

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 光電式同調連續波 THz 輻射束及其應用之研究(3/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2215-E-009-008-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：國立交通大學光電工程學系(所)

計畫主持人：潘犀靈

報告類型：完整報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 10 月 31 日

## 一．前言：

有鑒於高效率,寬頻可調之連續波 THz 輻射器已成為下一世代 THz 感測,通訊,顯像等應用不可或缺的前瞻組件,最近連續波的 THz 半導體雷射已被報導,但仍需工作在液態氮的溫度[1],用光導產生 CW THz 已有一些報導[2~3],其機制為雙波長激發光導天線,藉由雙波長的拍頻調變光電流,產生拍頻的 CW THz 輻射,我們將建立一個緊緻(~幾公分見方大小)室溫狀態下同調 THz 輻射源與偵測器,預期輸出輻射功率達 1mW 等級,可調頻寬達 10THz. 輻射之同調長度與線寬成反比. 然而並沒有人提到如何來最佳化同調長度,因此,我們藉由改變光導天線的材料參數(例如載子生命期等)分析模擬產生 CW THz 的大小與同調長度.

## 二．工作進度:

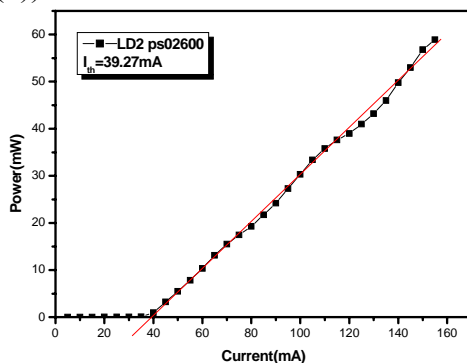
在第一年計劃中,我們已初步完成雙波長雷射系統之架設,THz 輻射源的部分也幾乎完成而正在測試輻射特性, THz 輻射偵測器(bolometer)與干涉儀也正在架設與測試中. 在第二年計劃中,我們已完成了利用雙波長半導體雷射(工作在 780nm 附近),在光導天線上拍頻產生自由空間輻射的 CW THz 輻射,並且由自組的 Martin-Puplett 干涉儀,量得同調長度約 100cm,對應到 CW THz 輻射線寬約 250MHz,與雙波長的拍頻擾動量吻合. 第三年我們則利用橫模較佳的 830nm 雙波長半導體雷射機發光導天線,並藉由改變光導天線的材料參數(例如載子生命期等)分析模擬產生 CW THz 的大小與同調長度.

## 第一年

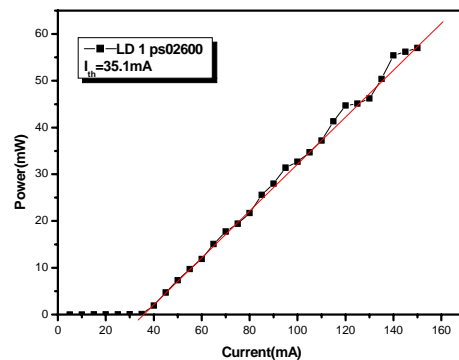
### 1. 雙波長雷射系統

我們將採用光激發的方式產生 THz 輻射. 為了產生連續波窄頻( $<1\text{GHz}$ )可調( $0\sim$ 幾個 THz)之 THz 輻射源,我們需要建立一個緊緻且連續波雙波長可調的雷射系統來激發. 並以光混頻的機制來產生 THz 輻射. 而此雙波長雷射亦需有夠高的功率,頻率穩定,高同調性(窄頻寬),寬的波長調整範圍等特性

因此我們找了兩顆 DBR 雷射,波長約在 785nm,最高功率為 50mW(圖一(a),(b)).

