

行政院國家科學委員會專題研究計畫結案報告

超快光學及超快光電子學之基礎與應用研究(3/3)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號： NSC 90-2215-E-009-054

執行期間： 90年 08月 01日至 91年 07月 31日

個別型計畫：計畫主持人：潘犀靈 教授
共同主持人：黃凱風 教授
趙如蘋 教授
黃中堯 教授

處理方式： 可立即對外提供參考
(請打✓) 一年後可對外提供參考
兩年後可對外提供參考
(必要時，本會得展延發表時限)

執行單位：國立交通大學光電工程研究所

中華民國 91年 7月 31日

一、前言：

本計畫為期三年，其目標為了因應二十一世紀兆位元時代我國高度資訊化社會對高速資訊傳播與處理的需求，本計畫擬從事超快光學與超快光電子學領域的基礎與應用研究。研究課題包括超快與多波長雷射，光波與高頻電磁波之交互作用，超快光電半導體材料與元件，及超快掃描探針顯微術。大部分的工作是以自組的 10-100 飛秒級、低相位雜訊雙波長鈦寶石雷射或相位鎖定的兩具可調波長飛秒雷射或相位鎖定的兩具飛秒雷射為基礎的。上述雷射光源將被用以研究飛秒級光脈衝與物質交互作用，尤其是寬能隙半導體光電材料如氮化鎵的載子動力學，及兆赫輻射的產生與應用。我們也將研製高功率飛秒紫外雷射 ($\lambda \leq 190 \text{ nm}$) 及雷射激發皮秒級電子束，以發展超快雷射輔助之尖端材料及元件製備、性能修改及微加工技術；預料研究成果將促成新型材料，結構、元件及製程上的突破。最後，以掃描探針如近場光學顯微術為基礎，我們將發展具時間、空間、和能量解析功能的先進光電診斷分析技術；目標為空間精細度達 50 nm、能量精細度達 meV、時析精確度達次皮秒或量測頻寬超越 100 GHz。

二．工作進度：

本計劃進行中的工作包括：

A. THz radiation: 為了達到高功率 THz 輻射, 我們以下列方法產生, 分別為利用 SMQW 及 NMQW 之非線性效應, 以及砷離子佈植砷化鎵光導天線產生 THz 輻射, 並以光導法量到超過 30THz 的可偵測頻寬

1. 利用光激發與磁場作用下的”扭曲式多層量子井”共振吸收產生 THz 輻射 (博士生劉子安)

近來已有相當多的材料與元件被用來產生 THz 輻射，利用光激發在低溫下施加電壓的量子井亦可經由激子吸收或電荷震盪產生 THz 輻射。然而利用扭曲式的多層量子井(Strained-MQW)在光激發與磁場的作用下產生 THz 輻射的研究卻是第一次由本實驗做出。Strained-MQW 是由 10 對 8 nm $\text{In}_{0.11}\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 的井(well)被 10nm 的位障(barrier) $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 所分開，並用分子束磊晶成長在半絕緣性砷化鎵(S. I. GaAs)晶圓上，其光激發螢光譜線 (photo-luminescence) 如圖 1-1 所示：

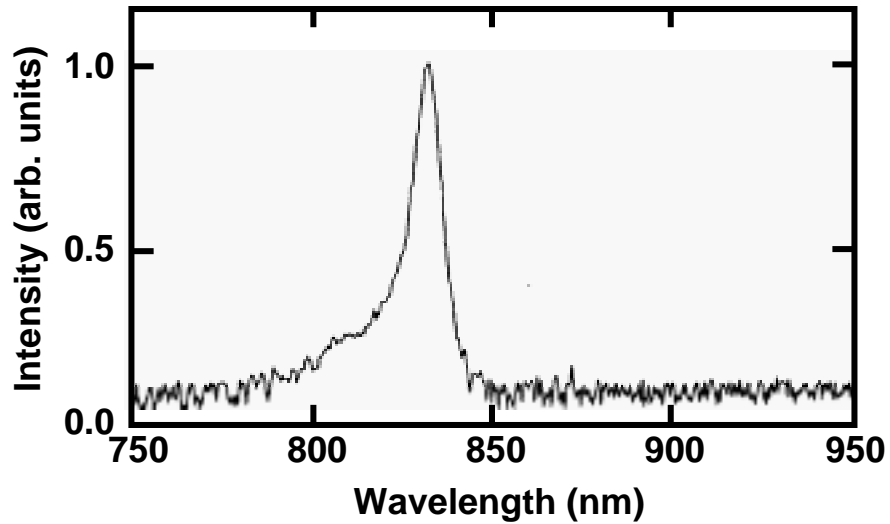


圖 1-1

將 100 mW 平均功率, 90 fs 脈衝寬度的鈦藍寶石雷射以三個不同的入射角激發在 1 Tesla 磁場作用下的樣品, 將產生的 THz 輻射收集到液氦冷卻的 Si 熱偵測器(bolometer)上偵測輻射功率與頻譜。圖 1-2(a)為光激發波長由 750nm 到 850nm 下的 THz 輻射功率, 可看出在螢光尖峰處(830nm)有最大值, 明顯表示在樣品共振態附近有較強非線性吸收產生 THz 輻射。圖 1-2(b)則顯示輻射功率與激發功率呈現理論預期的二次方關係。

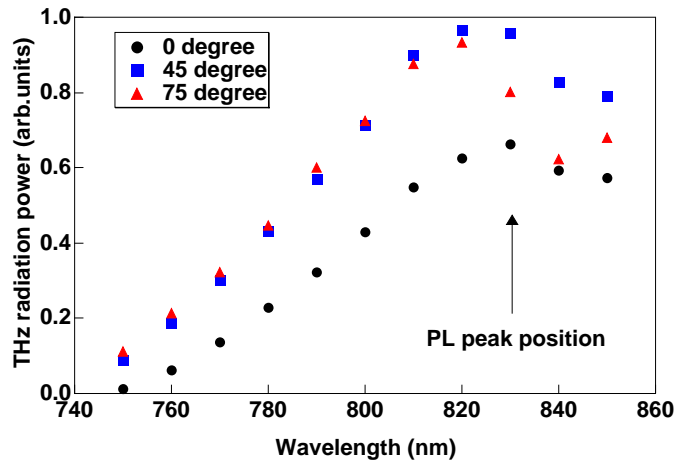


圖 1-2(a)

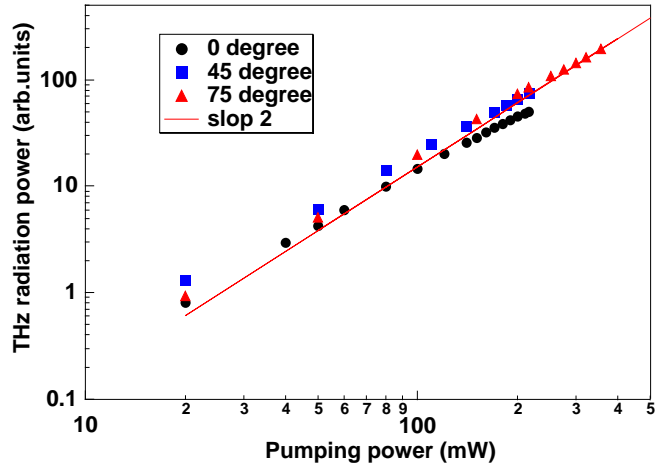


圖 1-2(b)

同時我們也將半絕緣性砷化鎵在同樣的實驗架構下與本樣品比較如圖 1-3(a) 所示，可看出 S.I.GaAs 本身並無明顯的非線性尖峰而是呈現輻射功率隨激發能量越高(波長越短)而越高的現象，亦同時證明由 Strained-MQW 所生的 THz 並非由基板來的。圖 1-3(b)為由本樣品與砷化鎵產生的 THz 頻譜比較，可看到由 strained-MQW 所產生的 THz 中心頻率與頻寬皆比 GaAs 些微的增高。

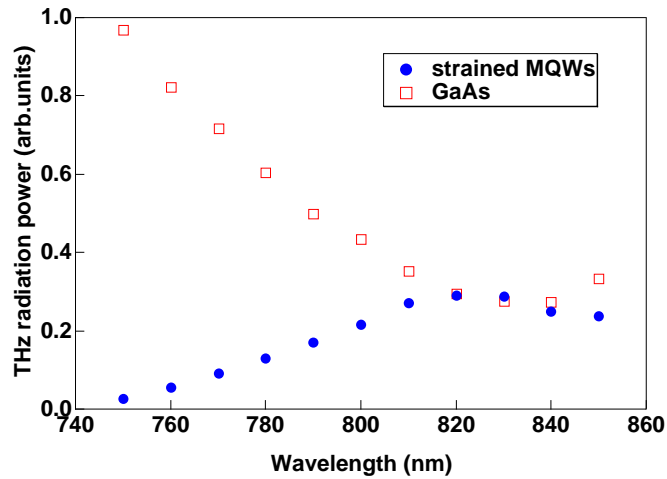


圖 1-3(a)

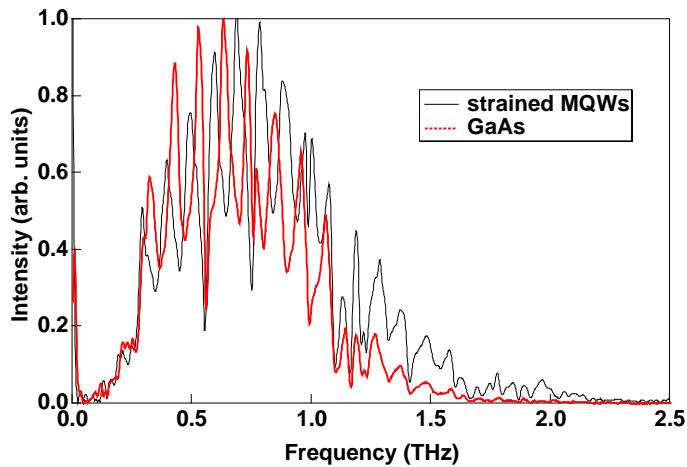


圖 1-3(b)

2.”扭曲式多層量子井”的非線性光學分析與遠紅外輻射特性之研究(博士生劉子安)

近來已有相當多的材料與元件被用來產生 THz 輻射，利用光激發在低溫下施加電壓的量子井亦可經由激子吸收或電荷震盪產生 THz 輻射。扭曲式的多層量子井(Strained-MQW) 因有很強的非線性係數而有潛力產生高功率 THz 輻射。利用扭曲式的多層量子井(Strained-MQW)在光激發與磁場的作用下產生 THz 輻射的研究已由本研究群將產生的 THz 輻射收集到液氮冷卻的 Si 熱偵測器(bolometer)上偵測輻射功率與頻譜。Strained-MQW 是由 10 對 8 nm $\text{In}_{0.11}\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 的井(well)被 10nm 的位障(barrier) $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 所分開，並用分子束磊晶成長在半絕緣性砷化鎵(S. I. GaAs)晶圓上，其光激發螢光譜線(photo-luminescence) 如圖 2-1 所示：

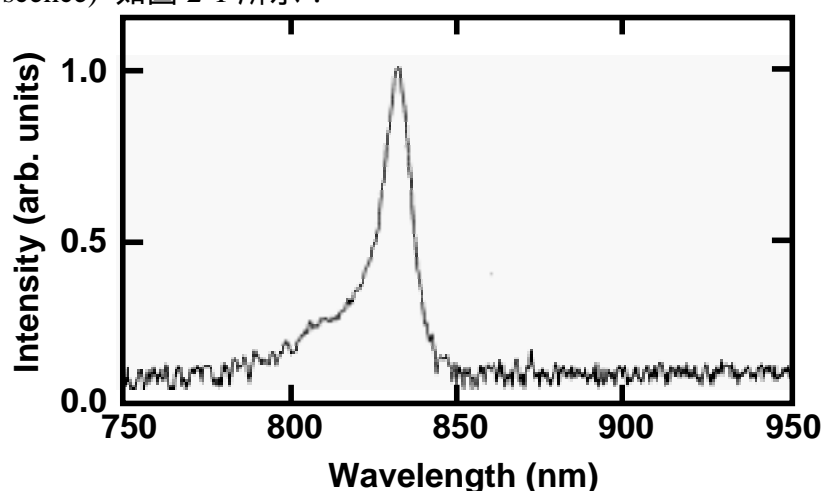


圖 2-1

我們利用單波長泵探(pump-probe)系統分析此樣品的暫態微分反射率如圖 2-2(a)(b)所示。將 300 mW 平均功率, 120 fs 脈衝寬度的鈦藍寶石雷射以四個不同的入射光波長激發在 1 Tesla 磁場作用下的樣品。在能隙附近($\lambda=830\text{nm}$)因為有很強的吸收導致 $\Delta R/R$ 變小,而 life time 則為最長(band to band recombination), 在 840nm 與 790nm 處則已不在 PL 響應範圍並有最短的載子生命期。

圖 2-3(a)為利用同調電光偵測法量測光激發波長由 790nm 到 840nm 下的 THz 輻射時域波形，可看出在 840nm 之負端尖峰較高可對應其有較短之載子生命期與仍在 PL 共振吸收範圍內。而由圖 2-3(b)可看出在 PL 尖峰處(830nm)有最大值，與先前以 bolometer 當功率偵測器的結果吻合。明顯表示在樣品共振態附近有較強非線性吸收產生 THz 輻射。圖 2-3(c)為 THz 輻射之頻譜圖，可看出其中心頻率比 GaAs 有明顯的藍移。由圖 2-3(d)之分析顯示輻射中心頻率在 830nm 處最小,與生命期最長吻合，而由於 790nm 與 840nm 處生命期最短,因此對應到最長的中心頻率。而頻寬則與雷射脈衝寬度較有關,因此都差不多。

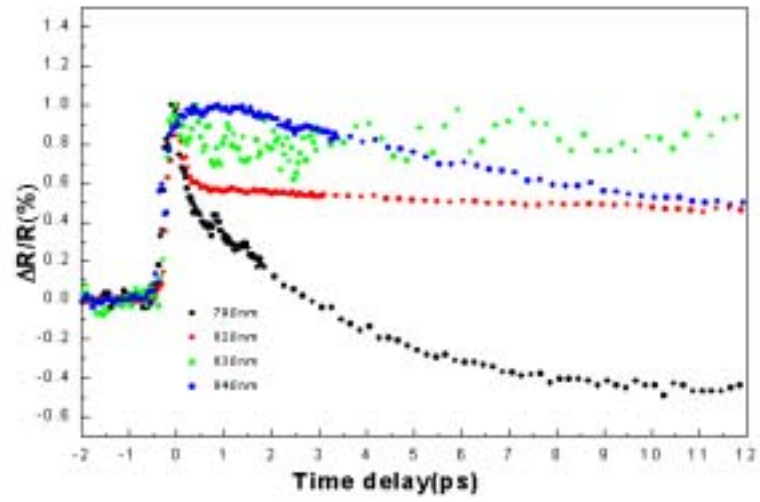


圖 2-2(a)

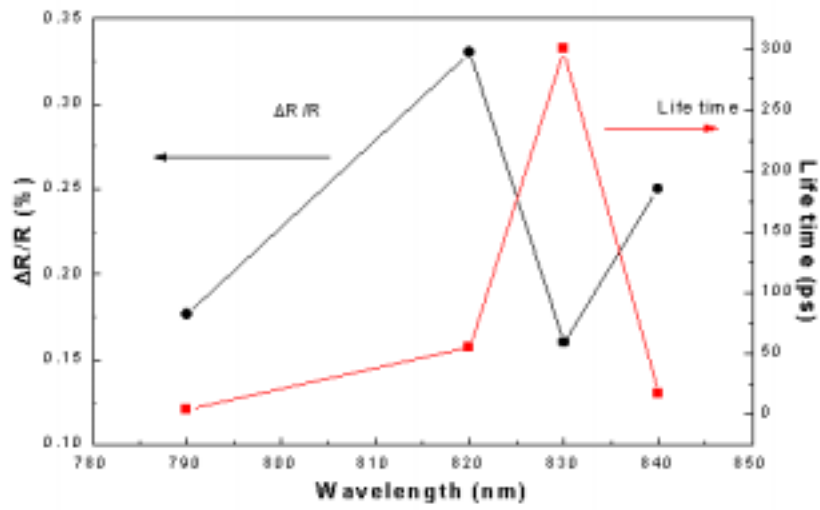


圖 2-2(b)

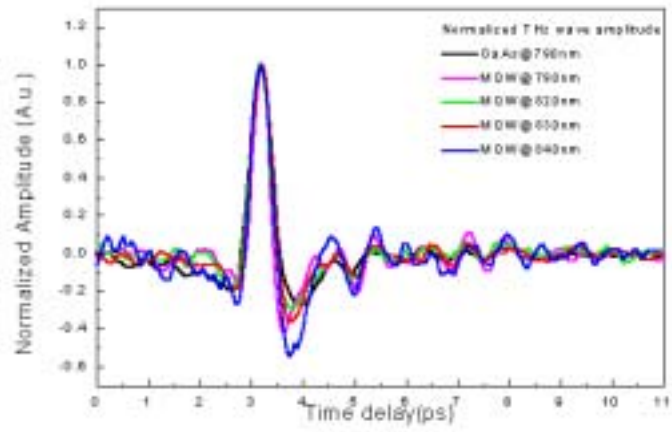


圖 2-3(a)

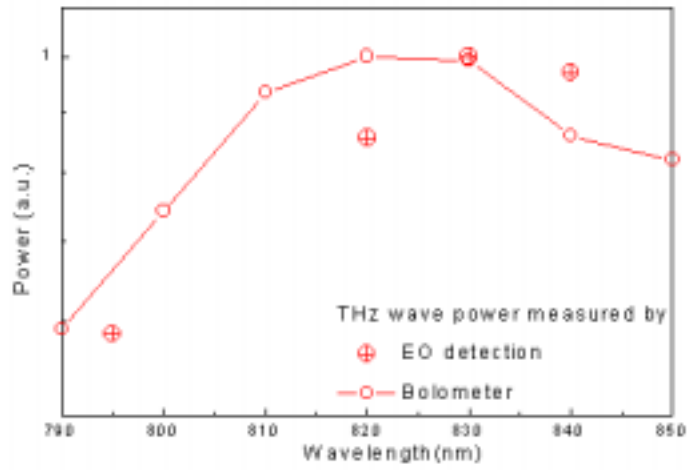


圖 2-3(b)

