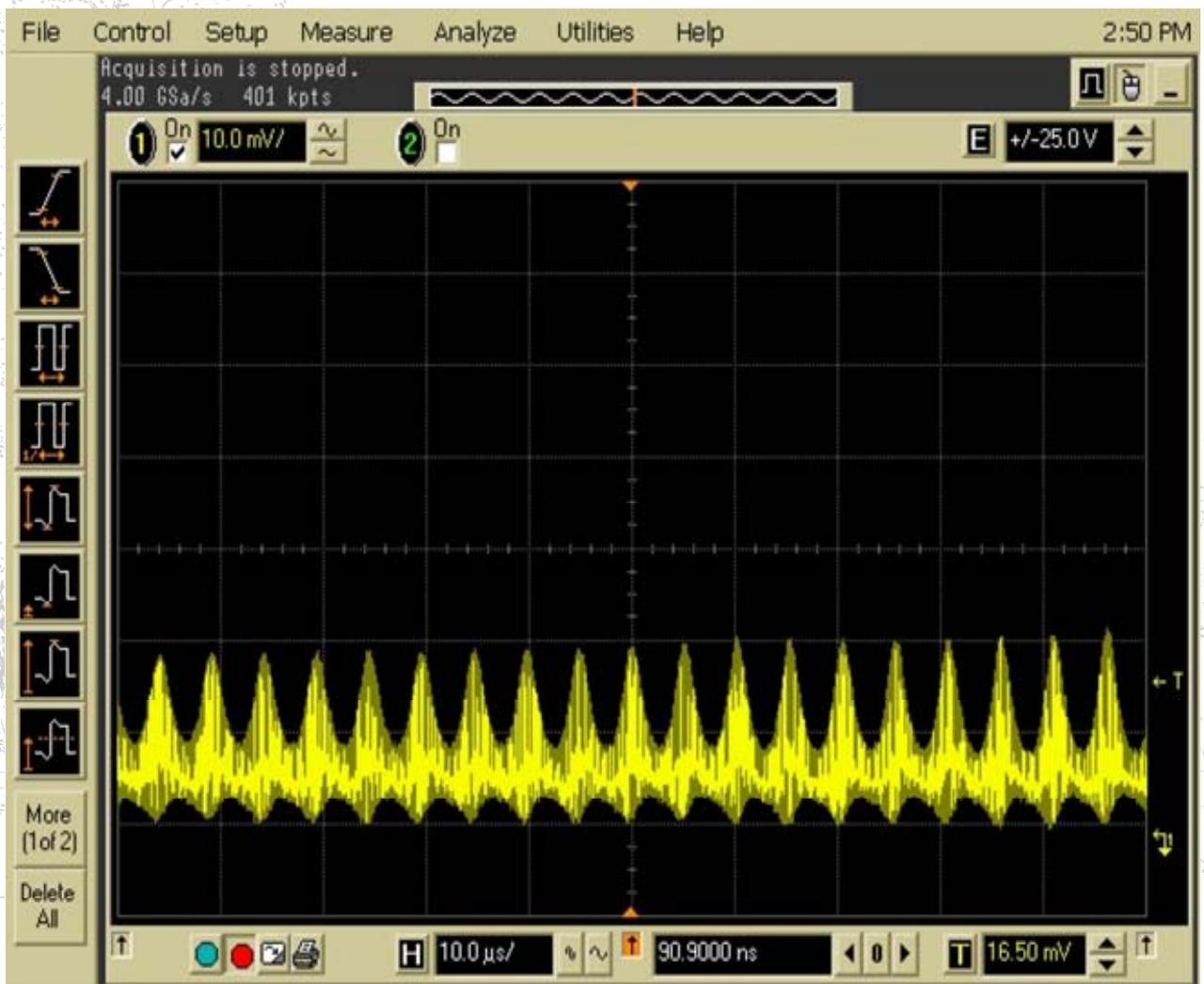


圖 4-3-2-1-(a) 在輸入功率為 540 mW，示波器的橫軸為 10μs 所觀測之波形

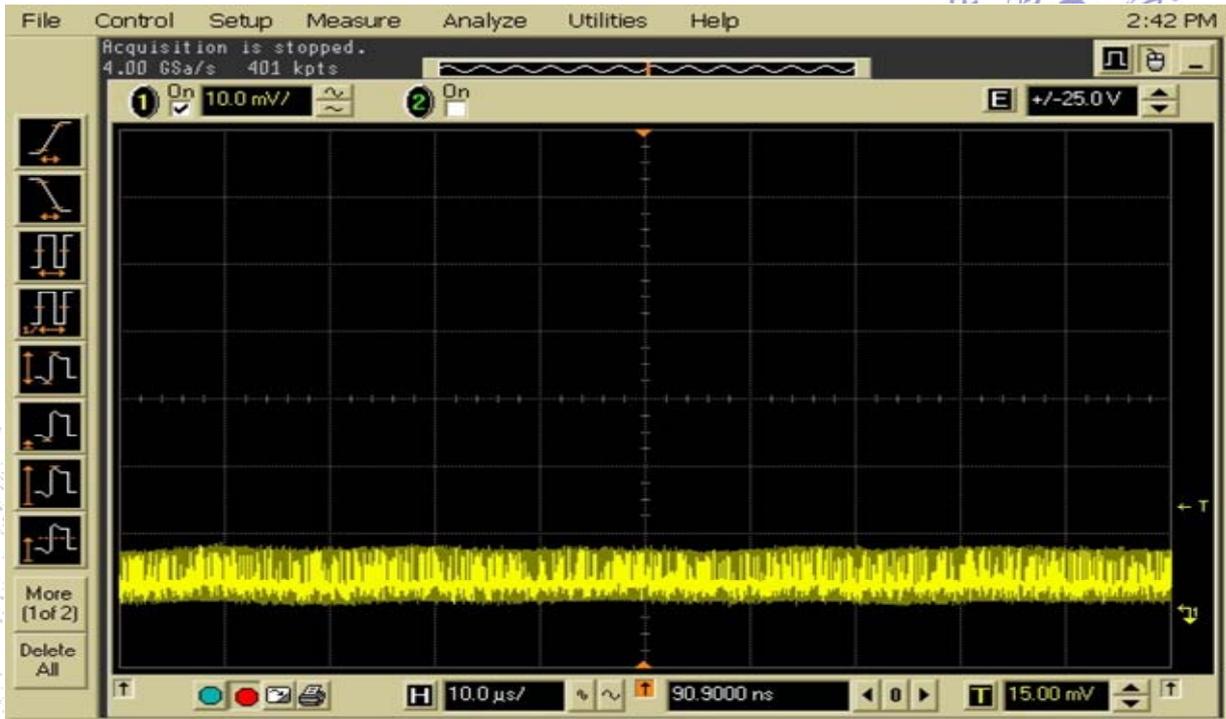


圖 4-3-2-1(b) 在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 10 μ s，所觀測之波形