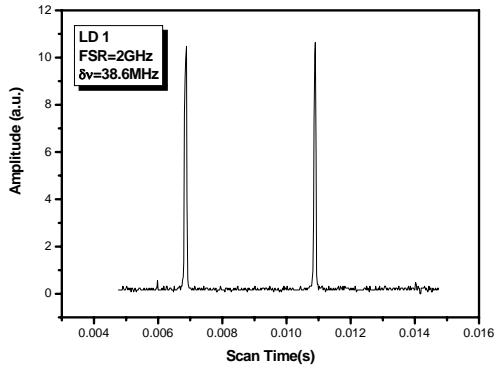


圖一(a). LD 1 的 L-I curve

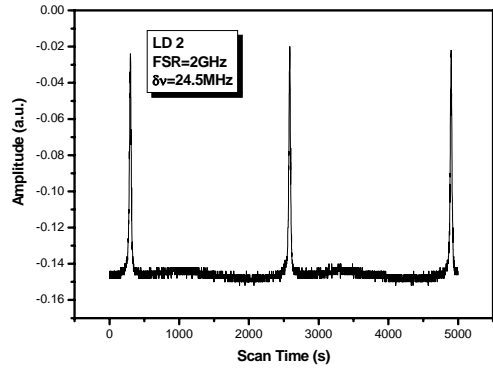


圖一(b).LD 2 的 L-I curve

此兩顆雷射的線寬從 Fabry-Perot 的量測,可知約為 38.6MHz 及 26.5MHz(圖二(a),(b)). 而兩顆雷射間的頻率相對漂移量約為  $\pm 50\text{MHz}$ . 而經過穩頻後,可達約  $\pm 10\text{MHz}$ .

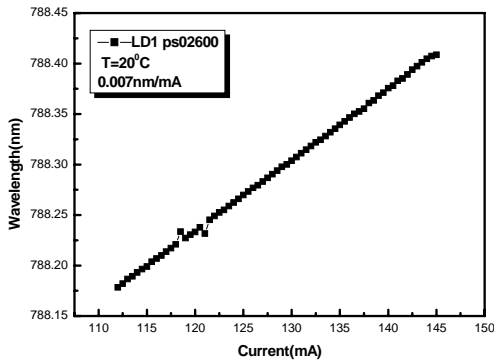


圖二(a).LD 1 的 F-P 量測

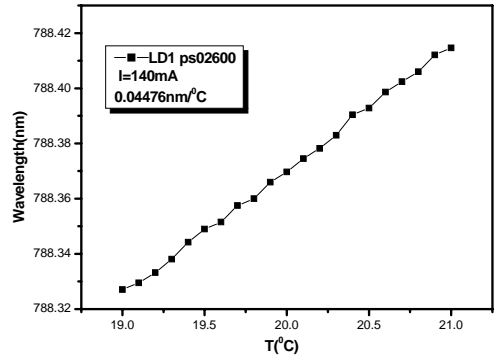


圖二(b). LD 2 的 F-P 量測

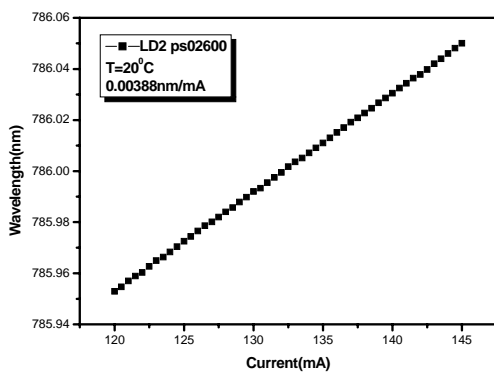
利用控制雷射的操作溫度及電流，可以微調兩顆雷射的中心波長(圖三(a),(b),(c),(d))，當電流操作在約 130mA，溫度約在 19°C 時，兩顆雷射的波長差可調範圍約為 0~2nm。