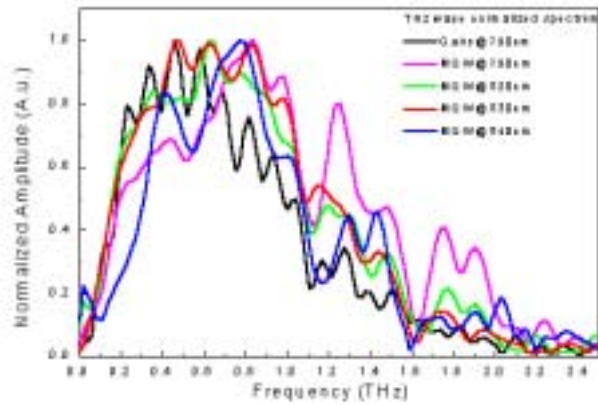


圖 2-3(c)

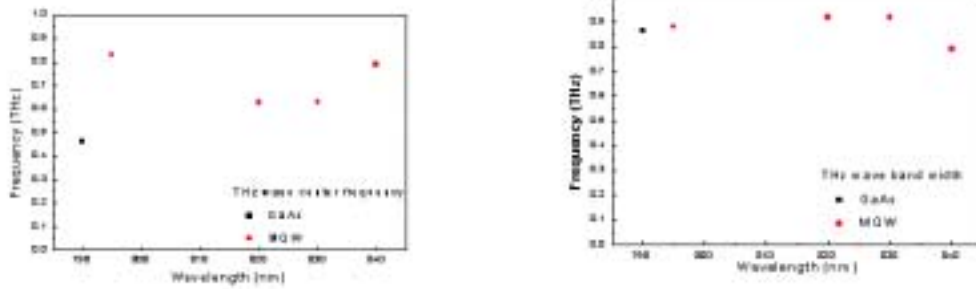


圖 2-3(d)

3. 改變光導天線電極間隙寬度的砷離子佈值砷化鎵之 THz 輻射特性 (博士生劉子安)

近來砷化鎵或低溫分子束磊晶砷化鎵的大孔徑光導或小孔徑偶極天線的 THz 輻射已有相當多的報導。然而砷離子佈值砷化鎵有其與低溫分子束磊晶砷化鎵類似的高組抗與超快光導響應特性。因此本實驗將在砷離子佈值砷化鎵上長不同電極間隙寬度的光導天線，將其產生的 THz 輻射特性與半絕緣性砷化鎵做比較。

在大孔徑的光導天線中,以 0.8cm 左右的電極間隙間施加 250V 左右的電壓，樣品為單或多能量離子佈值為 200keV 或 50,100,200keV，佈值濃度為 $10^{16}, 10^{15}$ ions/cm² 或 10^{15} ions/cm²。在小孔徑的偶極天線中則以 5 μ m 左右的電極間隙間施加 10V 左右的電壓，樣品為多能量離子佈值為 150keV, 200keV，佈值濃度為 10^{15} ions/cm²。激發光源為鎖模鈦藍寶石雷射，其平均功率及脈衝寬度再大孔徑與小孔徑時則分別為 300mW,138fs 與 5mW,78fs

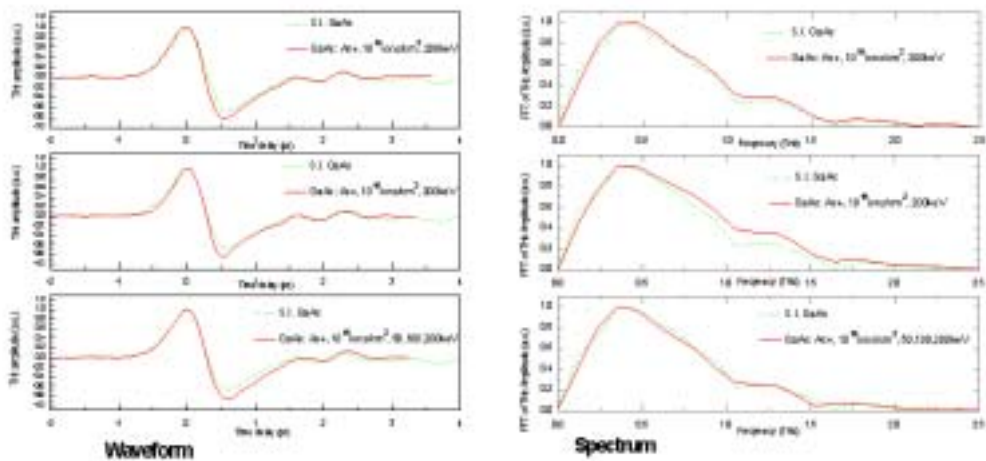


圖 3-1

圖 3-1 顯示為大孔徑光導天線半絕緣性砷化鎵與砷離子佈值砷化鎵時的 THz 輻射的波形與頻譜，其中心頻率與頻寬皆約為 0.4THz 與 0.8THz。這些材質的 THz 皆為雙極波形而無明顯變化。圖 3-2(a)為小孔徑偶極天線半絕緣性砷化鎵與砷離子佈值砷化鎵時的 THz 輻射的波形與頻譜，可明顯的看出半絕緣性砷化鎵樣品之 THz 波形為單極，然而在砷離子佈值的樣品則呈現雙極的波形。這種現象在低溫分子束磊晶砷化鎵小孔徑時也出現過，原因則是由於過剩砷離子引起的缺陷史光電流衰減時間縮短。圖 3-2(b)則顯

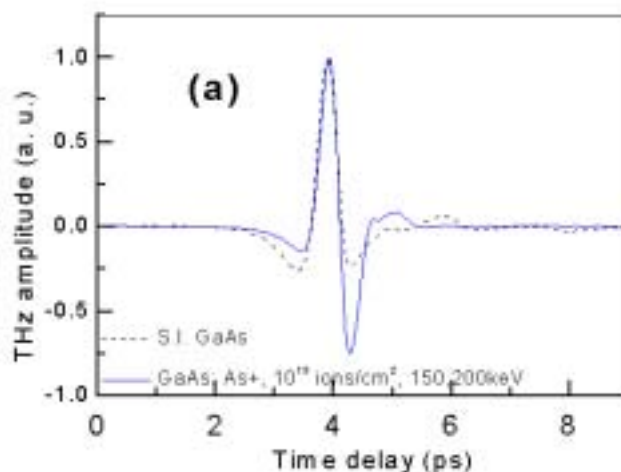


圖 3-2(a)

示輻射中心頻率由 0.7THz 移到 0.9THz 而維持在 1.2THz 的頻寬。

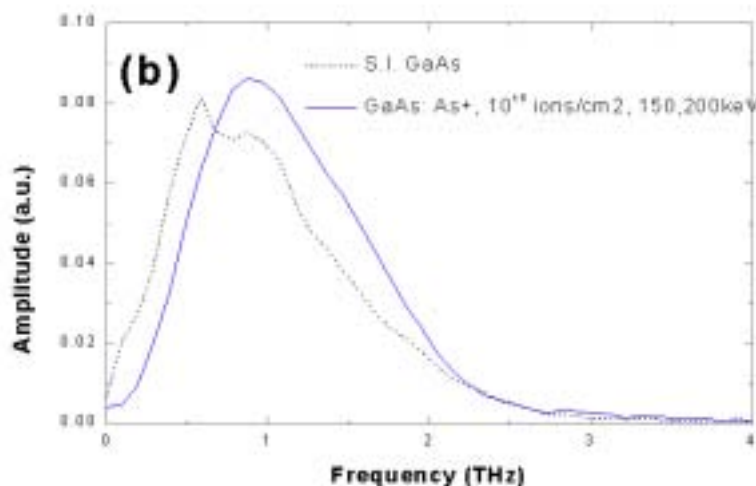


圖 3-2(b)

因此我們分析的結果顯示由於砷離子佈值砷化鎵之佈值深度只有約 100nm 而入射光穿透深度則約 650nm，因此在大孔徑樣品時才會看到差不多一樣的波形(為半絕緣性砷化鎵的效應主導 THz 輻射)。而在小孔徑偶極天線時則由於電場會侷限在表面，使得 THz 輻射的波形出現明顯的變化。

4. 砷離子佈植砷化鎵光導天線的綜合研究(碩士生蔡仁傑)

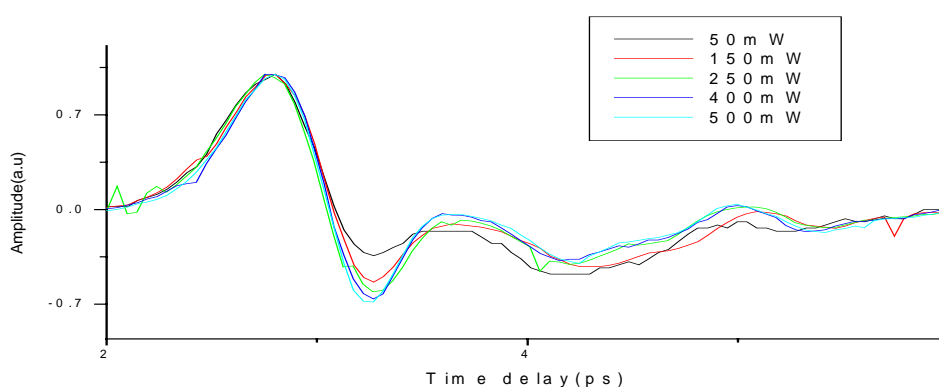
由於砷離子佈植砷化鎵的超快光電特性,可被用來製作 THz 放射器。我們研究單一佈植與多重佈植光導天線的特性。後者是在砷化鎵上佈植 50,100, 200KeV 三種佈植能量,佈植砷離子濃度為 10^{16} ions/cm²並經由 600°C、30 或 60 分鐘的退火製程。我們以反射式泵探系統量測此材料載子生命期約為幾個皮秒。更重要的是,退火過程使大部份晶格恢復,並有微小砷凝聚生成,降低此材料的暗電流,避免在高壓下的崩潰效應。因此,以此材料製作的光導天線可以加高壓產生高功率的次毫微米波。在 THz 量測系統方面,利用光脈衝寬約 100fs、波長在 0.8 μ m 附近的被動鎖模鈦藍寶石雷射為光源,經過電光晶體碲化鋅的電光取樣系統來量測光導天線所產生的次毫微米波。我們製作(20 μ m ~ 5mm)各種不同型式的光導天線,發現其在時域與頻域上有顯著的差異。

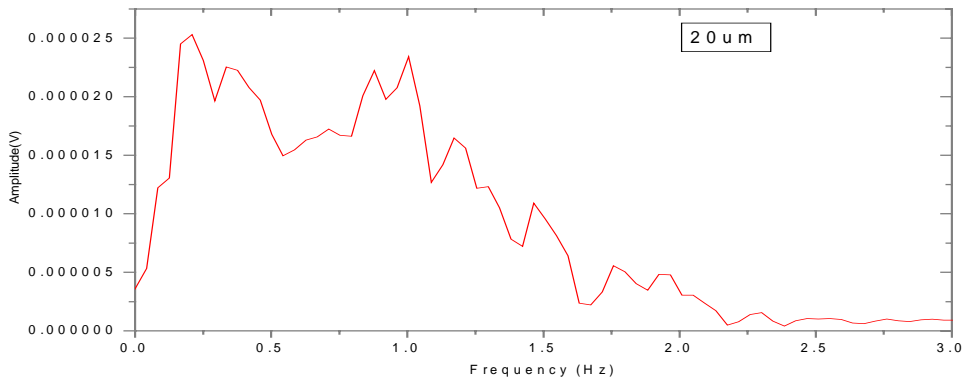
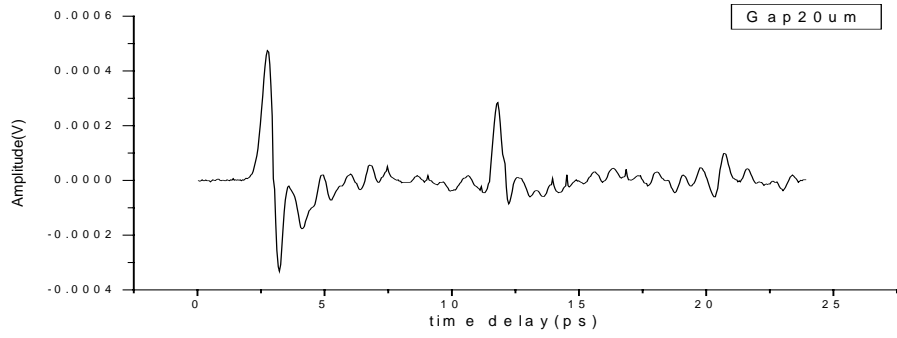
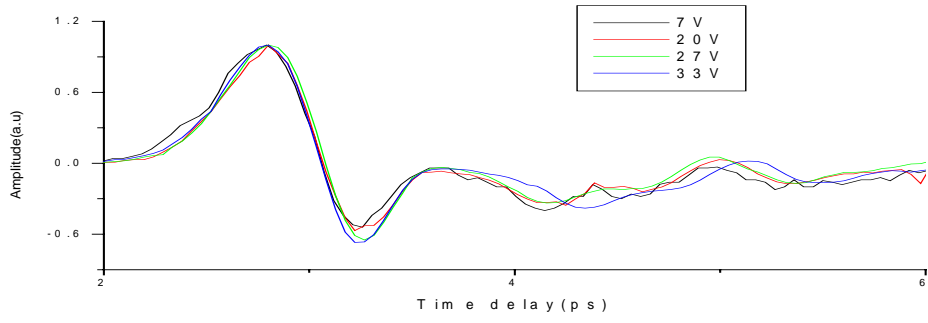
表 4-1:各種材料的暗電流

gap=20 μ m

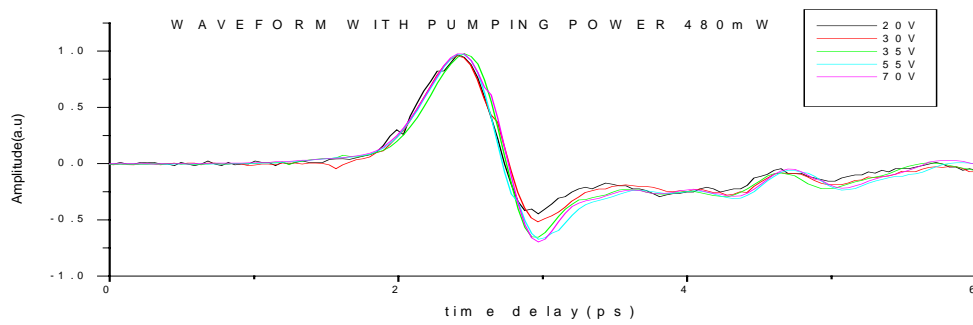
	SI GaAs	Multi implant GaAs	Single implant anneal 30min	Single implant anneal 60min	Multi implant anneal 30min	Multi implant anneal 60min
Bias 30V	18nA	3.83 μ A	0.05nA	0.13nA	0.29nA	0.52nA
Bias 60V	Break down	Break down	0.15nA	0.28nA	1.2nA	1.7nA

從表 4-1 可知,砷離子佈植砷化鎵經退火製程後會降低暗電流。雖然,單一佈植經退火後的暗電流較低,但多重佈植經退火後具較高的耐壓特性。





4-1: THz radiation emitted by 20 μ m gap size antenna based SI GaAs



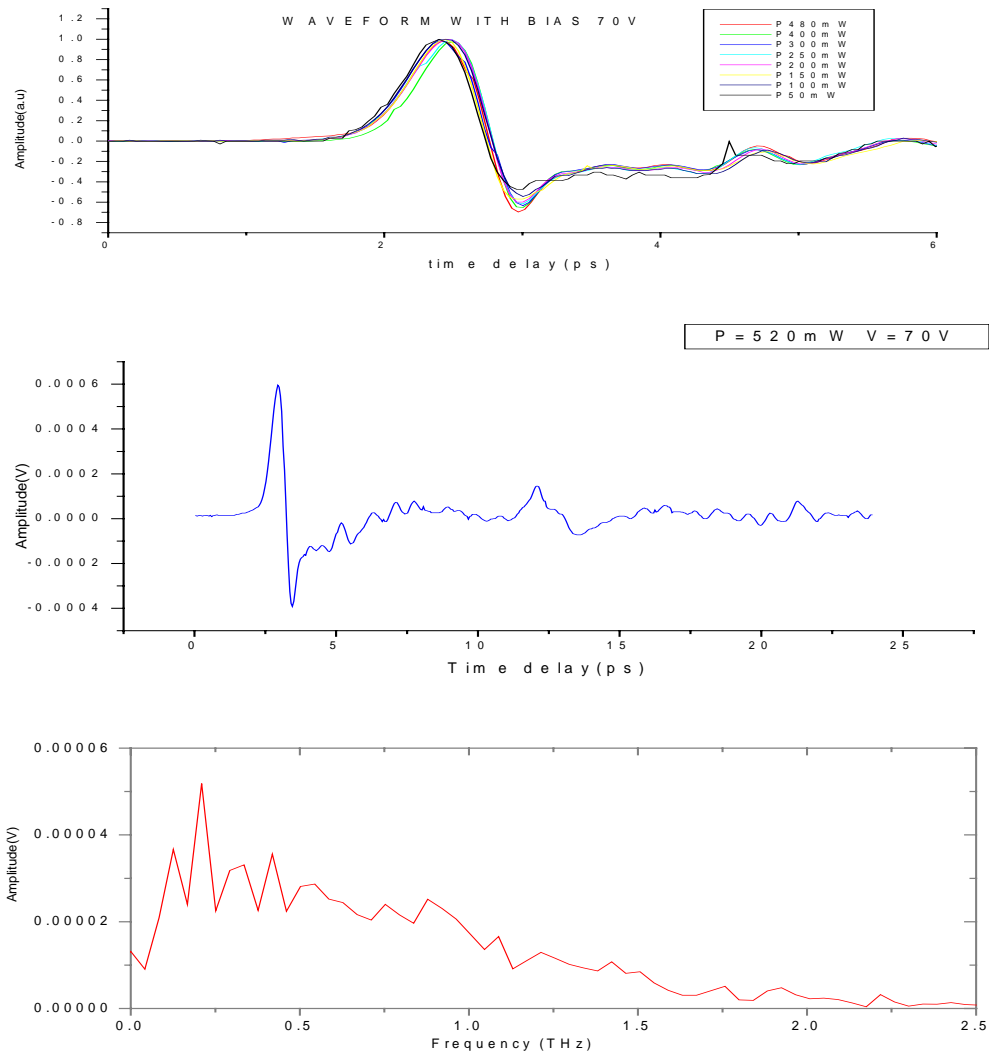


圖 4-2: THz radiation emitted by 200 μ m gap size antenna based SI GaAs

由圖 4-1、2 可看出 20 μ m gap size 所產生的 THz radiation 的頻寬比 200 μ m gap size 稍寬。THz 的功率大約與所加偏壓成正比。當 pump power 增加時，THz 的功率也隨之增加，當到一定 pump power 時，會呈現飽和狀態。另外我們從 THz waveform negative peak 可看出，當偏壓或 pump power 增加時，negative peak 會變大，此即 screen effect 所產生的現象。