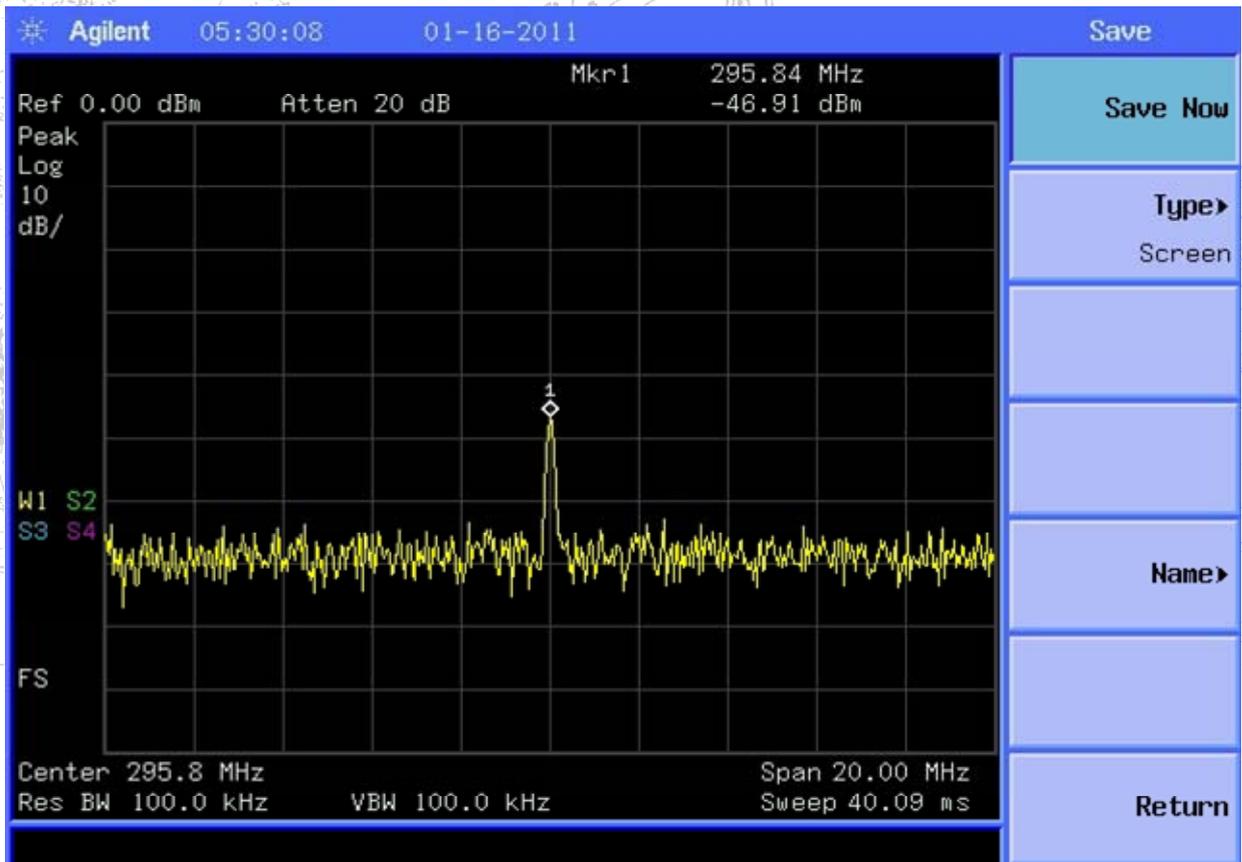


圖 4-3-2-2 在輸入功率為 720 mW，射頻頻譜分析儀下之圖形

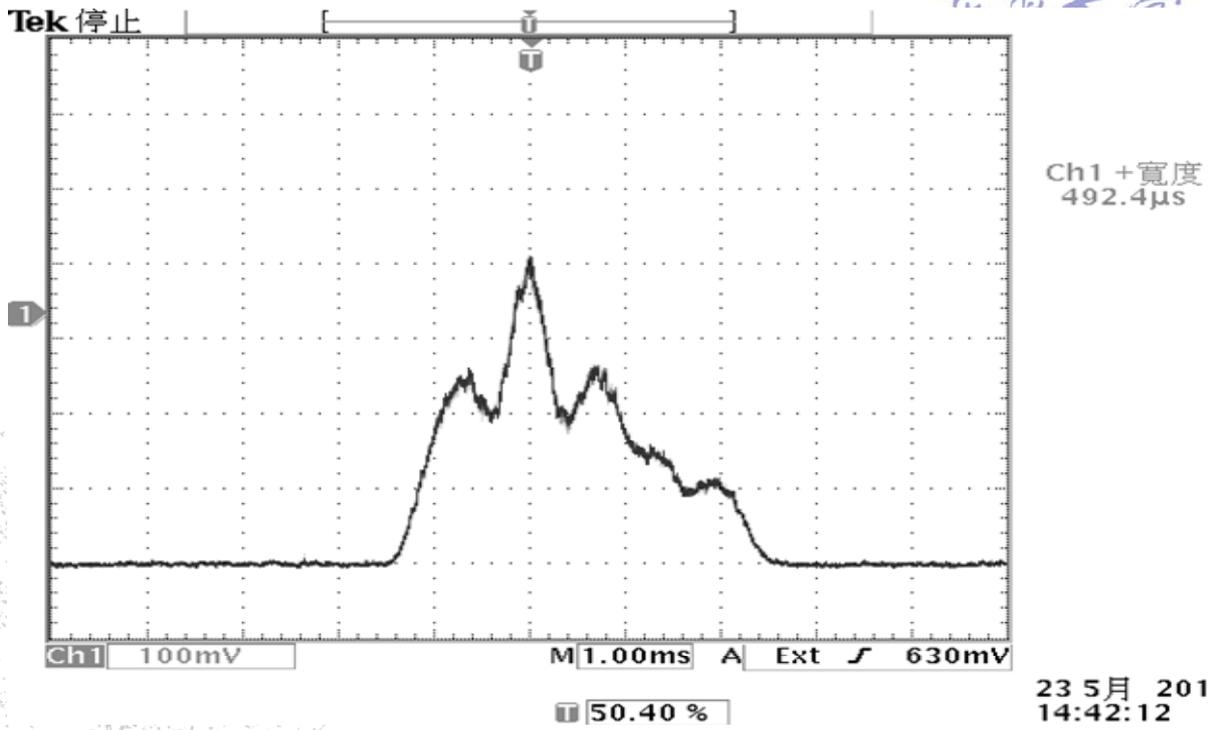
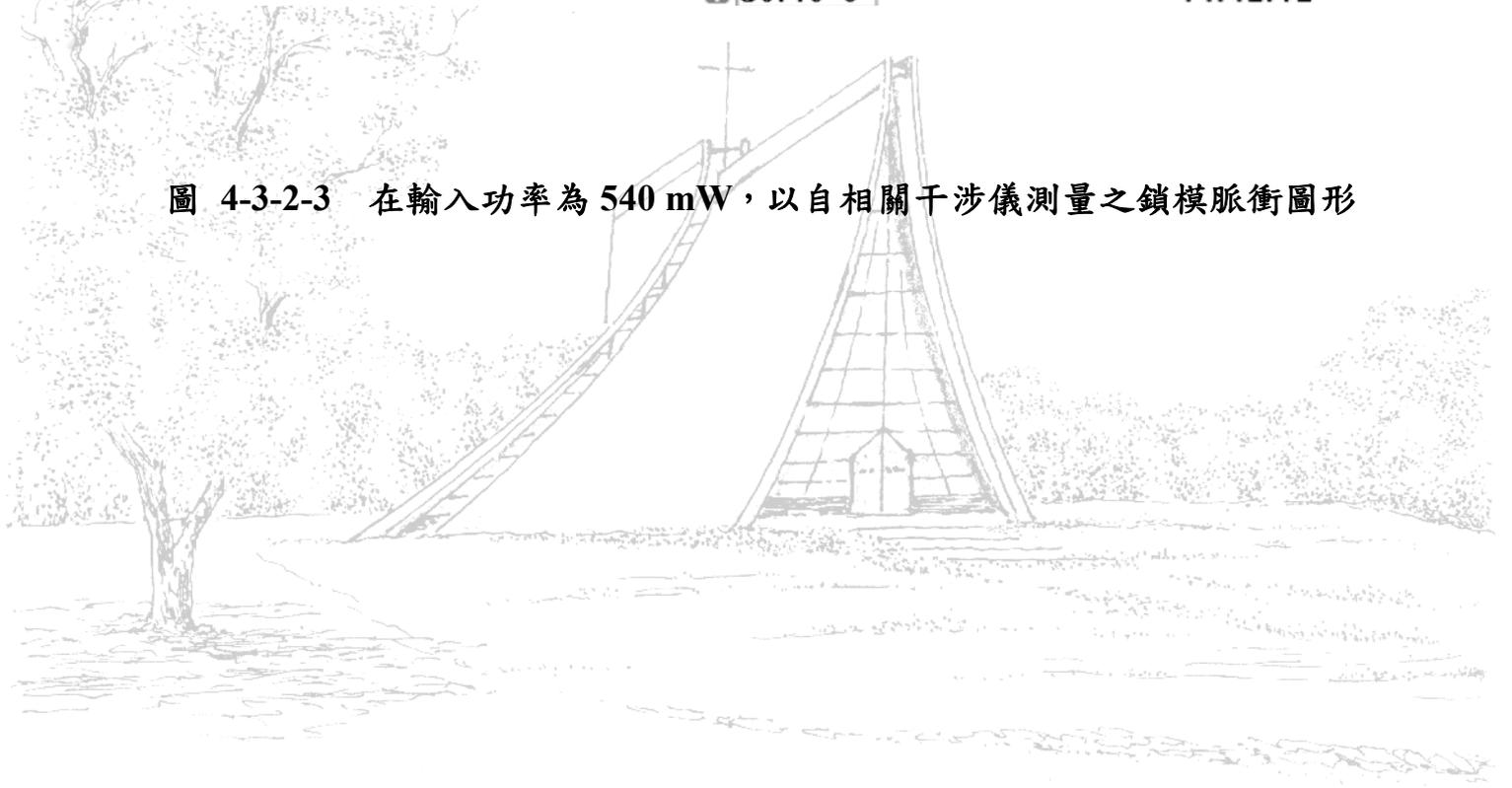


圖 4-3-2-3 在輸入功率為 540 mW，以自相關干涉儀測量之鎖模脈衝圖形



4.3.3 曲率半徑為 30 公分的鎖模

我們使用示波器所觀測產生鎖模的情況，圖 4-3-3-1 是示波器所觀測之 Q 開關鎖模，輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 $5\mu\text{s}$ ，所觀測的波形，此波形顯示此時雷射的輸出為穩定的 Q 開關鎖模。

圖 4-3-2-2 是射頻頻譜分析儀下脈衝之圖形，他是在輸入功率為 720 mW，此時是穩定的 Q 開關鎖模雷射，鎖模的重覆頻率為 477.641MHz。Q 開關包封的重覆頻率約為 330KHz。

圖 4-3-3-3 是自相關干涉儀下鎖模脈衝之圖形，他是在輸入功率為 720 mW，此時所看到的是單脈衝的圖形，換算後所得之脈衝的寬度為 11.5 ps。

我們在這個實驗過程中，在晶體 Nd:YVO₄ (厚的)，和飽和吸收鏡為 $A_0 = 2\%$ 的半導體飽和吸鏡，在曲率半徑為 30cm，縱使電流加到 1400mA 他還是穩定的 Q 開關鎖模，無法產生連續波鎖模，原因是因為他沒有符合連續波鎖模的條件，故無法產生連續波鎖模雷射。