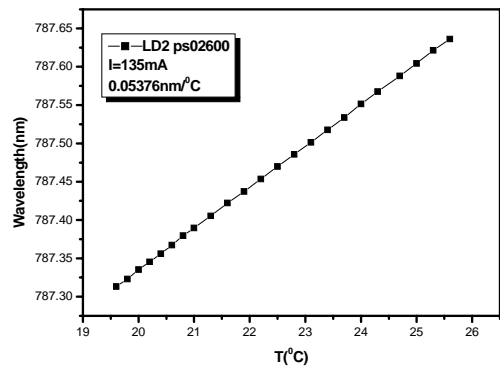
圖三(a).改變電流看波長漂移量



圖三(b).改變溫度看波長漂移量

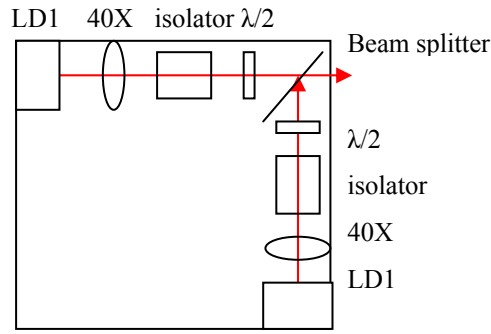


圖三(c).改變電流看波長漂移量



圖三(d).改變溫度看波長漂移量

兩顆雷射的架法如圖四所示，將兩顆雷射由 40X 的物鏡聚焦後，再經過光束阻隔器防止反射，及用半波片使得光打到分光片時偏振方向一樣。



圖四.雷射光源的架設裝置圖

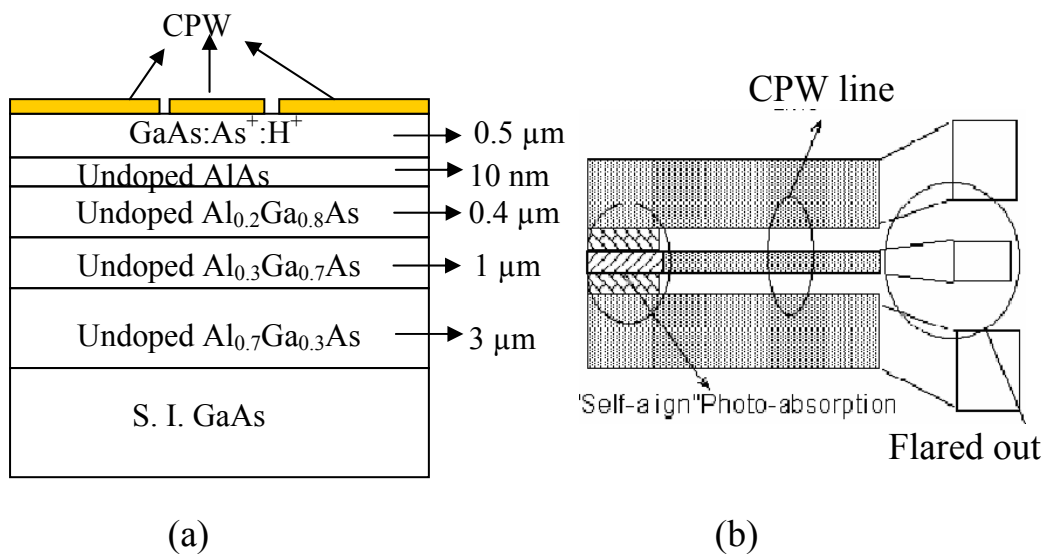
因此我們已建立雙波長雷射系統並檢查產生頻率可調 THz 輻射產生與量測系統。實驗所用的雷射功率約 50mW，頻寬約 20~30MHz，以調整溫度或電流的方法,預期可調的雙波長差約 0~2nm 相當於 0~1THz. 此種架構已可初步拿來產生 CW THz 輻射.

## 2. THz Photomixer 的研製

在 THz 輻射產生器方面，我們將如上的雙波長雷射打入光導元件(THz photomixer)，產生混頻之 THz 頻率電流，並藉天線結構輻射到自由空間。我們將研究兩種 THz 輻射器：一種是著重在 THz 頻寬的光偵測器上(type I)，一種是著重在輻射架構上(type I).