5. 以砷離子佈植砷化鎵光導天線偵測寬頻 THz 輻射(碩士生游博文)

以光導天線作為 THz 輻射偵測器，在早期 THz 領域扮演非常重要的角色，從輻射偵測機制可以確定:短載子生命期、高載子漂移率可以得到寬頻偵測的目的;因此，不同超快光電材料，包括:半絕緣性砷化鎵(S.I. GaAs)與低溫分子束磊晶長成的砷化鎵(LT-GaAs)等，在先前的文獻都有相當的報導，尤其是低溫分子束磊晶長成的砷化鎵(LT-GaAs)為目前最佳的超快光電材料。由於多重砷離子佈植砷化鎵與低溫分子束磊晶長成的砷化鎵有相同的光電特性;而且，在製程上比低溫分子束磊晶長成的砷化鎵更為簡單、經濟。所以本研究將砷離子佈植後的砷

化鎵分別退火 30、60 分鐘，觀察在 THz 輻射偵測的差異性。在 150fs 等級的雷射脈衝下偵測以大孔徑光導天線,電光晶體(ZnTe)量的的輻射特性, 以及在 10fs 等級雷射下的超寬輻射偵測響應。

材料電性如圖 5-1 所示，以三種不同基板材料製作出相同尺寸(偶極長度 30um 及間隙 5um)的偶極天線所量到暗電流與電壓的關係圖;可發現半絕性砷化鎵與多重砷離子佈植砷化鎵退火 60 分鐘的偶極天線，有明顯的蕭特基能障的存在，然而，多重砷離子佈植砷化鎵退火 30 分鐘的偶極天線有良好的歐姆接觸。

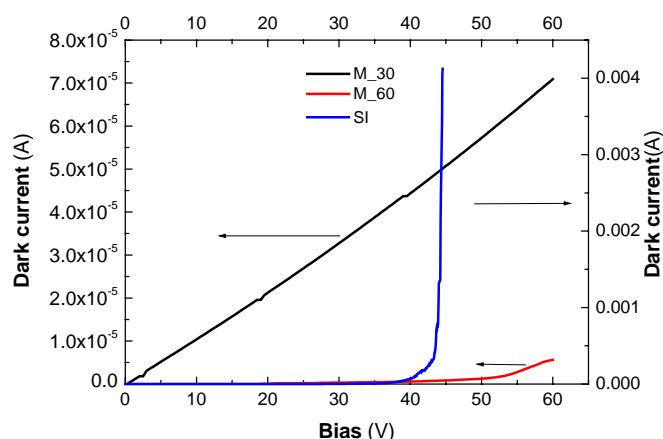


圖 5-1: 以相同尺寸(偶極長度 30um 及間隙 5um) 三種不同基板所製作之偶極天線所得到的暗電流與電壓關係;M_30:多重砷離子佈植砷化鎵退火 30 分鐘;M_60:多重砷離子佈植砷化鎵退火 60 分鐘;SI:半絕緣性砷化鎵。

以我們所架設的鈦藍寶石鎖模雷射作為光源，其中脈衝寬 130 飛秒，中心波長 810nm;圖 5-2 是以多重砷離子佈植砷化鎵退火 60 分鐘為基板，所製作間隙 1mm 的大口徑天線，當作 THz 輻射發射器，以多重砷離子佈植砷化鎵退火 30 分鐘為基板，所製作偶極長度 30um 間隙 5um 的偶極天線，作為 THz 輻射偵測器所偵測到的 THz 輻射波形及經過傅利葉轉換後的頻譜圖;

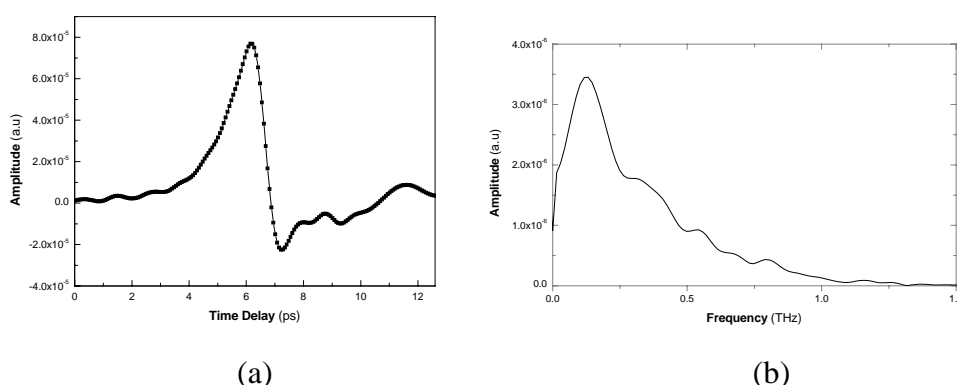


圖 5-2 : (a) THz 輻射波形; 其中,THz 輻射發射器: 多重砷離子佈植砷化鎵退火 60 分鐘為基板，所製作間隙 1mm 的大口徑天線; THz 輻射偵測器:多重砷離子佈植砷化鎵退火 30 分鐘為基板，所製作偶極長度 30um 間隙 5um 的偶極天。(b) 將(a)經由傅利葉轉換式所得到的頻譜圖。

然而,同樣情況下將 THz 輻射光導發射器換成 1.7mm 厚<110>碲化鋅為 THz 輻射源，可得如圖 5-3 所示之 THz 輻射波形及其頻譜。從圖 5-2 及圖 5-3 可知，

只有退火 30 分鐘的多重砷離子佈植砷化鎵為基板的偶極天線能偵測到 THz 輻射波;利用光整流效應所得到的 THz 輻射波的頻寬遠大於從光導天線所得到的 THz 輻射波頻寬,因此, <110>碲化鋅是寬頻 THz 輻射波最佳選擇。

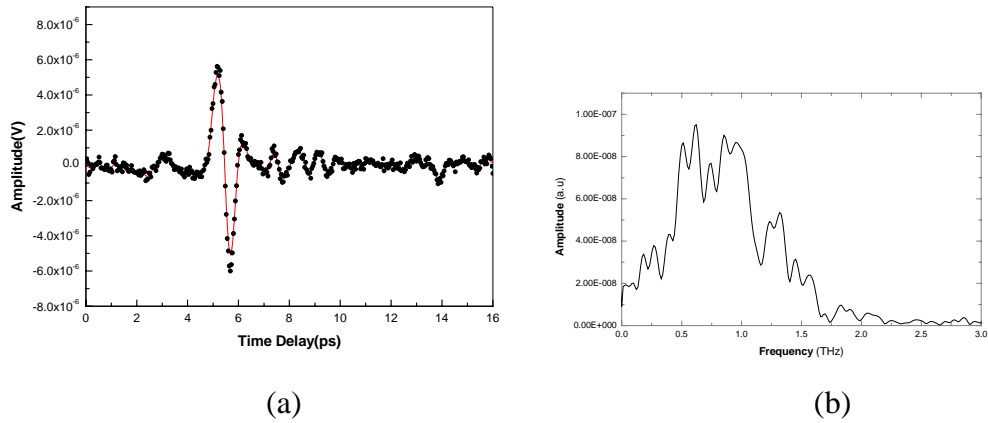


圖 5-3 : (a) THz 輻射波形; 其中, THz 輻射發射器: 1.7mm 厚<110>碲化鋅; THz 輻射偵測器:多重砷離子佈植砷化鎵退火 30 分鐘為基板, 所製作偶極長度 30um 間隙 5um 的偶極天線。(b) 將(a)經由傅利葉轉換式所得到的頻譜圖。

以脈衝寬 15 飛秒, 中心波長 800nm 的鈦藍寶石鎖模雷射為光源, 10um 厚 <110>碲化鋅為 THz 輻射源, 分別以低溫分子束磊晶長成的砷化鎵、半絕緣性砷化鎵以及多重砷離子佈植砷化鎵退火 30 分鐘製作成相同的偶極天線來偵測 THz 輻射, 如圖 5-4 所示, 其中可發現砷離子佈植砷化鎵的訊噪比比低溫分子束磊晶長成的砷化鎵還要低(100:20), 其兩者分別偵測到的頻寬分別是 30THz、40THz, 砷離子佈植砷化鎵偵測頻寬會比較低, 是因為有些訊號是被雜訊所掩蓋。

同樣地, 偵測器改以半絕緣性砷化鎵作為基板材料, 可發現到所得到的雜訊非常大, 以至於其訊噪比比砷離子佈植砷化鎵還要低(<10)。

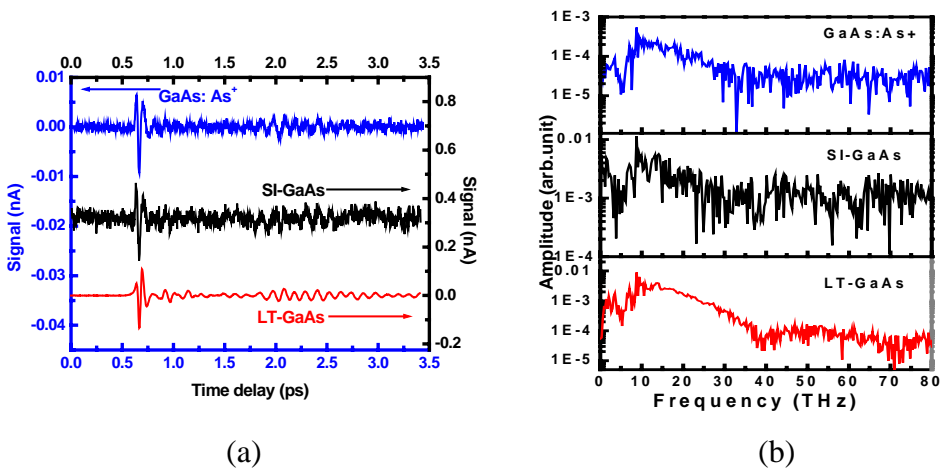


圖 5-4:(a) THz 輻射波形; 其中, THz 輻射發射器: 10um 厚<110>碲化鋅; THz 輻射偵測器:多重砷離子佈植砷化鎵退火 30 分鐘,半絕緣性砷化鎵以及低溫分子束磊晶長成的砷化鎵為基板, 所製作偶極長度 30um 間隙 5um 的偶極天線 (b) 將

(a)經由傅利葉轉換式所得到的頻譜圖。

總之，退火 30 分鐘的砷離子佈植砷化鎵有良好的歐姆接觸，使得光激發之光電流更有效率的被偵測到，所以此基板材料適合作為偵測之用，如圖 5-1 所示；<110>碲化鋅是寬頻輻射的最佳來源，可從圖 5-2 及圖 5-3 比較得知；由於多重砷離子佈植砷化鎵的薄膜層(0.1 μm)比低溫分子束磊晶長成的砷化鎵薄膜(1 μm)還要薄，所以所激發的光電流載子會比較少，使得訊號強度較低，而砷離子佈植砷化鎵的雜訊大部分是來自於砷離子薄膜層下的半絕緣性砷化鎵；從圖 5-4 可知，半絕緣性砷化鎵偵測到的雜訊非常大，這是因為長載子生命期，造成載子的堆積，而使得之後產生的載子在傳導過程發生散射，以至於雜訊大量產生。

B. GaN 材料光學分析

6. GaN 之顯微光譜研究 (博士生李兆達)

我們延續上年度利用飛秒雷射激發之共焦顯微光譜術同時看到 HPVPE 技術成長之 GaN 樣品中的二倍頻與三光子激發螢光 (Second harmonic emission and Three-photon-induced photoluminescence) 並對氮化鎵材料得二倍頻轉換特性作量測，並以此推算其同調長度。圖 6-1 實驗裝置。

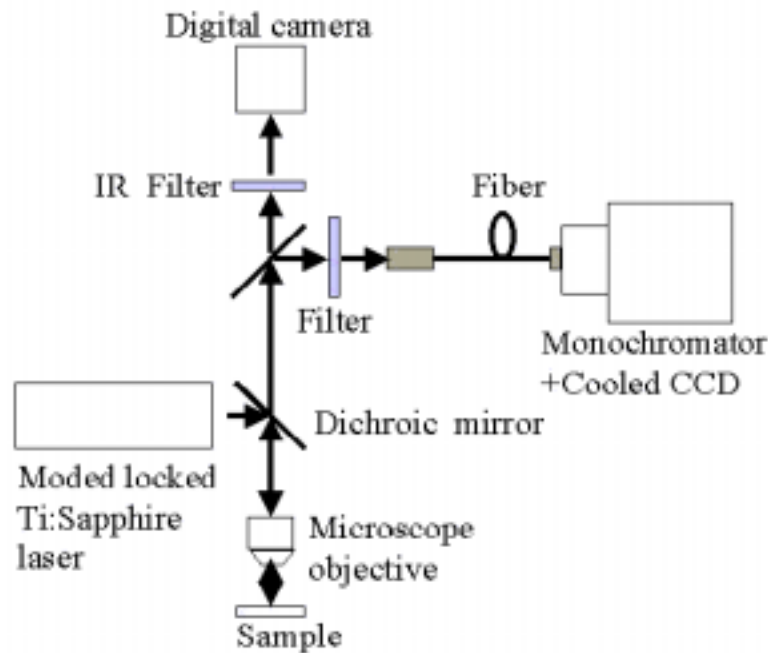


圖 6-1

圖 6-2 是該 GaN 樣品的不同波長激發下光譜

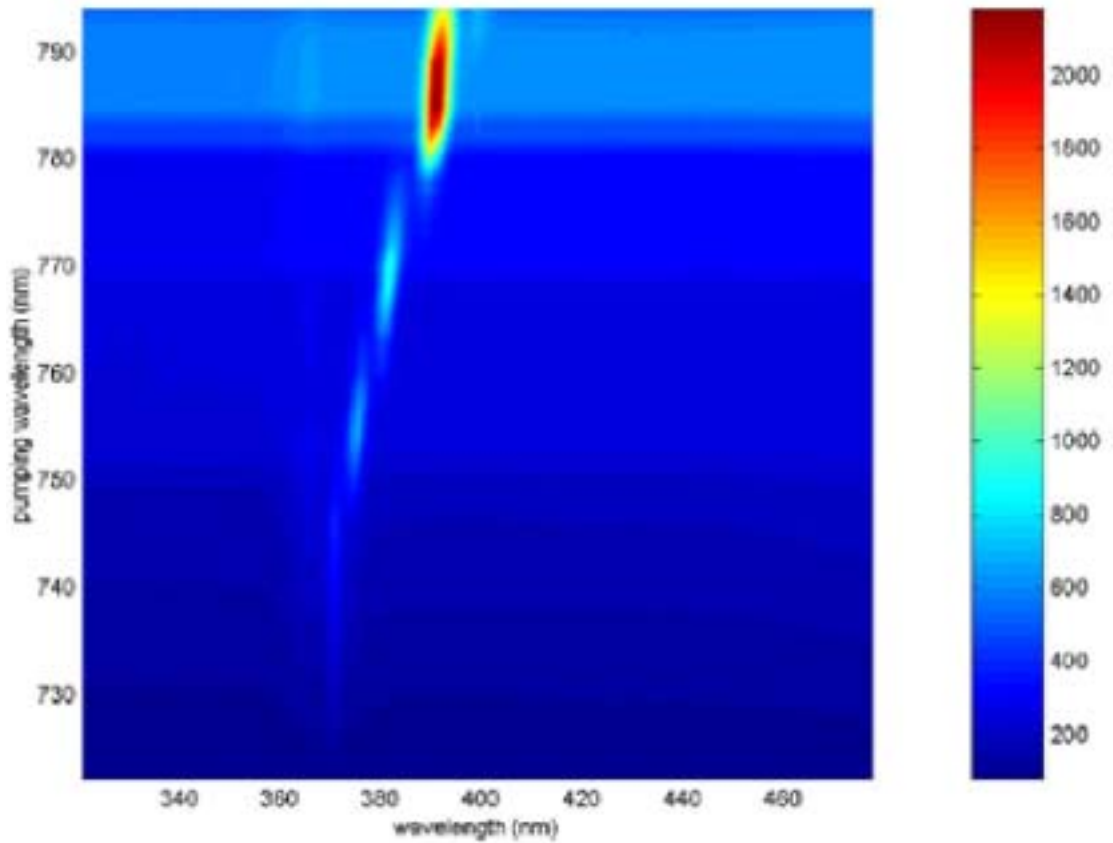


圖 6-2

圖 6-2 有兩個明顯的尖峰，中心波長分別在 367nm 與激發雷射的二倍頻波長。圖 6-3 是所估算出 GaN 的同調長度對波長的關係，其中 A 為節錄自 APL,70(24),16, June 1997 的色散曲線，NCTU 則是本實驗室的結果。