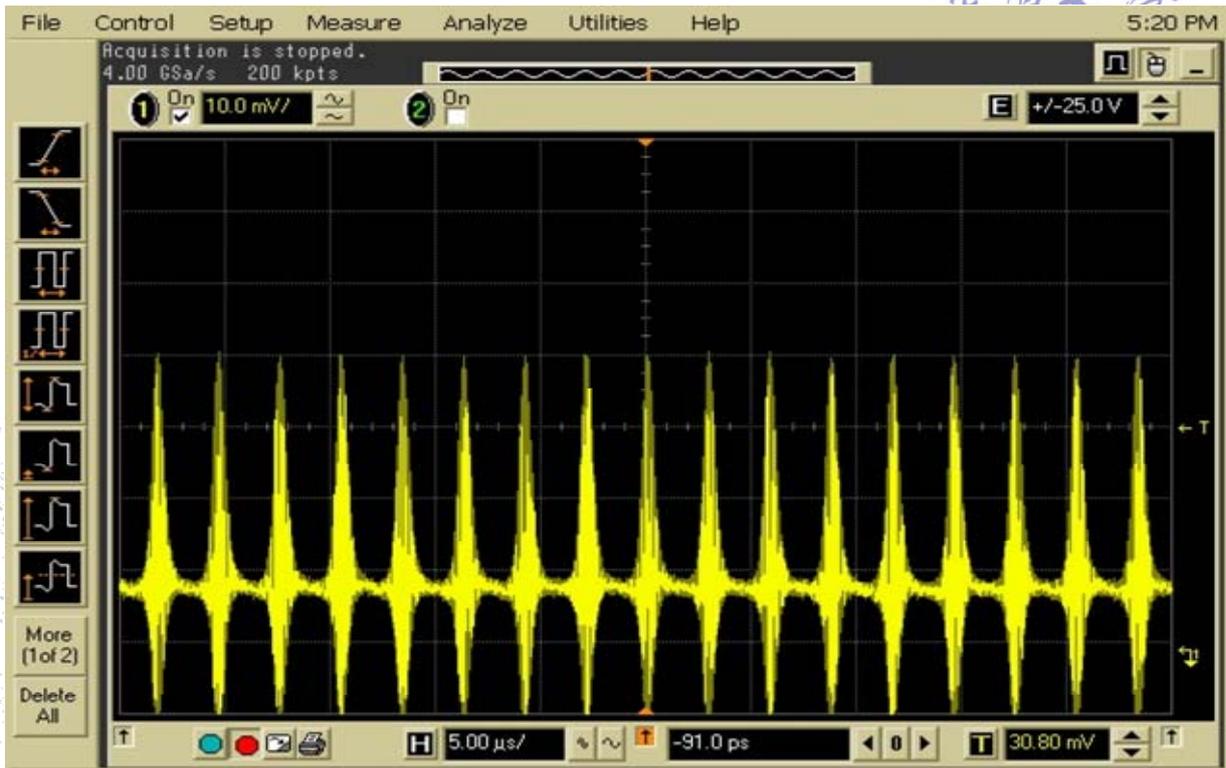


圖 4-3-3-1 在輸入功率為 720 mW，示波器的橫軸為 5μs，所觀測之波形

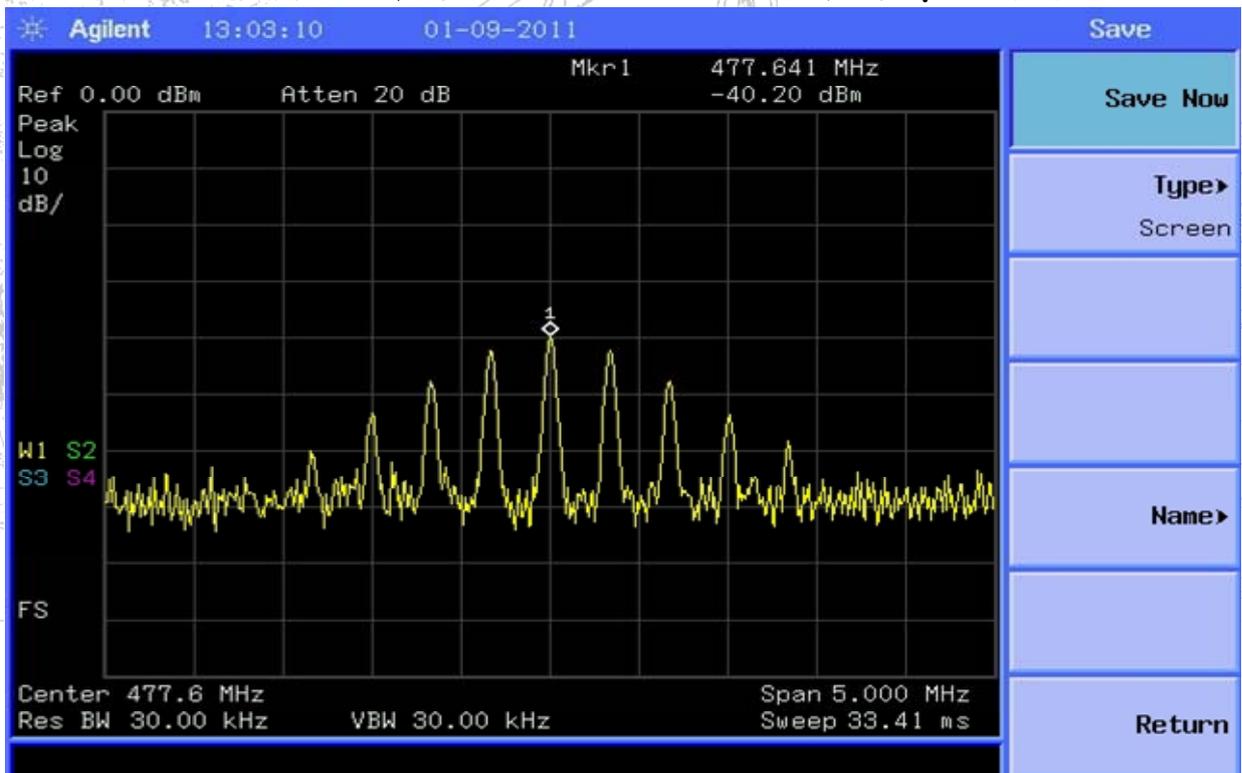