### 2a. Type I THz photomixer:

我們將製作半導體-金屬-半導體 行進波光偵測器(MSM TWPD) 與 slot antenna 結合的微米 THz 輻射產生元件，因 MSM TWPD 之吸收深度深(因為是側向激發)有偵測效率高,頻寬寬等優點, MSM TWPD 的結構如圖五所示:

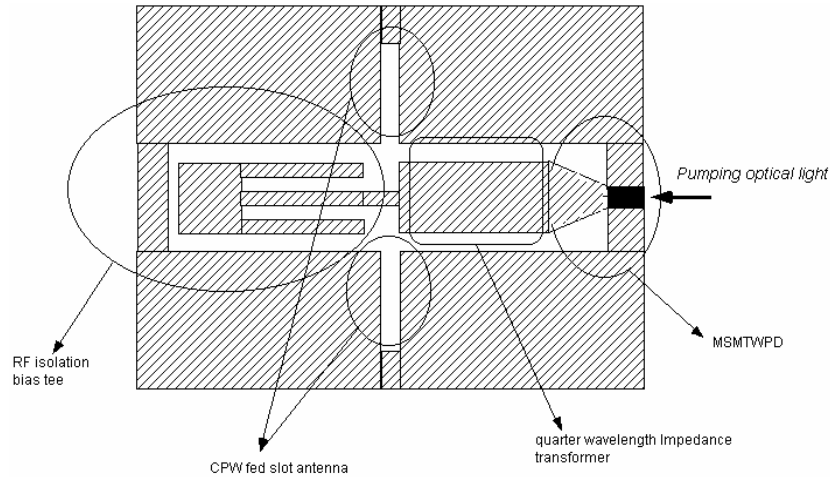


圖五 MSM TWPD 之(a)側視與(b)俯視圖

其中(a) 部份已幾乎完成,剩下最上層的神離子加質子之離子佈值與退火製程,

因質子質量較輕,可打入較深的區域,增加超短生命期載子的深度,改善只有用砷離子佈值做 TWPD 層度較薄的問題. 接著即可送到台大做元件,然後再與 slot antenna 結合做成 THz 輻射源

而台大亦做同上的元件結構,但最上層 0.5um 改為 LT- GaAs. 已完成 MSM TWPD 結構,並與 slot antenna 結合,成為一個 THz emitter,結構如圖六所示

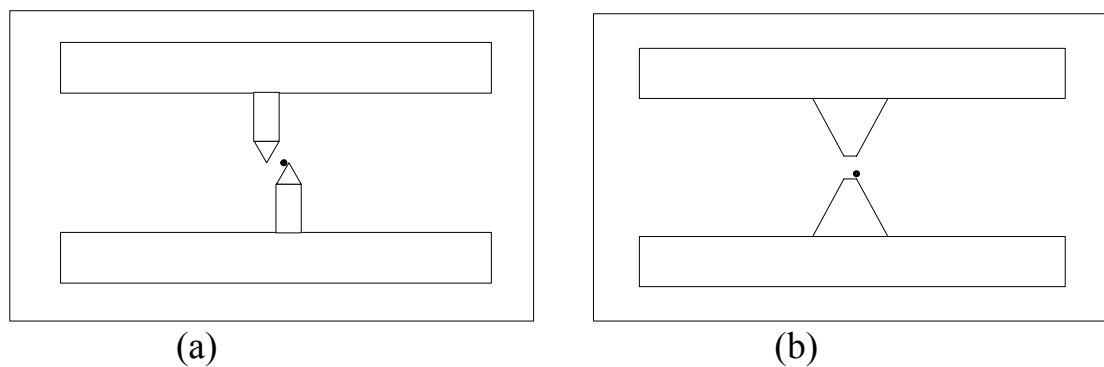


圖六 結合 MSM TWPD 與 slot antenna 之高效率 THz 輻射源

接下來就要用我們的雙波長雷射激發此元件,觀察產生 THz 輻射之特性,並可用光纖通訊波段(~1550nm)為激發光源,將來將通訊光源與 MSM-TWPD 用半導體製成做在一起,形成一個更緊緻的 CW THz 輻射源系統