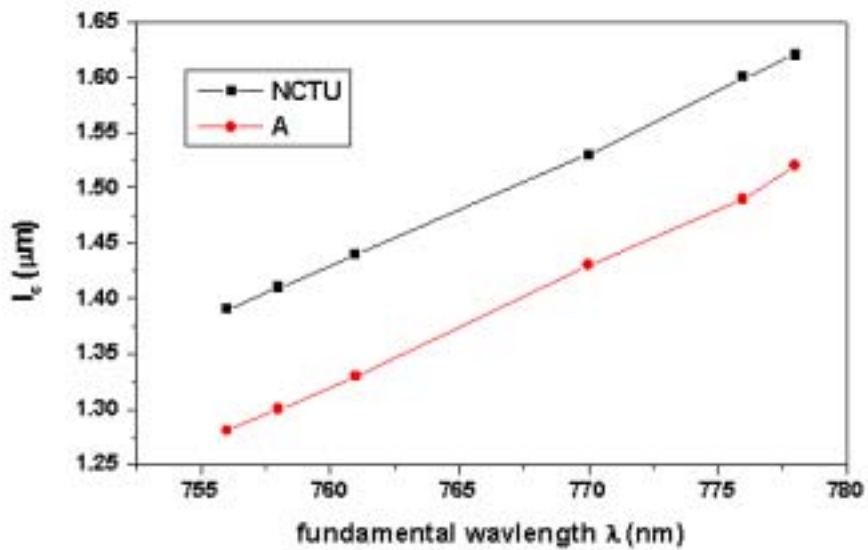


圖 6-3

說明對以 HVPE 成長的 GaN film 其 coherence length 約在 1.3 μm 到 1.6 μm 間

C: 半導體雷射：以外腔結構半導體雷射產生高功率多波長輸出，並研究鎖模後的脈衝輸出特性與時序紊亂度。最後以理論模型分析之。

7.可調譜多波長半導體雷射及注入放大研究（博士生張帆）

本項工作的目的是發展雷射微波及毫米波源所需之高功率多波長半導體雷射，我們已利用一雙波長雷射產生次毫米波輻射。圖 7-1 顯示可調譜三波長雷射架構，

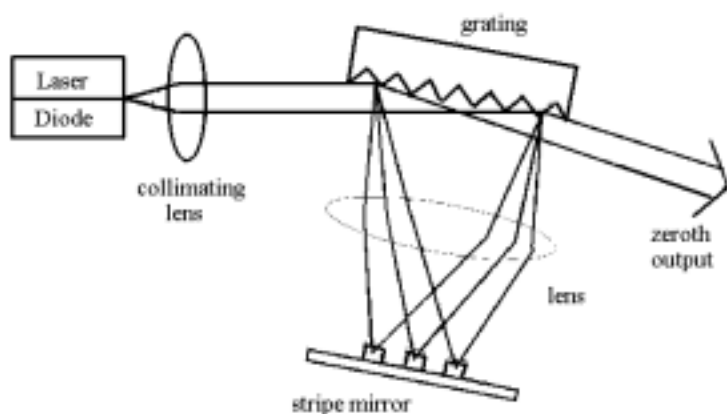
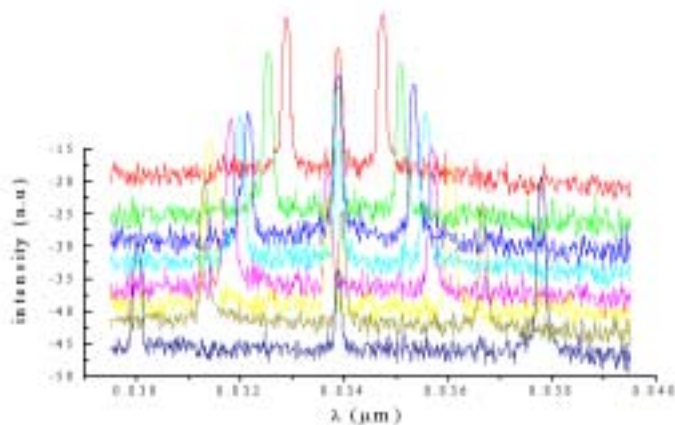
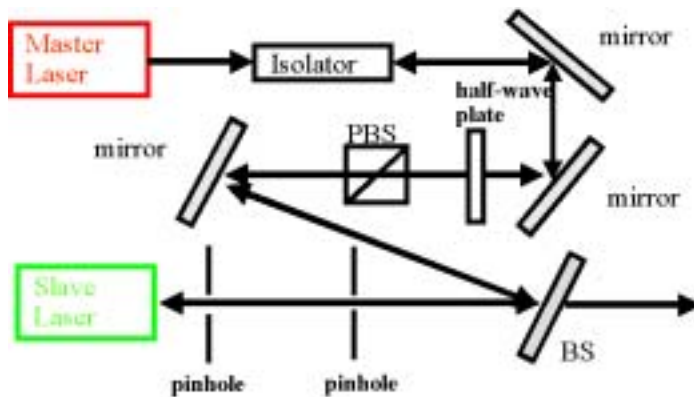


圖 7-2 為其輸出光譜，其中相鄰兩波長間距可由 0.74nm 調至 7.8nm。



利用注入放大（injection amplification，實驗裝置如圖 7-3），



注入放大後之雷射輸出功率可放大約 20dB (大於 300mW)。

8. 液晶電控多波長雷射與其時序混亂度之研究(碩士班---牛崇翰)

在本計劃中，我們利用半導體之製成技術製作液晶反射鏡，經由電極圖形製作、半導體製成、液晶封裝...目前已完成液晶波長選擇器，其製作流程如下圖 8-1 所示：

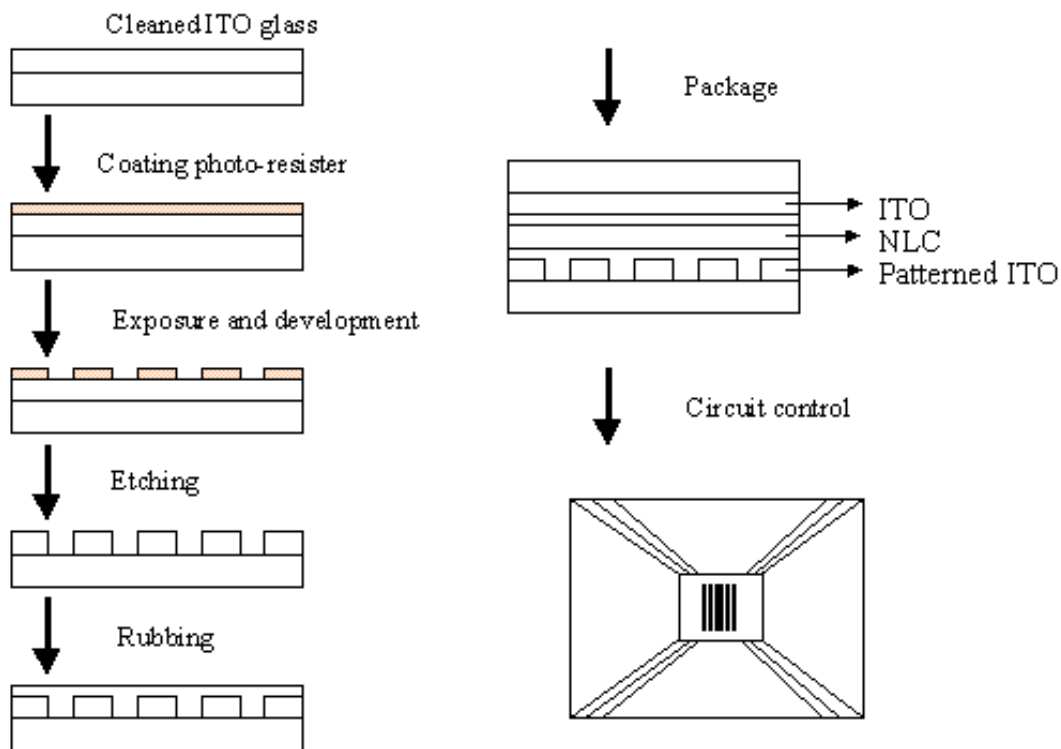


圖 8-1: 液晶元件製作流程

將自製完成的液晶元件，應用在外腔式鎖模半導體雷射系統中，此種雷射系統具有連續波及主動鎖模短脈衝二種操作模式，且可透過外接液晶驅動電路的控制，達到電控多波長的目的。在連續波操作模式下：半導體雷射光束經由光柵分光後，透過液晶元件選取波長，迴授共振放大後輸出，如圖 8-2 所示，調制波長範圍達 9.24nm，旁模抑制比可達 30dB。

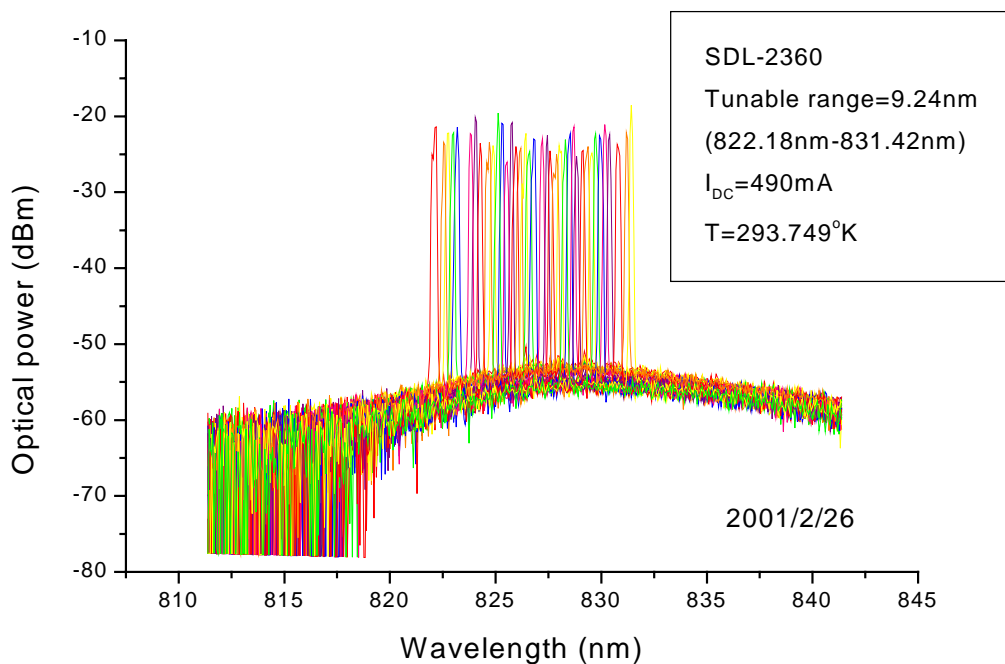


圖 8-2:外腔雷射系統在連續波操作模式下的可調輸出

在鎖模短脈衝操作模式下：經由 Bias-T 將高頻訊號與直流偏壓操作半導體雷射，並配合雷射主動鎖模時之外腔長度，可得約 40ps 之光脈衝，經由高頻頻譜儀及示波器量測其時序混亂度及脈衝波形，其光脈衝的時序混亂度為 0.6ps，如圖 8-3 及圖 8-4 所示。

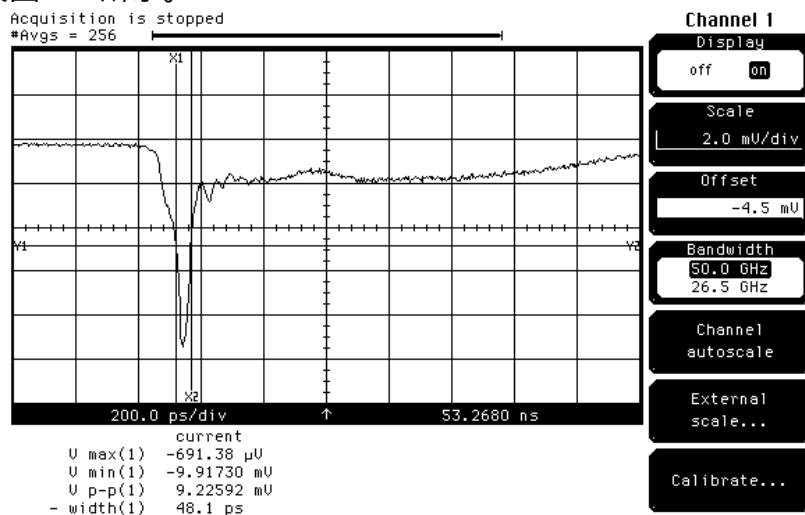


圖 8-3:主動鎖模下的雷射光脈衝輸出

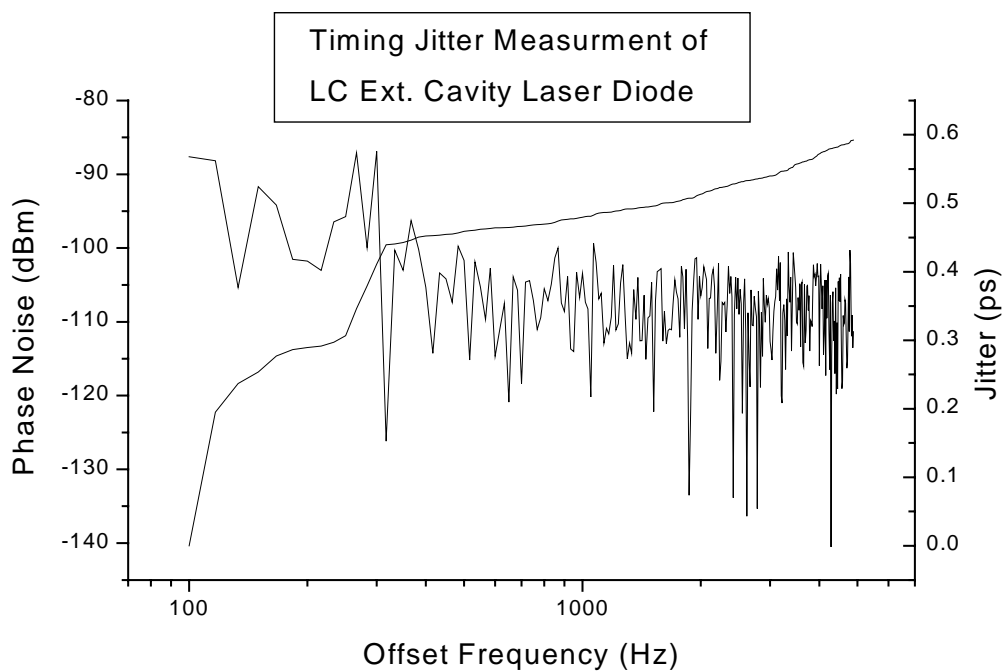


圖 8-4: 雷射脈衝的時序混亂度量測結果

9.外腔式波長可調的鎖模半導體雷射(碩士生王佳祥)

本工作的目的主要是要產生一外腔式波長可調的皮秒級脈衝半導體雷射。我們使用一具有抗反射鍍膜的半導體雷射做為光源，利用一 1800 g/mm 的光柵來分光，再以一 52 pixel 之條型液晶反射鏡，來選取我們想要的波長，此外我們對雷射加以一與外腔相搭配之 RF 調變訊號，來使此一雷射系統達成鎖模而輸出皮秒級脈衝。

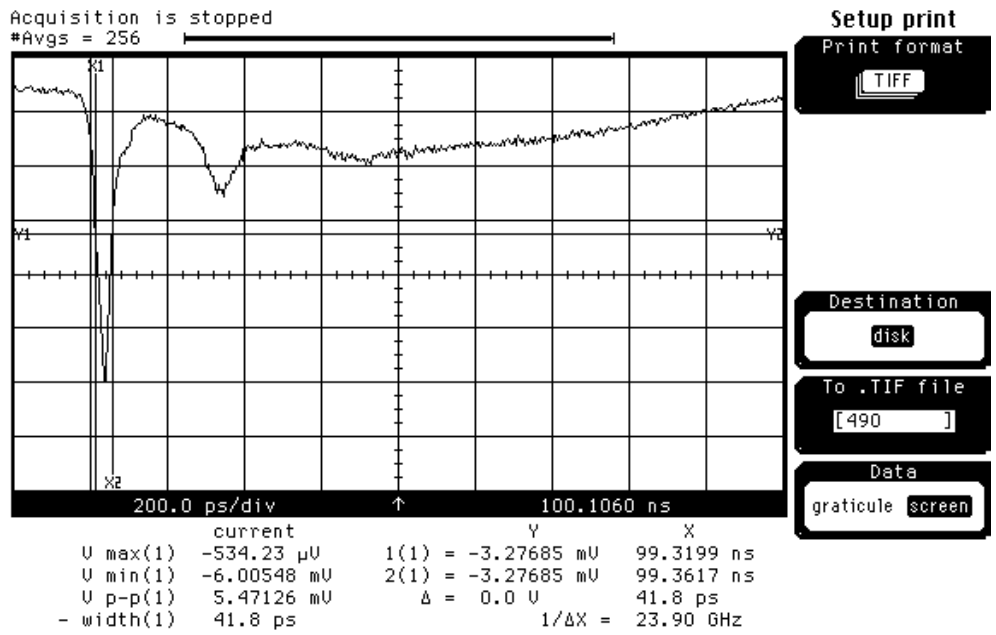


圖 9-1 鎖模輸出之波形

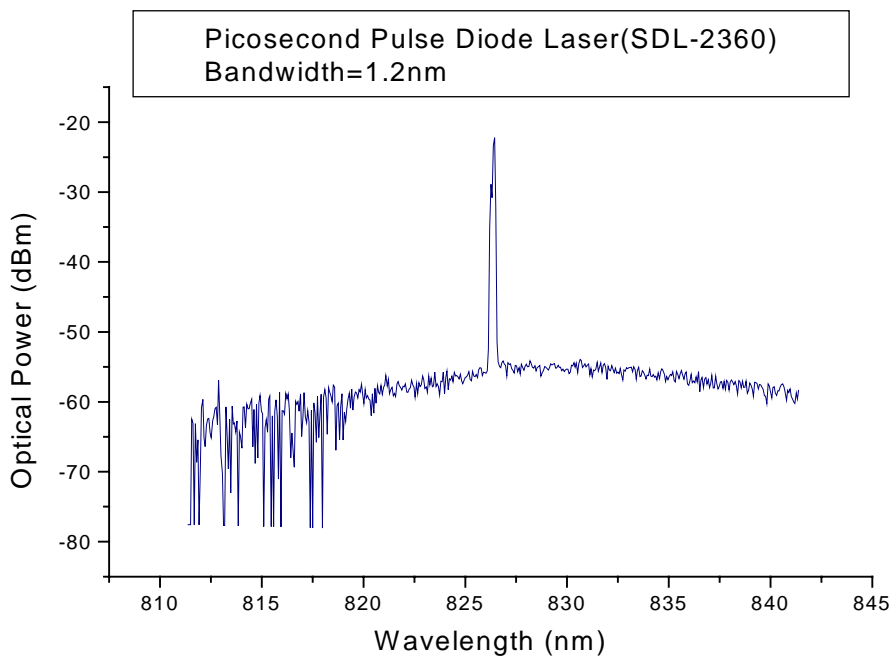


圖 9-2 鎖模輸出時之光譜

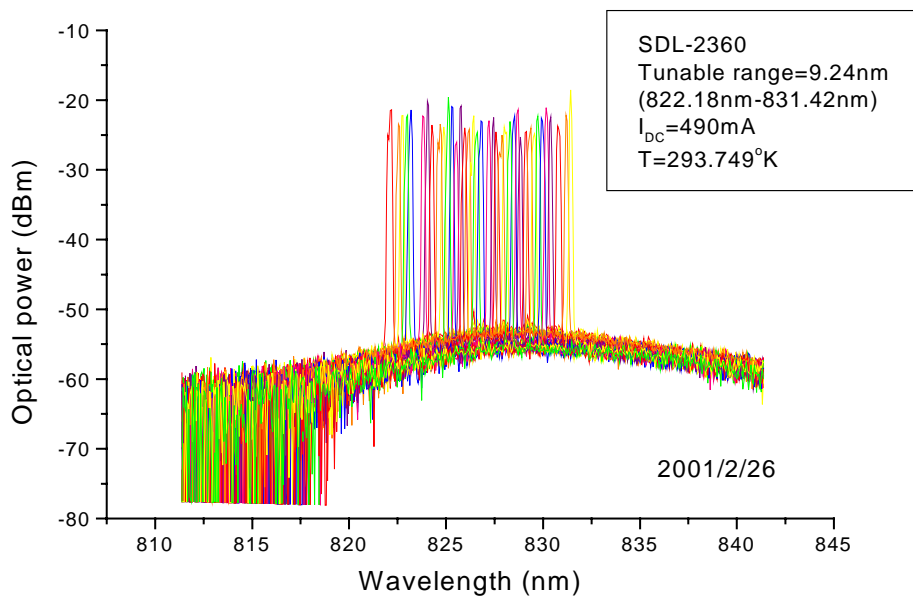


圖 9-3 連續波輸出時之波長可調範圍

10.外腔式半導體雷射輸出特性的數值模擬研究(博士生周榮華)