圖 4-3-3-2 在輸入功率為 720 mW，射頻頻譜分析儀下之圖形

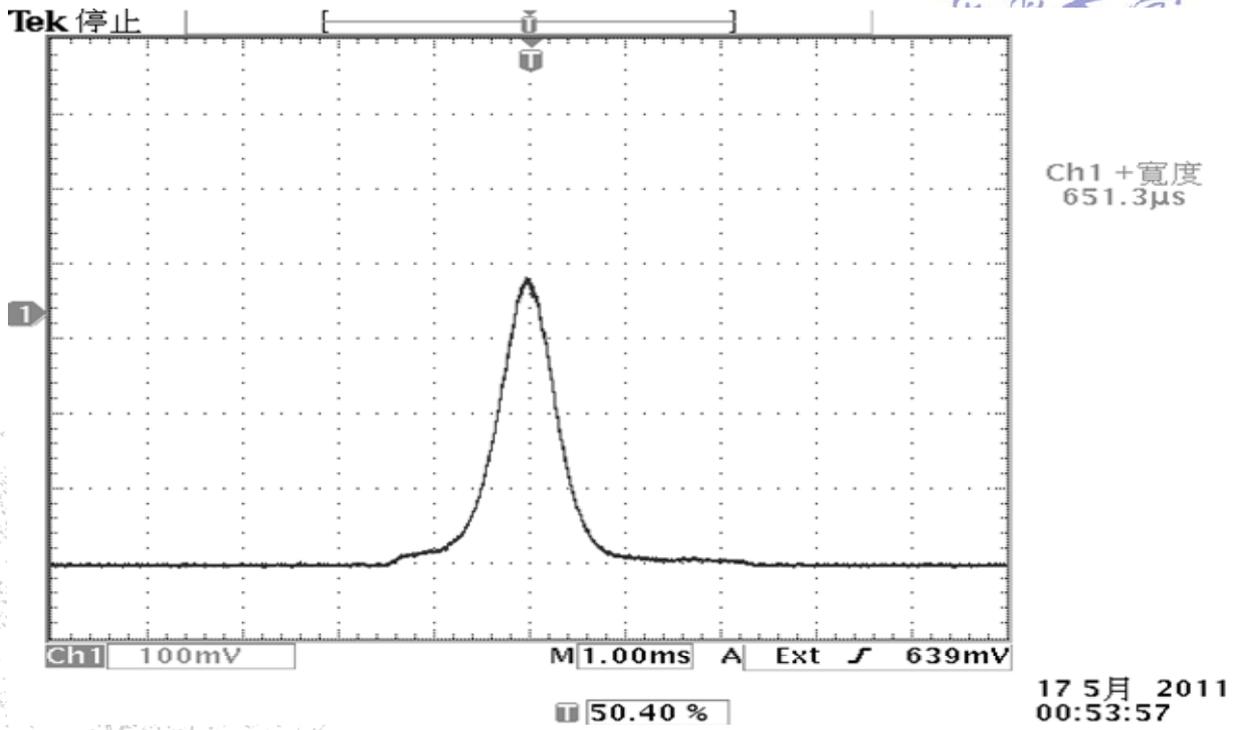
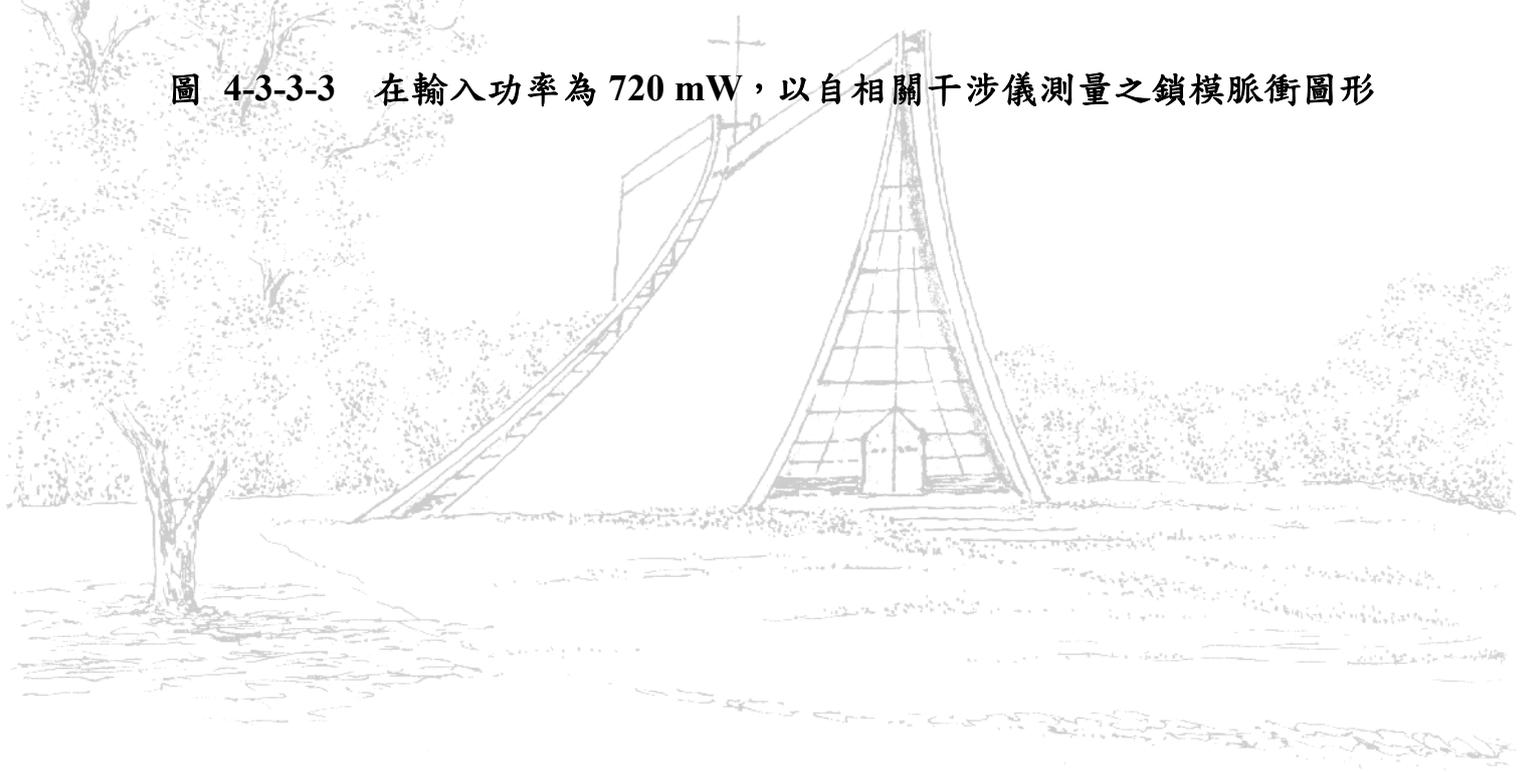