## 2b. Type II THz photomixer:

第二種光混頻器為一般的 THz 光導輻射器. 我們將製作超高頻寬,高輻射增益的 dipole antenna, sharp and laterally offset electrode antenna 與 bow tie antenna, 結構如圖七所示:



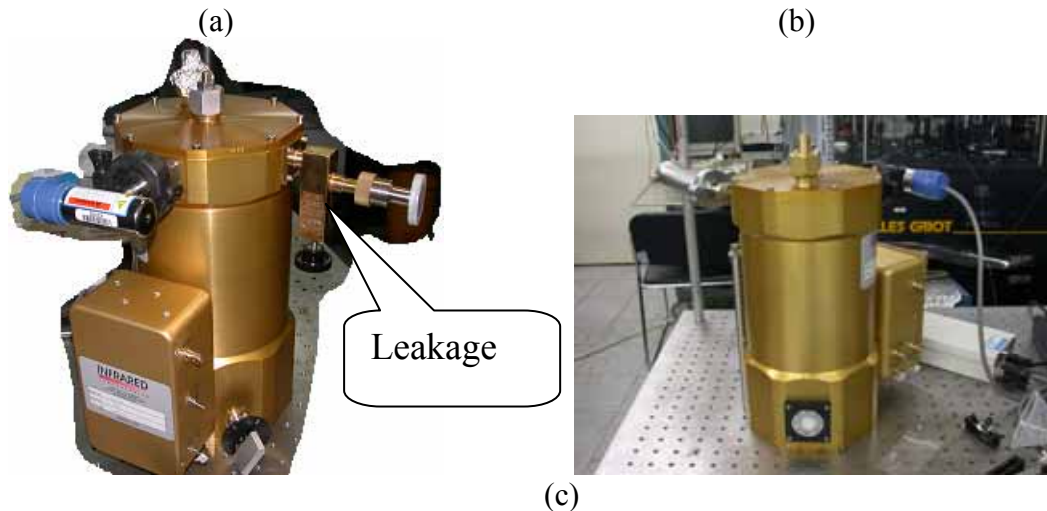
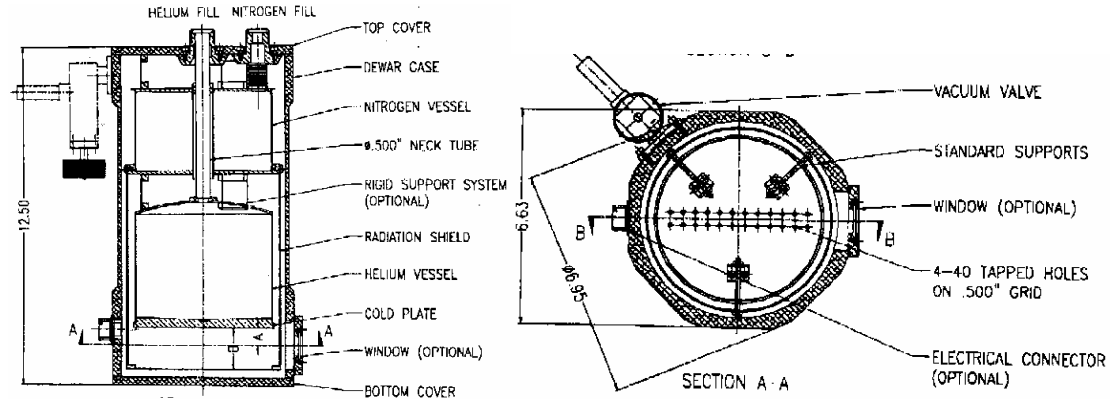
圖七 (a) sharp and laterally offset electrode dipole 與 (b) bow tie 之天線結構

我們設計以上的天線結構, gap~5um, 天線長度 30um, 雙波長雷射光強聚焦(用 40 倍物鏡)在正極附近使其效率提高. 基板材料仍為砷離子加質子之離子佈值砷化鎵. 如今材料已完成,剩下做元件部分. 如果完成將可產生高功率的 THz 輻射