我們在進行了幾項外腔式半導體雷射的實驗之後,希望能由理論來解釋實驗所觀察到的現象。為了達到此一目的,首先考慮雷射理論的電場行波方程式模型,以電場做為方程式變數的優點,在於除了能夠獲得光振幅的資訊之外,同時也能夠得到相位隨著時間的變化,這是只考慮光子數變數所無法獲得的。

電場的行波方程式可以由最基本的馬克士威爾(Maxwell)方程式開始推導,利用近軸(paraxial axis) 近似法,以及絕熱近似法(eliminated approximation),最後可以得到如下:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial E_{\pm}(z, t)}{\partial z} + v_g \frac{\partial E_{\pm}(z, t)}{\partial t} &= \mp \frac{a}{2} \frac{v_g s N(z, t)}{V} E_{\pm}(z, t) \\
 \frac{\partial E_{\pm}(z, t)}{\partial t} &= \frac{I}{eV} - v_g \frac{\partial N(z, t)}{\partial z} - \frac{N(z, t)}{t_s}
 \end{aligned}$$

- E_{\pm} : right going electric field. E : left going electric field.
- v_g : propagation velocity. a : linewidth enhancement factor.
- s : cross section. N : carrier number.
- I : Injection current. t_s : carrier lifetime. V : Cavity volume.

考慮外腔的影響 邊界方程式則設定為

$$E_1(t) = r_1 E_1(t) + E_2(t) + E_3(t) + E_4(t)$$

- r_1 : reflection coefficient of left side
- r_2 : reflection coefficient of left side
- r_3 : reflection coefficient of the external mirror.
- t_e : the round-trip time of the external cavity.

考慮雷射增益是隨著頻率變化的函數:

$$N = N_0 \left[1 - \frac{S_0}{S_0 + S} \right] \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{Q_a} \frac{1}{t}} \right]$$

將式代入(1)-(3)即是我們所要用來模擬的方程式。

圖 10-1 至 10-3 是半導體雷射物理變數隨時間變化的情形。

圖 10-1 為重複率的微波電流 注入到半導體雷射 之後半導體雷射所輸出的電場的絕對值

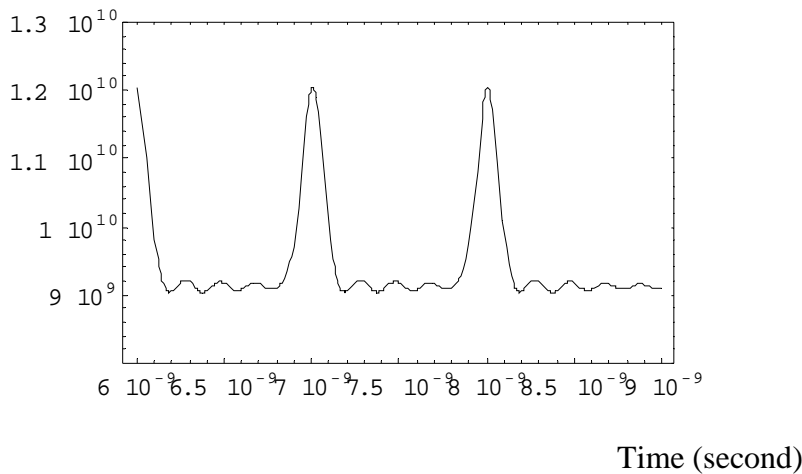


圖 10-1 電場振幅

圖 10-2 為半導體雷射輸出的電場的 Argument 值

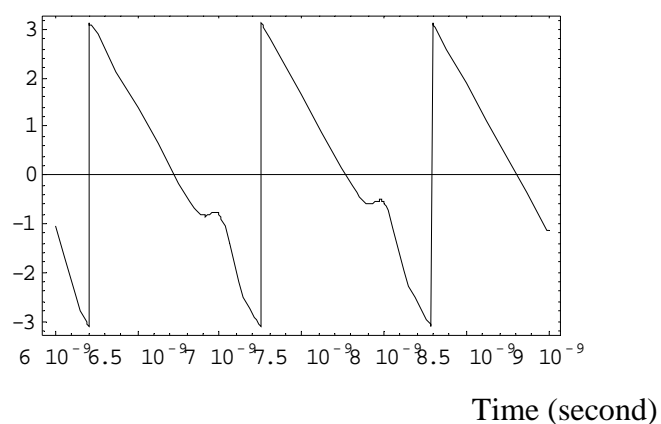


圖 10-2 電場相位

圖 10-3 為半導體雷射內的載子變化

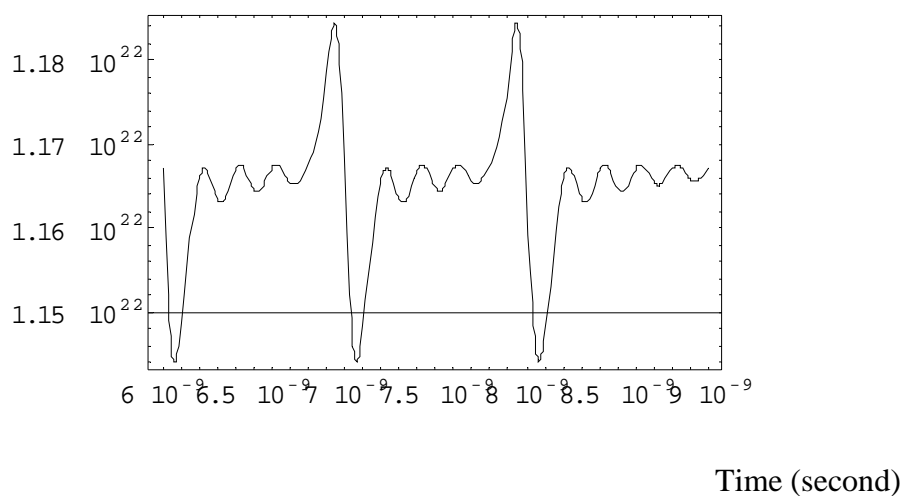


圖 10-3 載子

11. 利用飽和吸收鏡之混成式鎖模半導體雷射之行為研究(碩士生林素圓)

在半導體雷射，被動和混成式鎖模已經被應用於產生次皮秒脈衝。在過去幾十年，多層量子井(MQW)材料使用於鎖模雷射如飽和吸收鏡的光學特性，最重要的理論和實驗工作已經完成。寬頻半導體雷射混成式鎖模包含一個微小樣品

多層量子井飽和吸收鏡可以產生 15 皮秒短的脈衝。在重複率 593MHz，雷射的平均功率和峰值功率分別為 9mW 和 1W。一個有五層量子井的飽和吸收鏡對於被動鎖模結合半導體雷射已經達到 1.9 皮秒的脈衝寬度而不需色散補償。在一個包含半導體飽和吸收鏡的外腔中，一個光學上表面射出的半導體雷射已經能被動鎖模。鎖模雷射射出脈衝在重複率為 4.4GHz 持續期間為 22 皮秒，平均功率為 22mW。

實驗架構圖表示地如圖 11-1 所示。首先，雷射光束從有抗反射的半導體射出，且由聚焦透鏡(New port, F-L10B)使其聚焦。然後光通過一個二分之波長片和一柱狀透鏡($f = 20\text{ cm}$)去控制水平發散。最後，第二個小焦距($f = 4.5\text{ mm}$)的聚焦透鏡，使得在 SBR 上的光點小於在半導體雷射上。

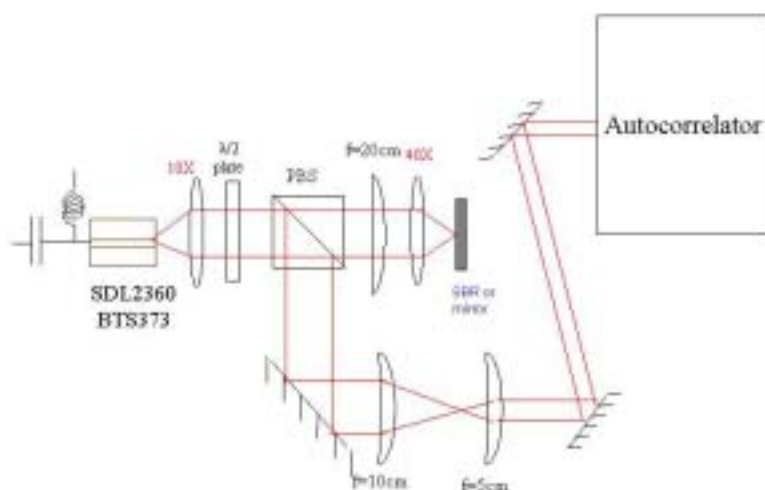


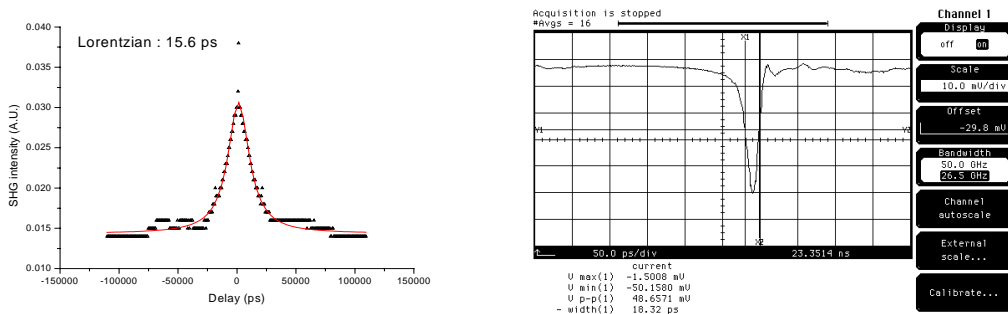
圖 11-1 圖表式的鎖模腔架構

表 11-1 是鎖模半導體雷射四個不同的腔的輸出，分別為輸出耦合鏡($R = 80\%$)腔，聚焦銀鏡腔，飽和吸收體腔和離子布植飽和吸收體腔。飽和吸收體腔比銀鏡腔有較大的閾值電流，因為飽和吸收體有較低的反射率。在混成式鎖模脈衝寬度從 19.5 皮秒減至主動鎖模的 16 皮秒。同時，頻譜頻寬從 1.6nm 變寬至 3.4nm。

表 11-1 結果與四個不同腔的鎖模脈衝寬的條件

	Output coupler	Silver mirror	SBR	Implanted SBR
I_{th} (mA)	287	351	393.4	396.5
DC bias (mA)	352	460	500	500
RF freq. (MHz)	533.0	514.15	513.17	513.2
RF power (dBm)	30	30	30	30
Pulse width (psec)	25	19.5	16	15.6
FWHM (nm)	1.96	1.6	2.3	3.4
λ_0 (nm)	838.3	836.6	839.6	837.1
Ave. power (mA)	8.52	24.5	19.4	19.5

圖 11-3 證明，當雷射驅動在 513.2 MHz 和 30 dBm 的功率及直流偏壓 500 mA，混成式鎖模 SLD 系統最佳的結果，脈衝寬 15.6 皮秒和頻譜的半高寬 3.4nm。



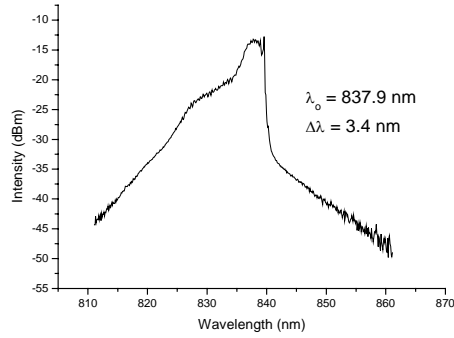


表 11-3 (a)脈衝寬為 15.6 皮秒的自相關軌跡

(b)混成式鎖模脈衝的波形

(c)半高寬為 3.4nm 的相關頻譜

有飽和吸收體時，得到雙脈衝。前一個脈衝比第二個脈衝(落後約 250 皮秒)小 10 倍，與雷射特性有關。射頻頻率重調的行為，較小脈衝的關係和有銀鏡的主動鎖模的關係一樣。隨著調整頻率其他的脈衝快速的變短。脈衝寬也和所加的電流及射頻功率有很嚴苛的相關，當由飽和吸收體和離子布植飽和吸收體得到的脈衝寬旨在邊緣上有不同(16vs. 15.6 皮秒)。在離子布植飽和吸收體腔，由前一個脈衝較小可指出較短的恢復時間使得混成式鎖模過程較完全。