圖 4-3-3-3 在輸入功率為 720 mW，以自相關干涉儀測量之鎖模脈衝圖形



4.4 結果與討論

在這個實驗裝置之下，使用 Nd:YVO₄(厚的) 雷射晶體和飽和吸收為 $A_0 = 0.5\%$ 的半導體飽和吸收鏡，由圖表 4-4-1 知道，不斷改變曲率半徑，發現曲率半徑越來越短，脈衝的寬度最大為 14.7 ps，頻率最低約為 185.096 MHz，頻率最高約為 2.5 GHz。由實驗結果知道，在這個實驗裝置之下，符合我們所追求的短脈衝，高頻率。的確證實在這個架構有潛力發展高頻率。

由圖表 4-4-1 和圖表 4-4-2 知道，使用 Nd:YVO₄(厚的) 雷射晶體和飽和吸收為 $A_0 = 0.5\%$ 和飽和吸收為 $A_0 = 2\%$ 半導體飽和吸收鏡，使用飽和吸收為 2% 的效果不如飽和吸收為 $A_0 = 0.5\%$ 的半導體飽和吸收鏡來的好。不管是從有無連續波鎖模雷射來比較，或脈衝的寬度或最大頻率來比較，使用飽和吸收為 $A_0 = 2\%$ 的效果都不如飽和吸收為 $A_0 = 0.5\%$ 的半導體飽和吸收鏡來的好。

SAM: $A_0 = 0.5\%$	脈衝寬度	頻率
80 公分	12.6ps	185.096 MHz
50 公分	11.5 ps	292.348 MHz
30 公分	12.8 ps	479.283 MHz
15 公分	9.5 ps	913.952 MHz
10 公分	8.5 ps	1.32348 GHz
8 公分	9.84 ps	1.62520 GHz
5 公分	14.7 ps	2.5362565 GHz

圖表 4-4-1 Nd:YVO₄(厚的)雷射晶體和飽和吸收為 $A_0=0.5\%$ ，在不同的腔長之結果表

SAM: $A_0 = 2$	有無連續波鎖 模(C-W mode-locking)	脈衝寬度	頻率
80 公分	無	無	無
50 公分	有	11.1 ps	295.84MHz
30 公分	無	11.5 ps	477.641MHz

圖表 4-4-2 Nd:YVO₄(厚的)雷射晶體和飽和吸收為 $A_0 = 2\%$ ，在不同的腔長之結果表

5.1 結論

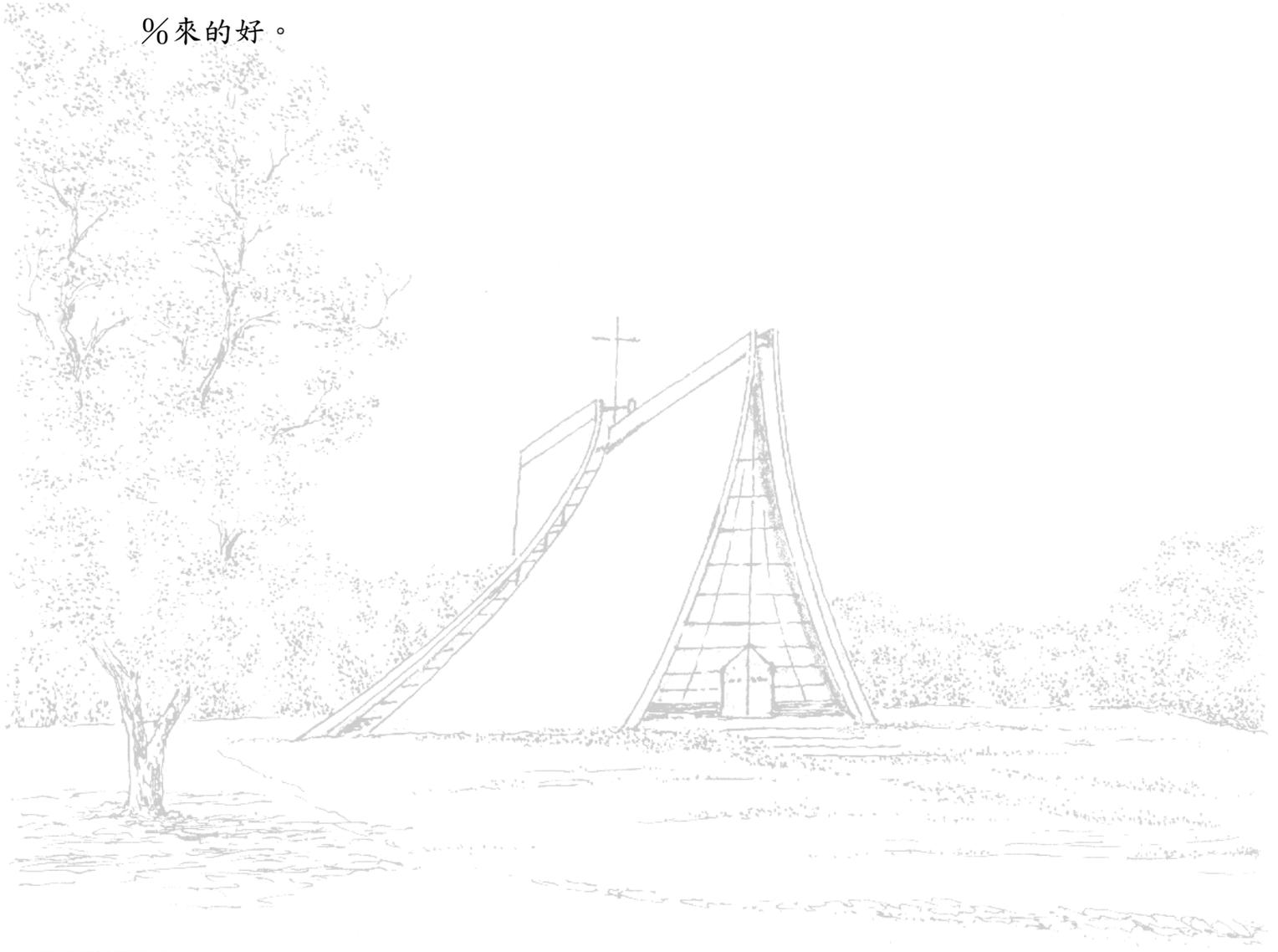
本篇論文主要探討是以半導體飽和吸收鏡(SESAM)來進行被動鎖模。以 Nd:YVO₄(薄的)為雷射晶體，將半導體飽和吸收鏡置入平凹共振腔，使用飽和吸收為 $A_0 = 2\%$ 的半導體飽和吸收鏡，由於半導體飽和吸收鏡和雷射晶體端面皆為平面鏡，無法組成平凹腔，因此將雷射晶體端面當作摺疊鏡，再外加一凹面鏡以組成平凹腔。在此架構下可獲得穩定的連續波鎖模，

在使用飽和吸收為 $A_0 = 2\%$ 的半導體飽和吸收鏡時，我們發現所產生的連續波鎖模有多脈衝，也有單脈衝的現象。原因是角度小產生多脈衝，角度大產生單脈衝。

在不同的傾斜的角度下，得到最後結果為，在重覆率為 500MHz，輸入功率為 780mW，可獲得最大輸出功率為 230mW，脈衝的寬度最大為 9.2 ps，最大峰值功率為 102 W 之連續波鎖模。

我們也改變 Nd:YVO₄(厚的)為雷射晶體，將半導體飽和吸收鏡置入平凹共振腔，使用飽和吸收為 $A_0 = 0.5\%$ 和 $A_0 = 2\%$ 的半導體飽和吸收鏡，改變曲率半徑，從 80 公分到 5 公分，在不同的曲率半徑，得到最後結果為，脈衝的寬度最大為 14.7 ps，頻率最大約為 2.5 GHz。發現曲率半徑越來越短，得到頻率也越高。所以在這個實驗裝置之下，的確證實在這個架構有潛力發展高頻率。

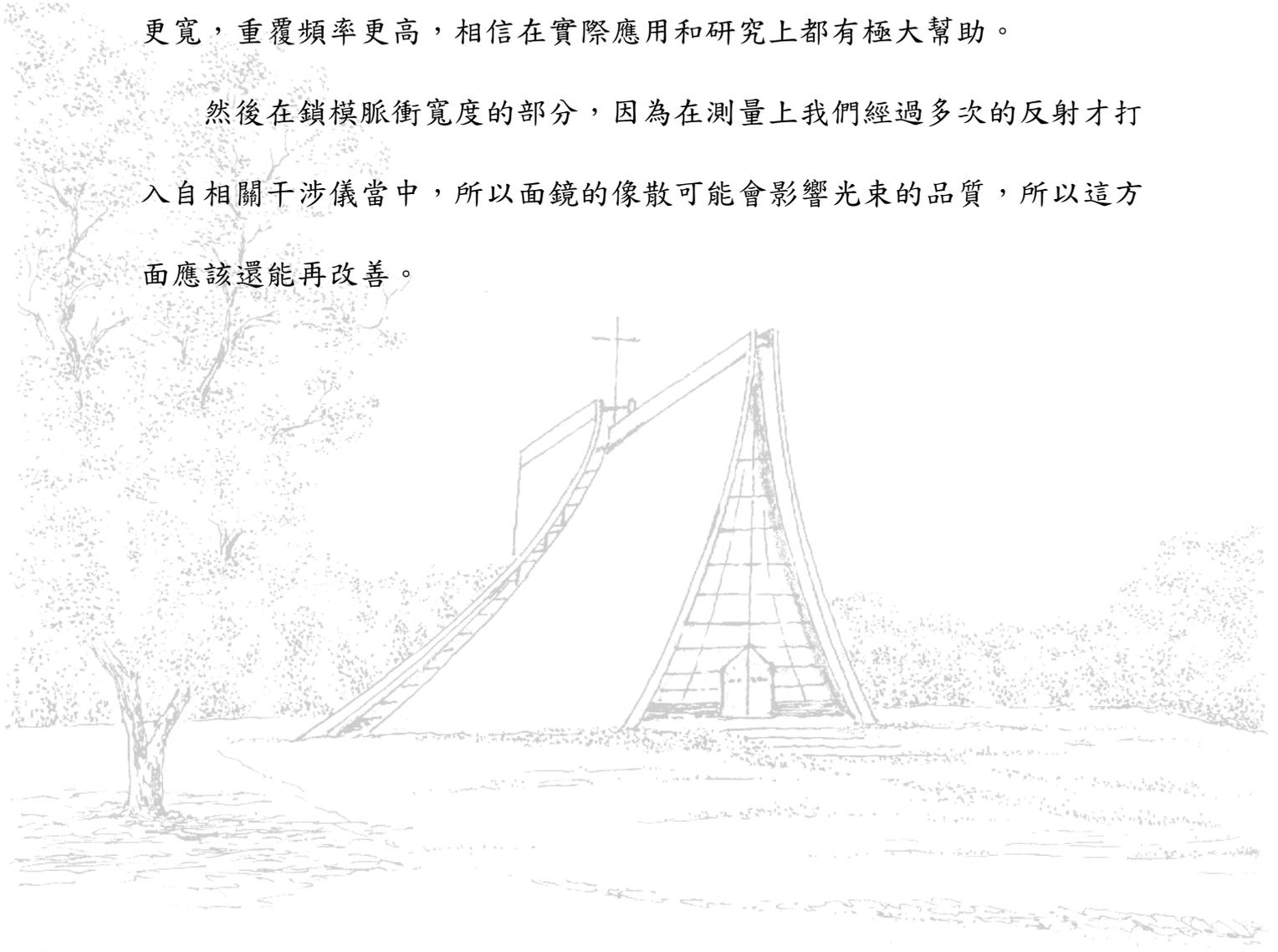
我們也做了改變飽和吸收為 $A_0 = 0.5\%$ 和 $A_0 = 2\%$ 的半導體飽和吸收鏡，最後結果發現，使用飽和吸收為 $A_0 = 2\%$ 的效果不如飽和吸收為 $A_0 = 0.5\%$ 來的好。不管是從有無連續波鎖模雷射來比較，或脈衝的寬度或最大頻率來比較，使用飽和吸收為 $A_0 = 2\%$ 的效果都不如飽和吸收為 $A_0 = 0.5\%$ 來的好。