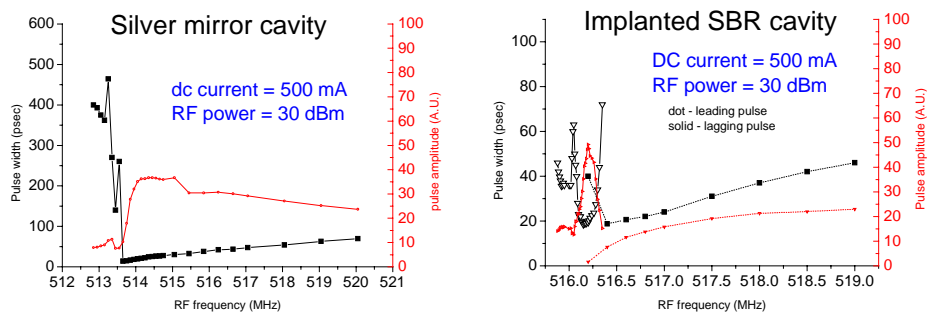


圖 11-4 射頻頻率重調的行為

(a) 主動鎖模

(b) 混成式鎖模

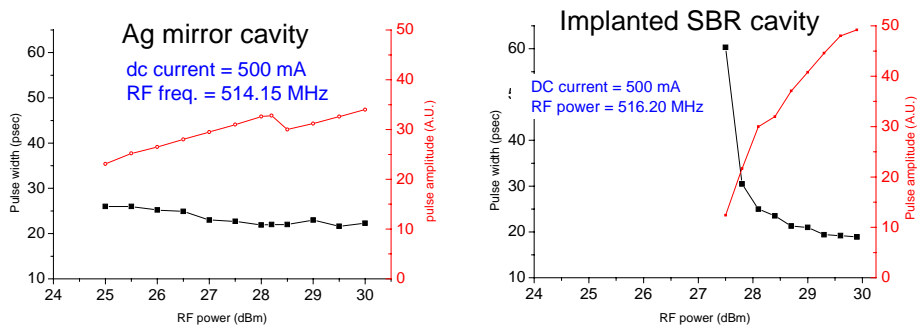


圖 11-5 射頻功率重調行為

- (a) 主動鎖模
- (b) 混成式鎖模

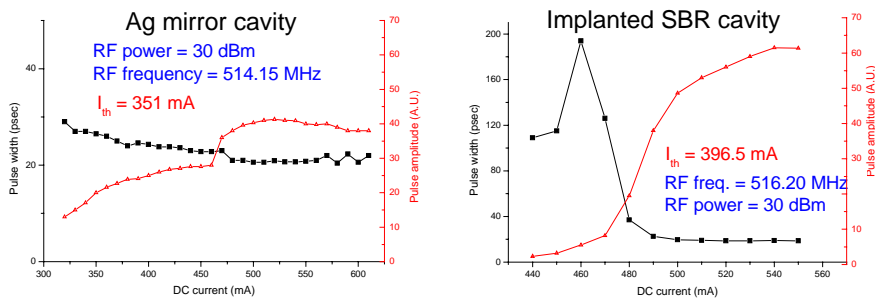


圖 11-6 直流電流重調行為

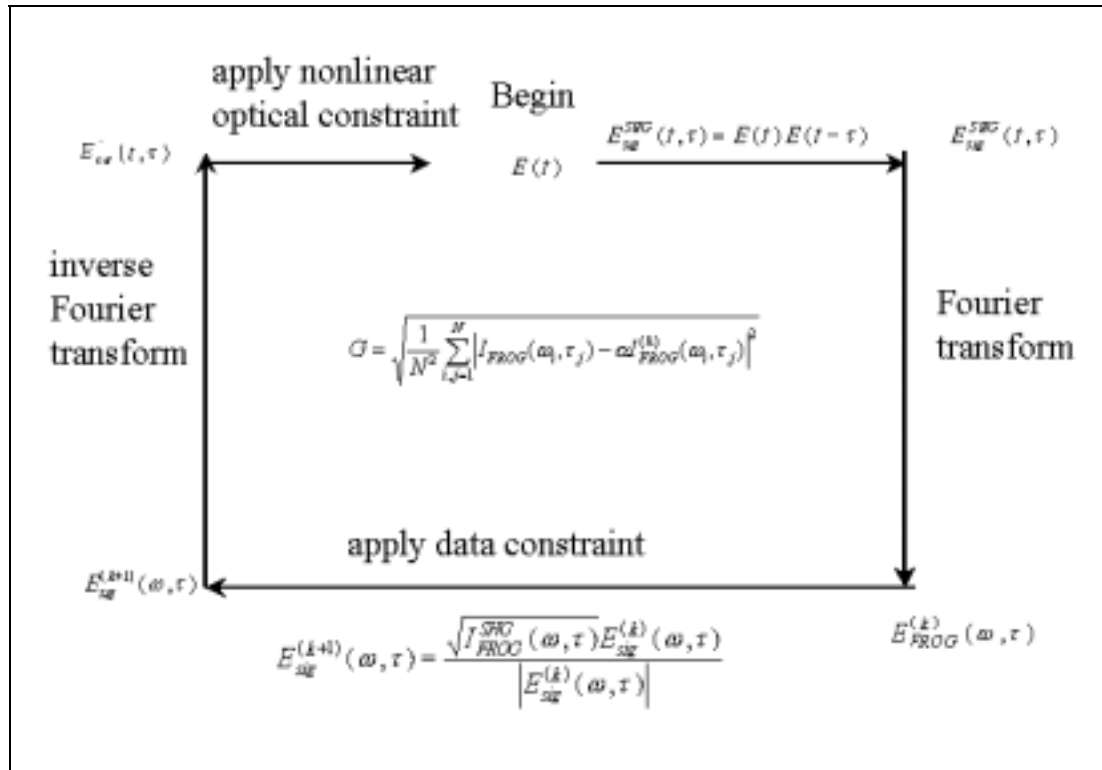
- (a) 主動鎖模
- (b) 混成式鎖模

我們已經證明一個鎖模半導體陣列雷射的簡單系統，這系統可以產生皮秒脈衝，高功率高於那些可得的單一條紋半導體。在 513.20MHz 脈衝有 15.6 皮秒短，且平均功率 19.4mW，先關的峰值功率可達 2.4W。關於 15.6 皮秒，所觀察的的頻譜寬度為 4.4nm，指出時間頻譜寬乘積為 29.4，且富氏轉換限制約為 67。飽和吸收體和離子布植飽和吸收體有效的放大雷射頻譜，從 1.6nm(主動鎖模)到 2.3nm(主動鎖模和飽和吸收體)和 3.4nm (主動鎖模和離子布植飽和吸收體)。與強度有關的非線性特性為飽和吸收體作用的定性證明。

D: 飛秒脈衝雷射特性研究: 我們自建一套頻譜解析光閘系統量測雷射輸出振幅與相位並研究雷射在鎖模啟動過程中脈衝特性的變化情形,最後並分析整形後的脈衝

12.飛秒雷射脈衝量測技術 (碩士生邢滌心)

最近超快雷射的發展很快，超快光脈衝參數的量測也越形重要。本年度我們建立了頻譜解析光閘 (Frequency Resolved Optical Gating, 簡稱 FROG) 實驗裝置，完成了以 Labview 程式為基礎的疊代式相位復原演算法 (iterative phase retrieval algorithm), 以分析 FROG 影像，以便更精準的取超快光脈衝的振幅與相



位資訊。圖 12-1 顯示此演算法之流程圖：

圖 12-2 顯示模擬的結果。12-2 分別是沒有 chirp 具線性 chirp、自相位調變以及雙脈衝的及其對應的 FROG 圖形。

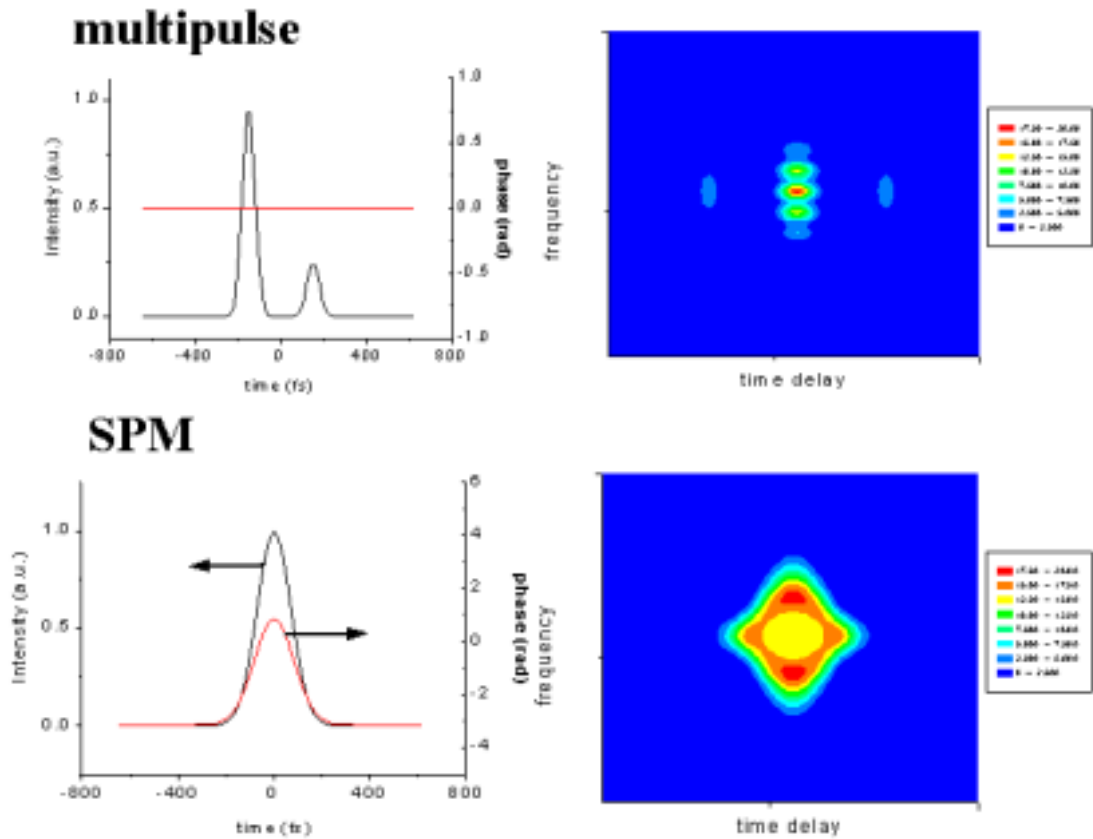
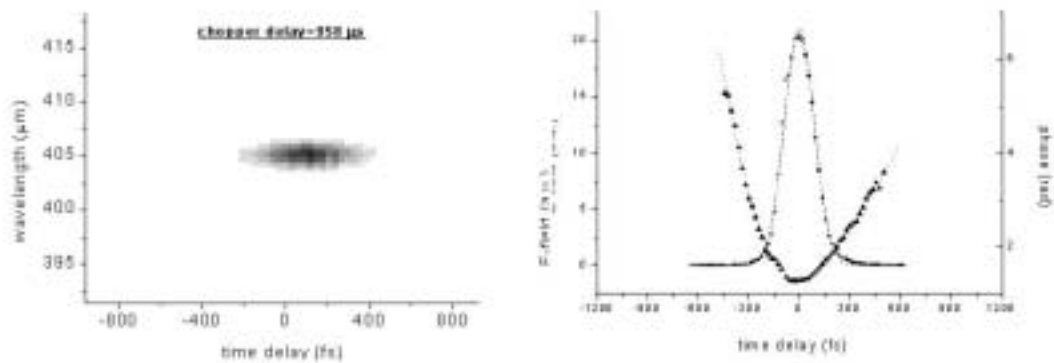


圖 12-3 是實際量測一台被動鎖模 Ti:sapphire/SSBR 雷射的 FROG 圖形及用這個演算法獲取的脈衝波形與相位。



13. 利用 FROG 技術研究超快雷射特性(碩士生何志平)

我們發展一套 SVD 演算法以對光脈衝電場進行特性分析，和以前使用的 Conjugated-Gradient 方法比起來，程式撰寫上更容易且程式執行的速度加快，而在雜訊過濾上我們使用低通濾波器濾掉高頻雜訊，以使演算的結果更好。實驗上我們使用色散補償稜鏡對調整不同的脈衝啾頻，裝置如圖 13-1：

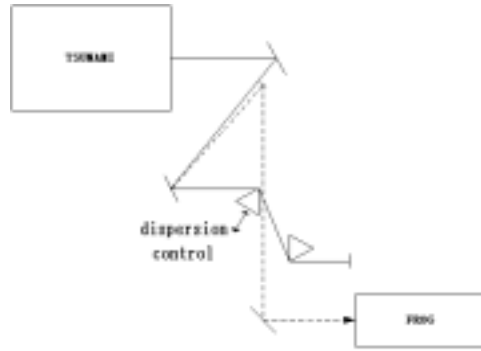


圖 13-1

來驗證程式實際上的可靠度，並獲得一不錯的結果，大致可以獲得脈衝的相位資訊。

利用這工具(SVD)結合時間閘技術量測我們自製的鈦藍寶石被動鎖模雷射的啟動特性，我們發現在啟動後 36 微秒至 42 微秒期間脈衝的相位呈現比較不對稱的形狀如圖 13-2 至圖 13-5：(3D 圖：一為實驗得到的 FROG trace，一為疊代出來的 FROG trace；2D 圖：一為模擬出來的脈衝電場，一為模擬出來的自相關軌跡)

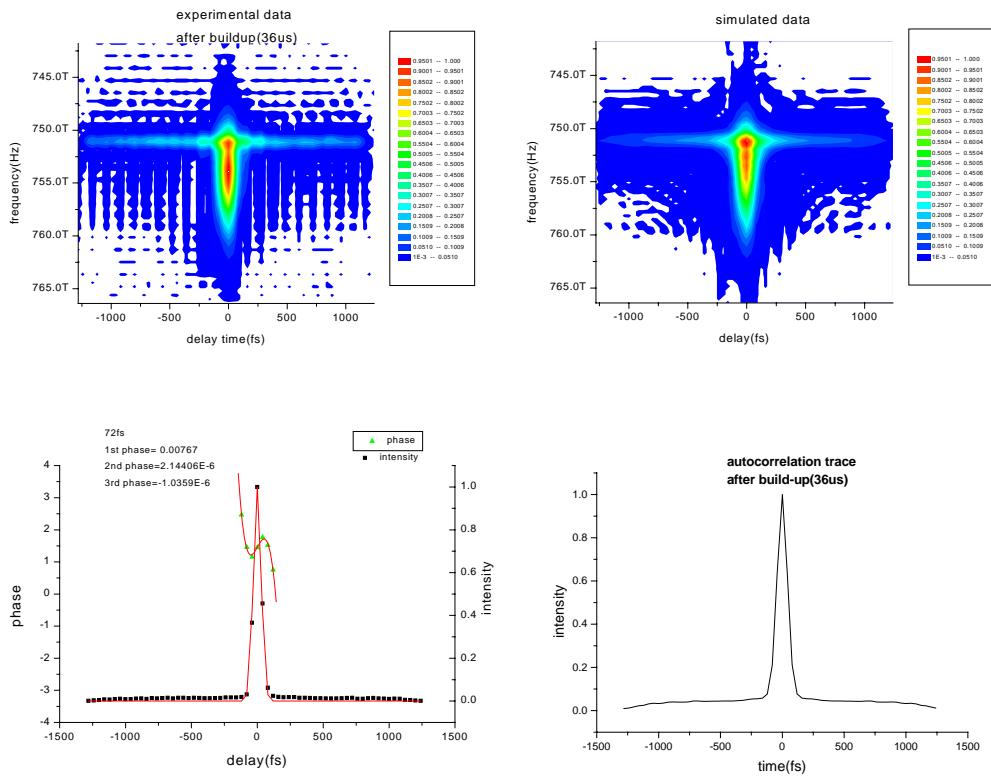


圖 13-2

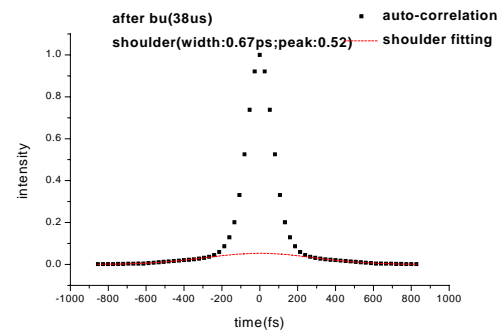
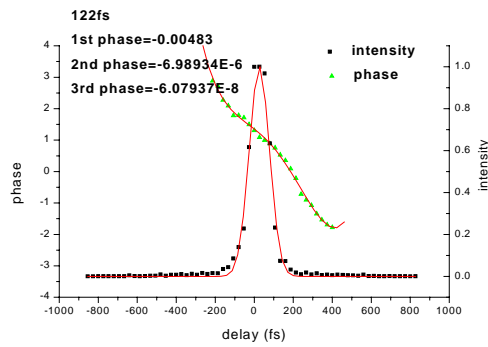
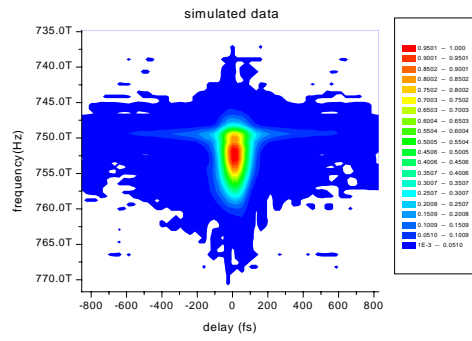
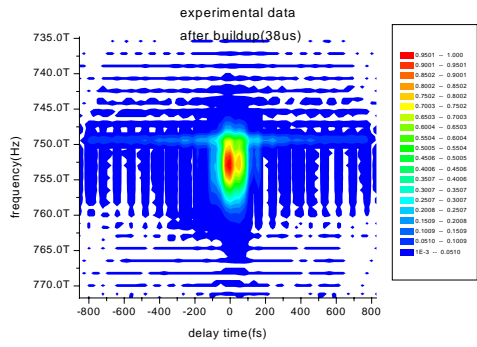


圖 13-3

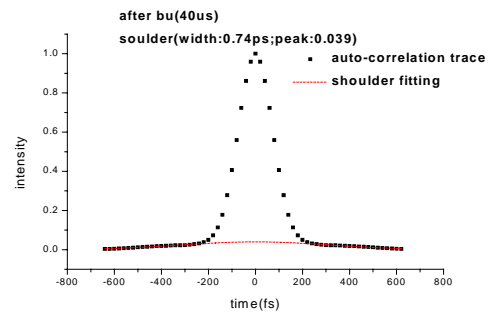
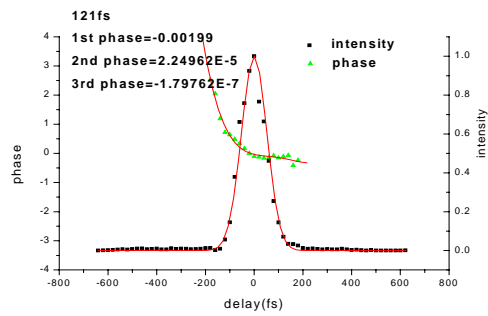
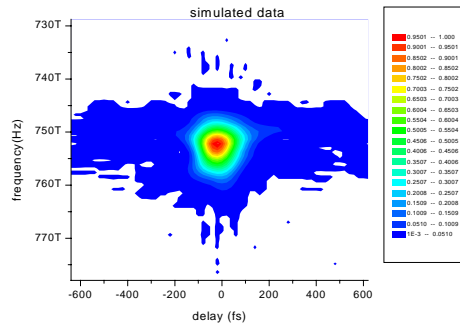
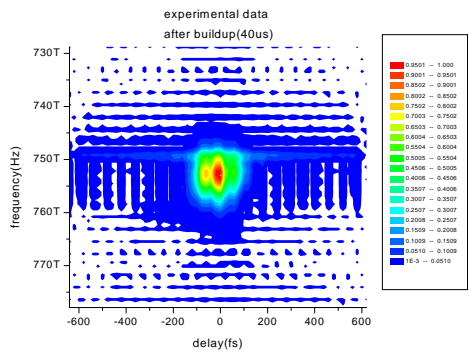