5.2 未來展望

我們已成功的使用半導體摻鉍釷酸鈮雷射晶體達成連續波被動鎖模，同時也完成我們追求產生短脈衝、高頻率。接下來我們換比較寬頻的晶體，能讓他的損失少，平均輸出功率更高。以追求怎麼樣能讓它產生脈衝寬度更寬，重覆頻率更高，相信在實際應用和研究上都有極大幫助。

然後在鎖模脈衝寬度的部分，因為在測量上我們經過多次的反射才打入自相關干涉儀當中，所以面鏡的像散可能會影響光束的品質，所以這方面應該還能再改善。



参考文献

- [1] R Paschotta et al , ” Picosecond pulse sources with multi-GHz repetition rates and high output power ” . New Journal of Physics 6 (2004) 174 .
- [2] L. Krainer et al, ” Passively mode-locked Nd:YVO4 laser with up to 13 GHz repetition rate ” . Appl. Phys. B 69, 245–247 (1999) / Digital Object Identifier (DOI) 10 .
- [3] 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.
- [4] T. Li et al , ”Passively mode-locked YVO4/Nd:YVO4 composite crystal green laser with a semiconductor saturable absorber mirror ” . Laser Phys. Lett. 6, No. 1, 30–33 (2009) / DOI 10.
- [5] L. Sun et al , ”880 nm LD pumped passive mode-locked TEM00 Nd:YVO₄ laser based on SESAM ” . Laser Phys. Lett. 7, No. 10, 711–714 (2010) / DOI 10.
- [6] L. Krainer et al , ” 77 GHz soliton modelocked Nd:YV04 laser ” . ELECTRONICS LETTFRS 26th October 2000 Vol. 36 No. 22.
- [7] L. Krainer et al , ” 29GHz modelocked miniature Nd: YV04 laser ” .ELECTRONICS LETTERS 8th July 1999 Vol. 35 No. 14 .
- [8] Lukas Kraine et al , ” Compact Nd :YVO4 Lasers With Pulse Repetition Rates up to 160 GHz ” . IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 38, NO. 10, OCTOBER 2002 .
- [9] HERMANN A.HAUS et al , ” Parameter Ranges for CW Passive Mode Locking ” . IEEE J. Quantum Electronics, Vol.QE-12 March 1976 .
- [10] Shu Namiki et al , ” Energy rate equations for mode-locked lasers ” . J. Opt . Soc . Am .B ,2099-2111(1997).
- [11] 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
- [12] http://www.casix.com/product/prod_cry_ndyvo4.html
- [13] <http://www.batop.com/>

Nd:YVO₄ 晶體參數[12]

Optical Properties

- (1) Lasing Wavelength : 1.064 μ m , 1.342 μ m
- (2) Crystal class : positive uniaxial , $n_o = n_a = n_b$, $n_e = n_c$,
 $n_o = 1.9573$, $n_e = 2.1652$, @1064nm
 $n_o = 1.9721$, $n_e = 2.1858$, @808nm
 $n_o = 2.0210$, $n_e = 2.2560$, @532nm
- (3) Thermal Optical Coefficient :
 $dn_a/dT = 8.5 \times 10^{-6} / K$, $dn_c/dT = 3.0 \times 10^{-6} / K$
- (4) Stimulated Emission Cross-Section :
 $25 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, @1064 nm
- (5) Fluorescent Lifetime :
 $90 \mu\text{s}$ (about $50 \mu\text{s}$ for 2 atm% Nd doped) , @808nm
- (6) Absorption Coefficient : 31.4 cm^{-1} @808nm
- (7) Absorption Length : 0.32mm @808nm
- (8) Intrinsic Loss : 0.02 cm^{-1} @1064nm
- (9) Gain Bandwidth : 0.96nm (257 GHz) @1064nm
- (10) Polarized Laser Emission :
 π polarization; parallel to optic axis (c-axis)
- (11) Diode Pump Optical to Optical Efficiency : >60%

半導體飽和吸收鏡參數[13]

SAM data sheet SAM-1064-2-25.4s-1ps, $\lambda=1064\text{nm}$

Laser wavelength	$\lambda=1064\text{nm}$
High reflection band (R > 96%)	$\lambda=1010 \dots 1090\text{nm}$
Absorbance	$A_0 = 2 \%$
Modulation depth	$\Delta R = 1.2 \%$
Non-saturable loss	$A_{ns} = 0.8 \%$
Saturation fluence	$\Phi_{\text{sat}} = 60 \mu\text{J} / \text{cm}^2$
Relaxation time constant	$\tau \sim 1 \text{ps}$
Damage threshold	$800 \text{MW} / \text{cm}^2$
Chip area request	$4\text{mm} \times 4\text{mm}$; other dimensions on
Chip thickness	$400\mu\text{m}$
Protection	the SAM is protected with a dielectric front layer