圖 13-4

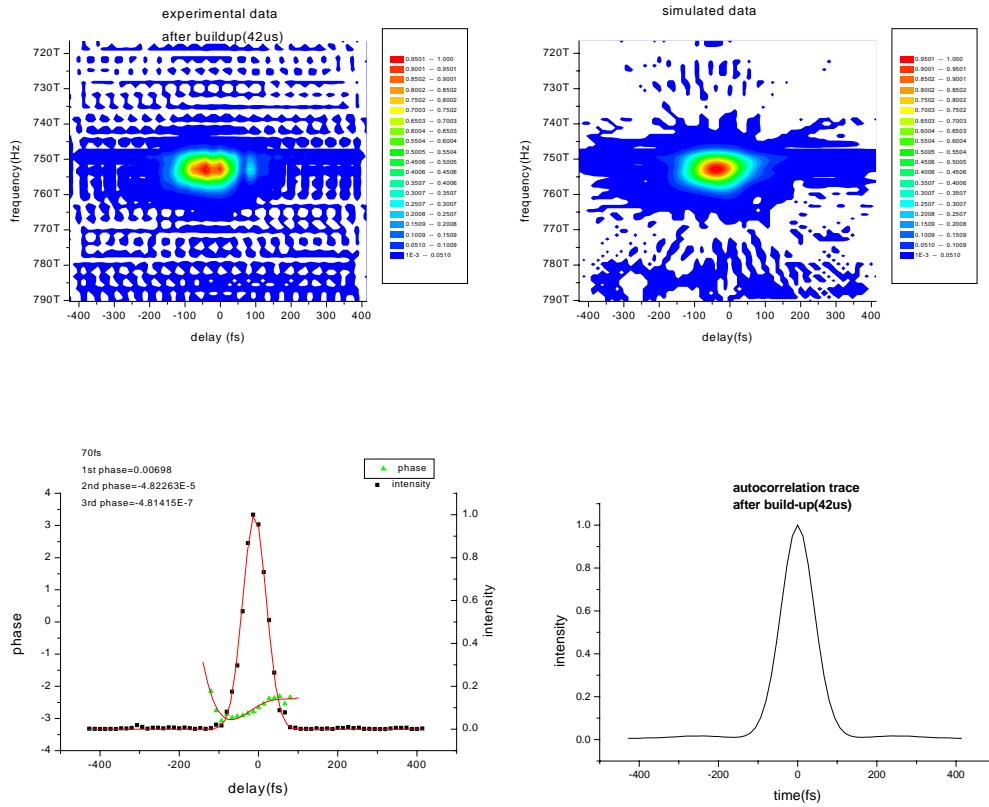


圖 13-5

推測這跟飽和吸收作用而導致的脈衝前後緣不對稱，進而影響到脈衝經過增益晶體後受到的 S P M 效果不一樣所引起的相位差。而且在這段時間內也觀察到模擬的自相關軌跡具有底座現象，所以還存在某些雜亂模使得雷射不是很穩定，所以疊代出來脈衝的寬度變化很大如圖 13-6;

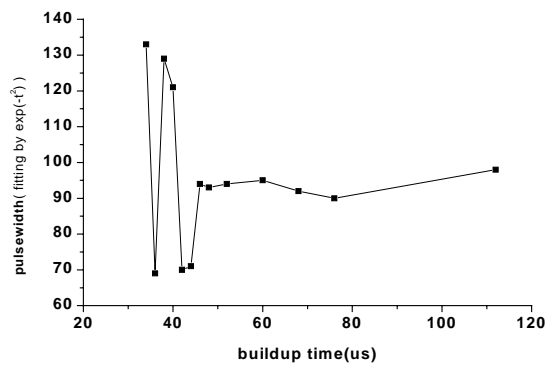


圖 13-6

14. 飛秒雷射脈衝量測與形變之研究(碩士生詹翰松)

I. 緒論

過去四十幾年來，在皮秒級(10-12s;ps)及飛秒級(10-15s;fs)的超快脈衝雷射技術不斷被發展。現在飛秒固態雷射技術已經進步到可以直接產生脈衝寬度低於6fs。另一方面，伴隨著超快雷射的發展，脈衝的量測技術也一直在進步，頻率解析光閘(Frequency Resolved Optical Gating: FROG)就是其中一種比較方便的量測方式，只需一個自相關儀配合單頻儀和 CCD 便可以進行量測。過去我們實驗室便以時間閘門(time-gated)頻率解析光閘對飛秒級鈦藍寶石雷射啟動時的進行一系列的量測，以此研究鎖模雷射脈衝啟動其間色散變化情形。

相對於脈衝的產生，脈衝的形變(pulse shaping)技術也是另一不斷發展的方向，而且在物理、或化學、通訊等許多方面也已經有許多應用。例如脈衝序列串產生共鳴聲子激發 寬頻通訊的編碼 由光導偶極天線產生 Tera-Hz 輻射的控制 啾頻脈衝控制化學反應等等。在本篇論文中，我們主要是利用頻率解析光閘來量測飛秒脈衝，以研究脈衝的形變情形，以期能夠產生我們需要的脈衝特性。

II. FROG 技術量測原理

近年來由於頻率解析光閘(FROG: Frequency Resolved Optical Gating)的發展，因此對於脈衝的振幅和相位可以得到較完整的資訊。頻率解析光閘可以得到任意波形的脈衝振幅和相位對時間的函數，而頻率解析光閘的架構主要可以分成兩大部分，一為實驗架構，另一為演算法架構；其中實驗架構是將兩個相同的脈衝以一個可控制的時間延遲作用在非線性晶體上，在不同的時間延遲下用單頻儀+CCD 量取此非線性光學訊號的頻譜。在演算法方面，頻率解析光閘則是利用相位重建演算法(phase retrieval algorithm)將實驗所得到的頻率解析光閘影像(FROG trace)代入演算法中算出光脈衝相位與振幅對時間的關係。我們將使用SVD(Singular Value Decomposition)演算法把新猜測的電場求出來。

III. 頻率解析光閘控制程式

過去我們實驗室以 FROG 技術對飛秒級鈦藍寶石雷射啟動時的電場和相位變化做研究。在量測時，使用 Acton Research Corporation 的 CCD 及資料分析軟體 SpectraSence 量取此非線性光學訊號的頻譜，得到實驗的 FROG trace 後，再代入由 LabVIEW 所寫的演算法程式算出電場和相位，圖 14-1 為系統架構，圖 14-2 為 SpectraSence 量取的頻譜。

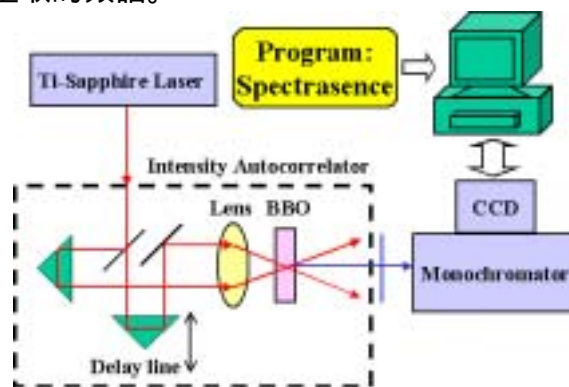


圖 14-1

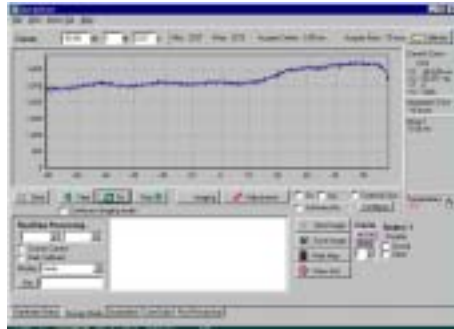


圖 14-2

現在實驗架構中由 LabVIEW 程式來控制單頻儀+CCD 量取 FROG Trace，然後直接代入演算法中算出光脈衝相位與振幅，藉此可以由 LabVIEW 程式來全自動控制量測 FROG，如圖 14-3 及 14-4。

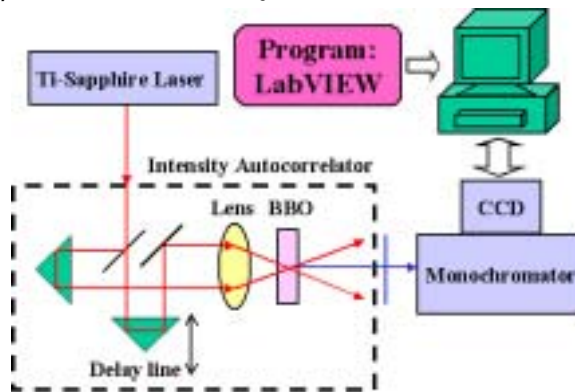


圖 14-3

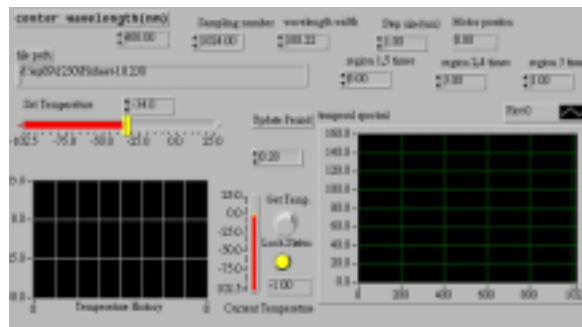


圖 14-4

量測到的脈衝電場振幅及相位如圖 14-5、14-6。

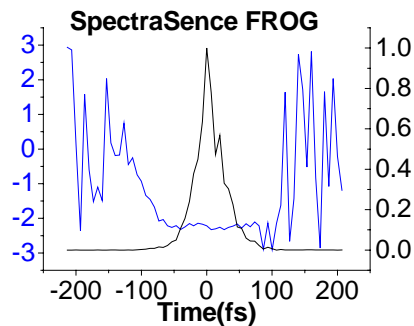


圖 14-5

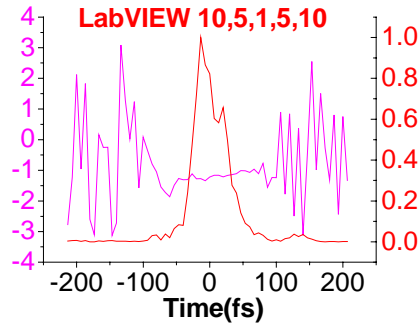


圖 14-6

IV. 脈衝形變原理

過去十幾年來藉由光波形合成方法(optical waveform synthesis method)來達到脈衝形變(pulse shaping)產生使用者指定波形的脈衝或是將脈衝壓縮至頻寬對應的最短脈衝寬度等兩方面有相當大的發展。脈衝形變就是藉由形變裝置將光脈衝之頻譜在空間中展開，再加上空間光調制器(Spatial Light Modulator : SLM)將光脈衝之頻譜做平行調制，使得輸出之光脈衝形變。脈衝之形變可分為脈衝電場振幅調制(amplitude modulation)及脈衝相位調制(phase modulation)兩種，在相位調制上，脈衝強度不會因相位調制而變化，所以具有低損耗(low loss)的優點。圖 14-7 是脈衝形變裝置圖，光脈衝在經過第一個光柵後不同的頻率分量被角度色散開，在經由第一個透鏡後平行聚交，脈衝的頻率分量便在空間中展開，光通過在富立葉平面的空間光調制器後被調制，並再經過第二個透鏡及光柵而合成。

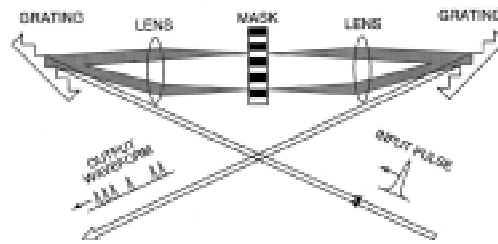


FIG. 2. Basic layout for Fourier transform femtosecond pulse shaping.

圖 14-7

V. 脈衝形變演算法

在相位調制方面，我們使用兩種演算法，第一種是模擬退火(simulated annealing)演算法、第二種是富立葉轉換(Fourier transform)演算法。模擬退火法是利用梯度來尋找極值的方法，這個演算法的關鍵即是模擬液體冷卻、晶體凝結或是金屬退火(annealing)的過程，在高溫時分子相對於彼此可以自由移動，但是溫度緩慢冷卻下來時，分子會排列成完美的晶體，使得系統的能量最小。演算法結構如圖 14-8。



圖 14-8

富立葉轉換演算法的結構如圖 14-9，在一開始時由頻域電場開始，電場振幅由實驗頻譜開根號獲得，加上任意電場相位，再由富立葉反轉換將電場由頻域轉到時域，時域電場振幅由目標電場振幅取代，再由富立葉轉換將電場由時域轉到頻域，如此反覆疊代所獲得頻域相位即 SLM 相位調制函數 $M(\omega)$ 。

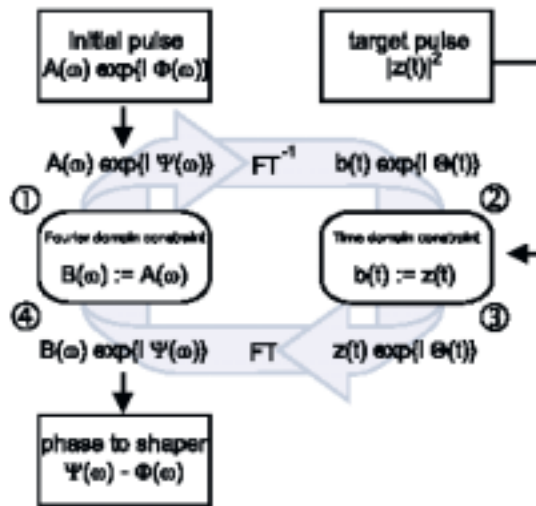


圖 14-9

圖 14-10 為任一輸入頻譜，使用模擬退火演算法，形變為 square 脈衝之電場振幅及 SLM 相位調制函數 $M(\omega)$ ，圖 14-11 使用富立葉轉換演算法。

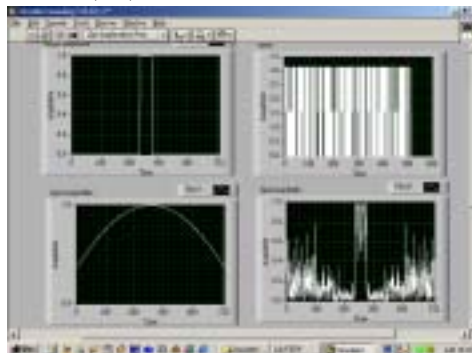


圖 14-10

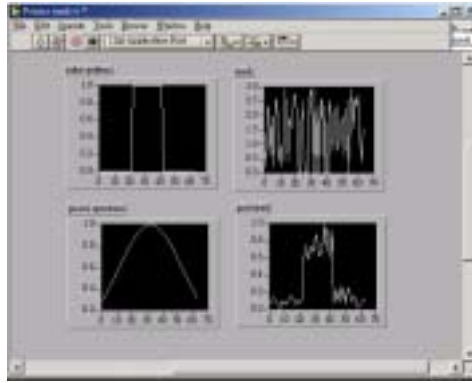


圖 14-11

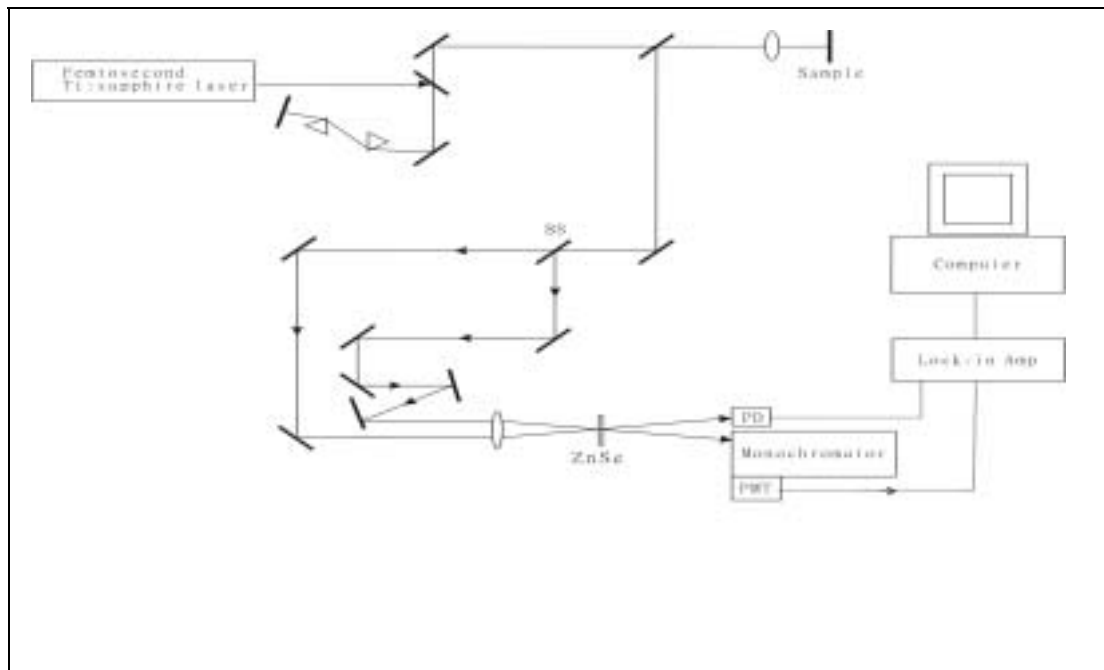
IV. 結論

我們改良了頻率解析光閘系統，以 LabVIEW 程式控制量測脈衝，以獲得脈衝電場和相位的時間函數，並以此系統作脈衝形變之研究。並且使用了模擬退火演算法及富立葉轉換演算法分別計算任意脈衝波形的相位調制函數 $M(\omega)$ 。

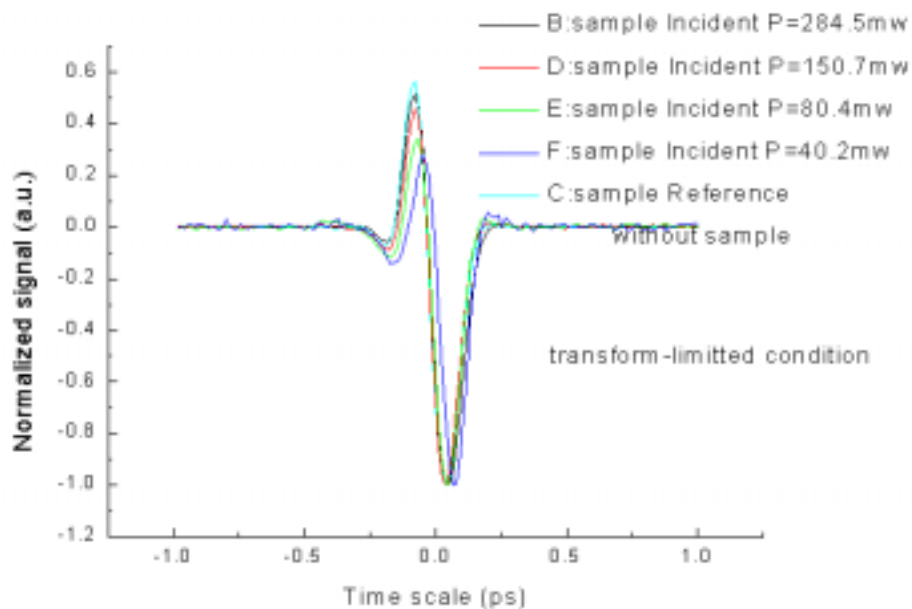
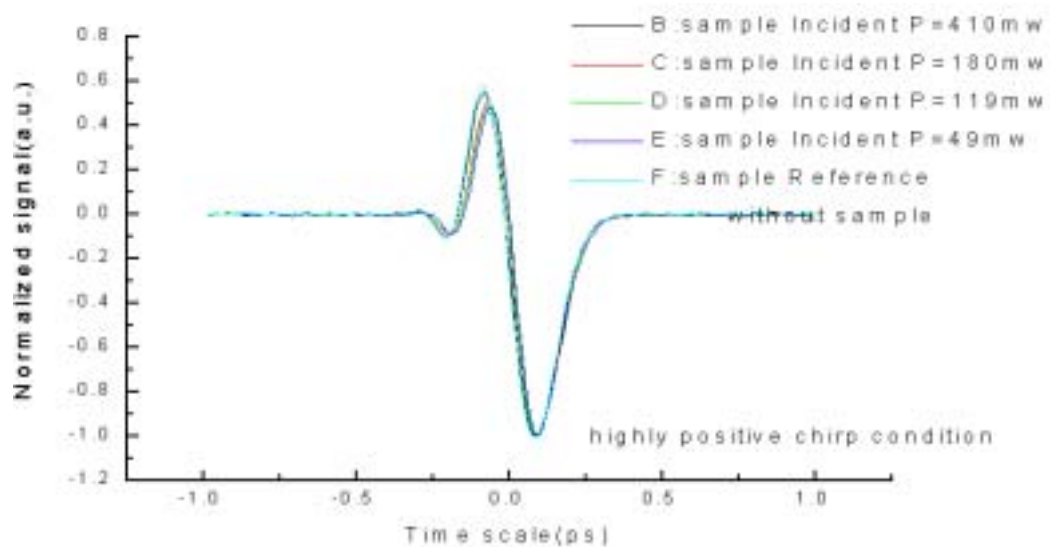
E: 飽和吸收鏡之研究: 以雙波耦合法量測飽和吸收鏡之特性, 並以此類飽和吸收體與 KLM 相結合達到可條波長範圍 100nm 的飛秒雷射輸出(780nm 到 880nm).

15. 用雙波耦合 (two-beam coupling) 法研究鎖模用飽和吸收鏡特性 (碩士生李國庭)

半導體飽和吸收反射鏡 (saturable Bragg reflector, SBR) 在我們設計的飛秒級被動鎖模 Ti:sapphire 雷射建立的初期扮演了相當重要的角色。在這項工作中，我們希望能應用 two beam coupling technique (TBC) 高敏感度與良好訊噪比的優點來觀察與模擬 laser pulse 在經過 SBR 後，其相位與波形所產生的變化。期能從實驗中瞭解 SBR 在 cavity equation 裡所扮演的角色，並更加清楚的認知 SBR 的工作原理與設計方向。圖 15-1 即實驗裝置：



以樣品 K242 為例，結構為 17 層 DBR 上之單層量子井吸收層，吸收中心波長為 810nm，提供高反射率頻譜範圍為 795nm~850nm，飽和能量密度(saturation fluence)為 $131.42\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。調整入射光的功率，可觀察 SBR 在不同能量密度 (lowfluence, near saturation fluence, high fluence)照射下，對脈衝波形與相位上的影響。圖 15-2 及 15-3 分別是在入射光脈衝為 highly positively chirped 與 transform-limited 的情況下，所獲得的 TBC 實驗結果。



由直觀上的判斷可發現雷射光源在經過 SBR 後的確在相位上產生變化。當能量密度越高，SBR 所表現的就如同一面反射鏡。隨著能量密度降低，SBR 對 laser pulse 的影響越為明顯。除了相位外，我們推測在雷射波形在低能量的密度下，因量子井參與吸收而訊號有所變化。此外，transform-limited 條件下的訊號變化較 highly positively chirped 條件下為大。這可以解釋為 SBR 本身所導致的 chirp parameter 的變化並不大，故在 highly positively chirped 條件所造成的影響有限，反之亦然。

16. 利用 SBR 的共振被動鎖模雷射之研究 (碩士生陳哲聰)

這項工作的目的是結合 KLM 鎖模雷射與具腔內飽和吸收體(如 SBR)的被動鎖模雷射的優點，使雷射可以輸出超短脈衝，波長可調諧，同時可以自起動 (self-starting)。雷射的結構如圖 16-1 所示：

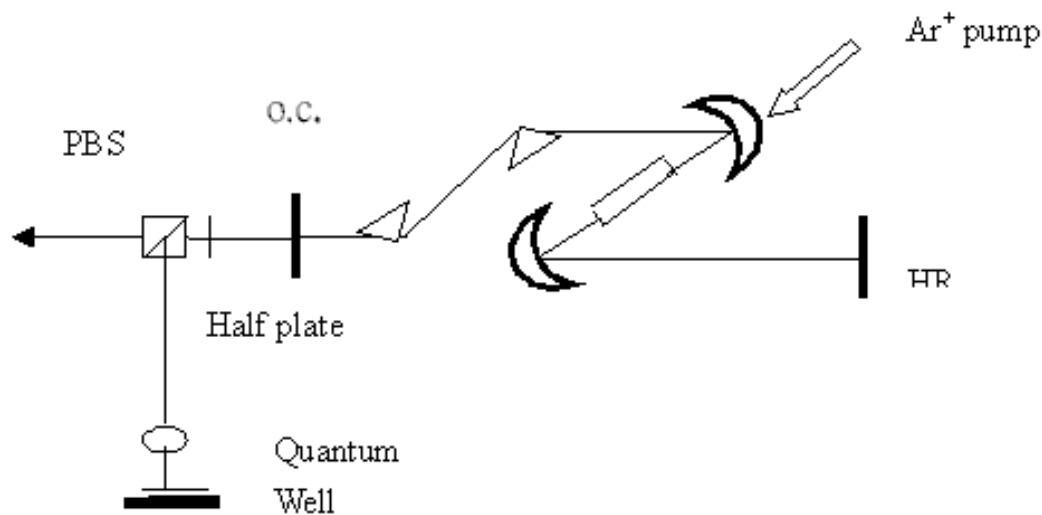


圖 16-1

此雷射在 KLM 模式下工作時，輸出脈衝寬最短約 73 飛秒，頻譜寬約 15 奈米。且波長由 780-880 奈米都可以鎖模脈衝輸出 (請參考圖 16-2)。

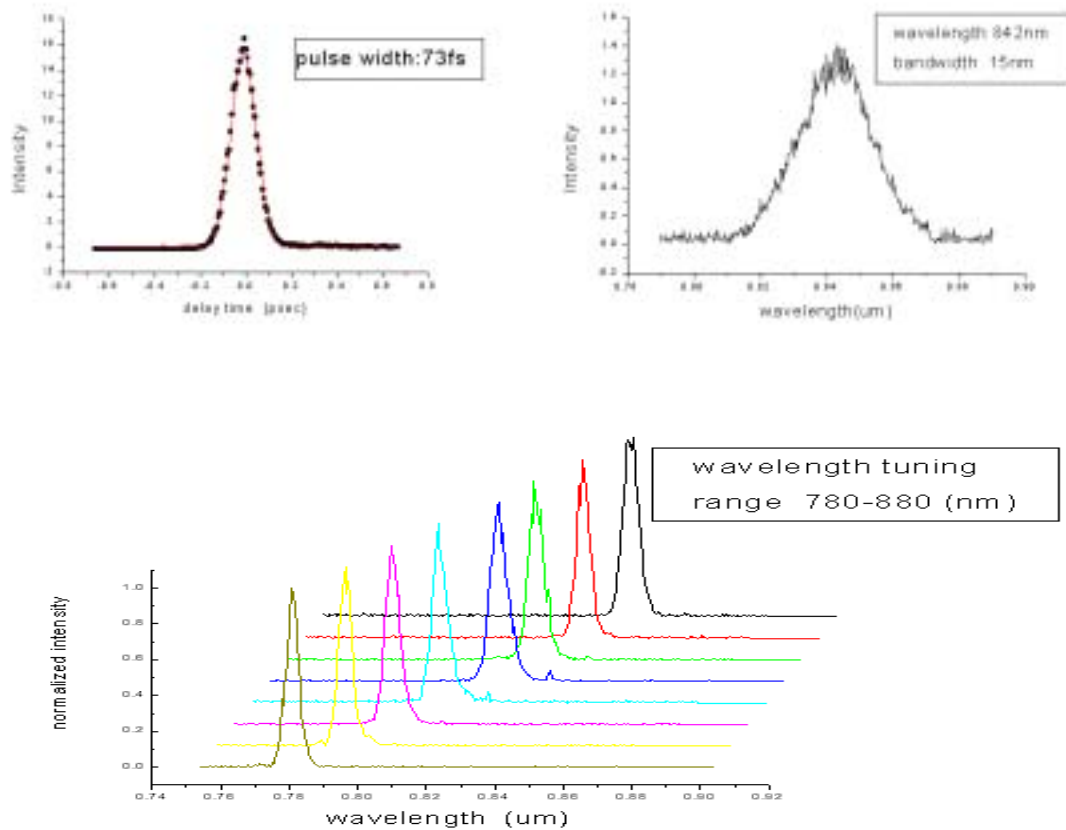


圖 16-2

三 . 研究成果 :

自 7/1/2000 迄今發表於國際性學術期刊之論文計 2 篇，審稿或投稿中之期刊論文 74 篇，國際會議論文計 13 篇，其中 1 篇為邀請演講。國內會議發表論文計 2 篇。黃銘杰在國科會 (Project report 1) 獲大專學生研究創作獎。邢潑心等在中華民國光學工程學會 (碩士論文 1) 獲最佳學生論文獎 - 碩士組。上述期刊與會議論文列表如下：

Part A. Refereed Journal Papers:

1. Zhenlin Liu, Shingo Ono, Hideyuki Ohtake, Nobuhiko Sarukura, Tze-An Liu, Kai-Fung Huang and Ci-Ling Pan, "Efficient terahertz radiation generation from a bulk InAs mirror as an intracavity terahertz radiation emitter," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 39, pt. 2, No. 4B, pp. L366-L367, Apr 15 2000.
2. Gong-Ru Lin and Ci-Ling Pan, "Characterization of Optically-Excited Terahertz Radiation from Arsenic-ion-implanted GaAs," *Appl. Phys. B*, Vol. 72, No. 2, pp. 151 - 155, February 2001.
3. Gong-Ru Lin, Tze-An Liu, and Ci-Ling Pan, "Correlation between Defect Concentration and Carrier Lifetime of GaAs Grown by Molecular Beam Epitaxy

- at Different Temperatures,” submitted to Jpn. J. Appl. Phys., under revision, Sept. 2000.
4. Tze-An Liu, Kai-Feng Huang, Ci-Ling Pan, Shingo Ono², Hideyuki Ohtake², And Nobuhiko Sarukura, “Generation of THz-radiation from resonant absorption in Strained Multiple-Quantum-Well in a magnetic field,” accepted to publication on Jpn. J. Appl. Phys., july., 2001.
 5. Jia-Min Shieh, Shang-Cheng Liu, and Ci-Ling Pan, “Theoretical and experimental studies of the pulse forming dynamics of cw passively mode-locked Ti:sapphire lasers with intracavity saturable absorbers - Part I: Experimental Studies, submitted to *IEEE J. Quantum Electron.*..
 6. Jia-Min Shieh, Shang-Cheng Liu, and Ci-Ling Pan, “Theoretical and experimental studies of the pulse forming dynamics of cw passively mode-locked Ti:sapphire lasers with intracavity saturable absorbers - Part II: Theoretical Studies, submitted to *IEEE J. Quantum Electron.*..
 7. Jia-Min Shieh, Liang-Iao Chang, S. C. Wang and Ci-Ling Pan, "Simultaneous time-domain detection and suppression of laser timing jitter," submitted to Optics Lett.
 8. Ci-Ling Pan, C. C. Yu, L. Hsu, and S. C. Wang, " Design and operation of a tunable cw triple-wavelength external-cavity diode laser," submitted to Jpn. J. Appl. Phys.
 9. C. -K. Lee, F. J. Kao, S. C. Wang, and Ci-Ling Pan, "Confocal Micro-Spectroscopic Observation of Second Harmonic Emission and Three-Photon-Excited Photoluminescence from Gallium Nitride,; submitted for publication, Opt. Lett., April 2001.

Part B. International Conference Papers (7/1/200 - present:

1. Ci-Ling Pan (潘犀靈), “Tunable Dual-Wavelength Semiconductor Lasers: Applications to CW THz Generation,” **invited lecture**, presented at the NCTS Topical Schools: Theory & Advance Measurement on Novel Semiconductor System (part II), July 17-18, 2000, National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan.
2. Ci-Ling Pan, Tze-An Liu, Gong-Ru Lin, and Masahiko Tani, “Multi-energy arsenic-ion-implanted GaAs photoconductors for ultrafast switching and THz Generation,” in 2000 IEEE/LEOS Annual Meeting Conference Proceedings, 13-16, November 2000, The Westin Rio Mar Beach, Puerto Rico, paper TuE 4, pp. 179-180.
3. Tze-An Liu, Masahiko. Tani, Gong–Ru Lin and Ci-Ling Pan, “THz Emission Characteristics of Photoconductive Antennas with Different Gap Size Fabricated on Arsenic-Ion-Implanted GaAs”, National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan, ROC, paper W-S2-A001, 2nd International Photonics Conference, Dec 11-15,2000 (*IPC2000*)
4. Zhenlin Liu, Yuji Suzuki, Shingo Ono, Hideyuki Ohtake, Nobuhiko Sarukura, Tze-An Liu, Kai-Fung Huang and Ci-Ling Pan, “Efficient THz radiation generation from a bulk InAs mirror as an intracavity emitter”, W-S2-A003, International Photonics Conference, Dec 11-15,2000 (*IPC2000*)
5. Gong–Ru Lin, Y. –C. Chang, Tze-An Liu and Ci-Ling Pan, “A Novel Delay-Time-Tunable Passively mode-locked Ti:Sapphire Laser”, Th-S2-E005,

International Photonics Conference, Dec 11-15,2000 (*IPC2000*)

6. Tze-An LIU, K. F. HUANG, Shingo ONO, Hideyuki OHTAKE, and Nobuhiko SARUKURA, Ci-Ling PAN “Generation of THz-radiation from exciton in strained-multiple-quantum-wells under the magnetic field” CTuA, Conference on lasers and Electro-Optics, *CLEO’2001*, May 6-11, 2001
7. Y. S. Hsing, J. M. Hsieh, and Ci-Ling Pan, “Time-gated FROG: A new technique for studying the buildup of optical pulse field in mode-locked ultrafast lasers,” The 12th International Conference on Ultrafast Phenomena, July 9 –13, 2000, Charleston, South Carolina, paper MF38, pp. 203 – 205.
8. Ci-Ling Pan, Ru-Pin Pan, Wen-Li Lu, and Chia-Reng Sheu, "Electronically Tunable Multiple Wavelength Semiconductor Laser by Using a Liquid Crystal Pixel Mirror" presented at the 18th International Liquid Crystal Conference., Sendai International Center, Sendai, Japan, July 24 – 28, 2000, paper 25D-24-P, p/ 297.
9. Chao-Kuei Lee, Fu-Jen Kao, S. C. Wang, Ci-Ling Pan, “ Observation of second harmonic emission and three-photon fluorescence from Gallium-Nitride”, Proceedings of International Workshop On Nitride, Nagoya, Japan, Sept. 25 – 27, 2000, p.336.
10. Chao-Kuei Lee, Fu-Jen Kao, S. C. Wang, Ci-Ling Pan, “ Concurrent generation of high-order optical nonlinear optical emission from GaN film” , Conference Digest of OSA Annual Meeting and Exhibit 2000 and ILS-XVI: 16th Interdisciplinary Laser Science Conference, Providence, Rhode Island, Oct. 22-26, 2000, p.113.
11. Ru-Pin Pan, Wen-Li Lu, Chia-Rong Sheu, and Ci-Ling Pan, “Electronically Tunable Single- and Multiple- Wavelength Broad-Area Semiconductor Laser,” in 2000 IEEE/LEOS Annual Meeting Conference Proceedings, 13-16, November 2000, The Westin Rio Mar Beach, Puerto Rico, paper ThP 6, pp. 830-831.
12. Chao-Kuei Lee, Fu-Jen Kao, S. C. Wang, and Ci-Ling Pan, “Nonlinear optical property of Gallium-Nitride film,” *ibid.*, paper Th-S3-E004.
13. Gong-Ru Lin, Jui-Lin Chang, Wei-Kuo Chen, and Ci-Ling Pan, “Transmission line measurements of nearly semi-insulating GaN diode with Au contacts,” *ibid.*, paper Th-S1-P001.

Part B. Local Conferences:

1. Hsiu-Chi Tung (董修琦), Ming-Chieh Huang (黃銘杰), Wen-Li Lu (呂文禮), Ru-Pin Pan (趙如蘋), C. L. Pan (潘犀靈), “Progress in Tunable External-Cavity Semiconductor Laser Using Liquid Crystal Pixel Mirror,” 2000 國際華人液晶研討會, 18-19 December 2000, 台南成功大學, p. 102.
2. Tze-An LIU (劉子安), K. F. HUANG (黃凱風), Shingo ONO, Hideyuki OHTAKE, and Nobuhiko SARUKURA, Ci-Ling PAN (潘犀靈), “Generation of THz-radiation from resonant absorption in Strained Multiple-Quantum-Well in a magnetic field” Poster paper, PE31, Feb 12~Feb 14, 2001. **2001 年中華民國物理學會年會**

Part C 碩士論文

1. 邢灤心 , "Time-gated FROG: A new technique for studying the buildup of optical pulse field in ultrafast mode-locked Ti: sapphire laser 時間閘 - FROG : 研究鎖模超快雷射光脈衝場起動之新技術," M. S. Thesis, National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan, June 2000.

Part D Project report

1. Ming Ja Huang (黃銘杰) , "Novel electronically wavelength-tunable external-cavity laser diode, 新型電控波長可調外腔式半導體雷射", Project report, National Science Council Undergraduate Research Project, 2000.