## 3. Device Characterization and Diagnostics

### 3a Bolometer

在偵測元件特性方面，我們為了量測元件光激發後產生的 THz 輻射功率，已購買一個熱偵測器(Composite Si Bolometer),示意圖如圖八



圖八 Composite Si Bolometer 示意圖(a) 側視圖,(b)俯視圖, (c)實體照片

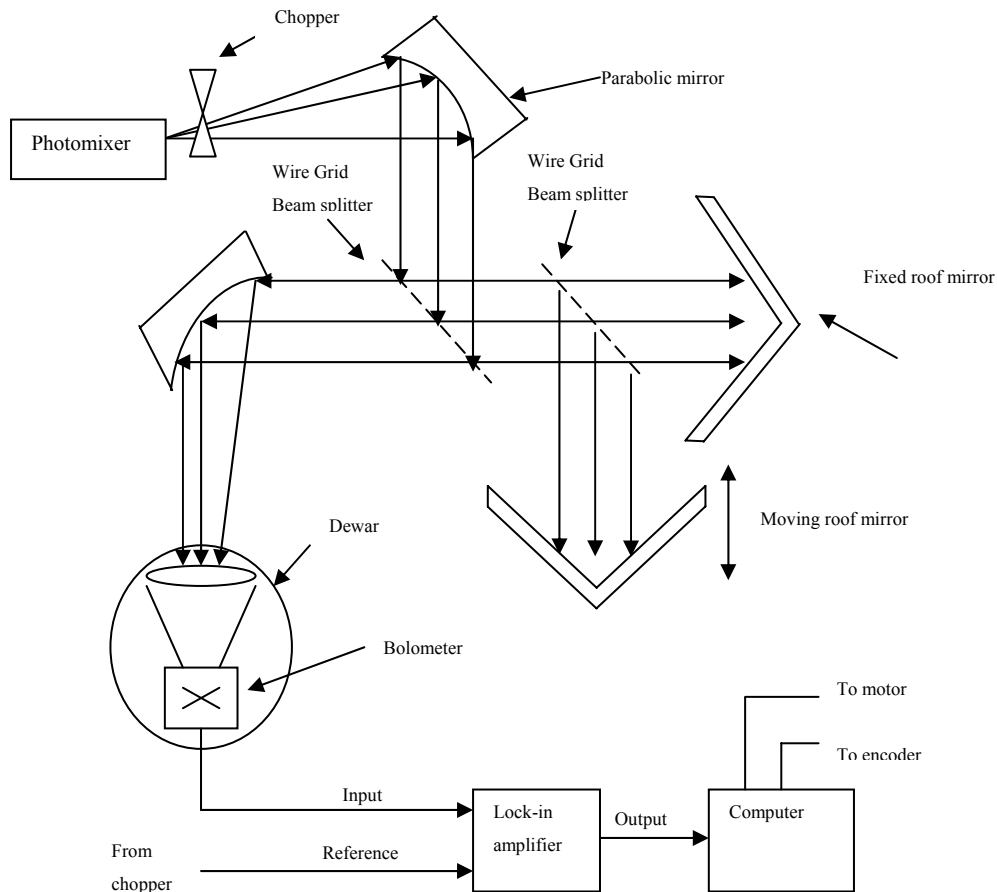
實體照片(右)中下面白色孔為偵測器之 Teflon window.

此偵測器規格為： 頻率響應： $2\mu\text{m}\sim 5000\mu\text{m}$  ( $\Leftrightarrow 0.06\text{THz}\sim 150\text{THz}$ ), 需工作溫度： $0.3\text{K}\sim 4.2\text{K}$ . 增益(gain):  $1.6\times 10^{-5}\text{ W/K}$ , 組抗: $10\text{M ohm}$ , 靈敏度: $S=2.5\times 10^5\text{ V/W}$ , 雜訊功率(NEP)= $1.23\times 10^{-13}\text{ W/Hz}^{1/2}$ ,

目前經測試結果發現在抽真空時有漏氣的現象，已測漏儀檢測發現上圖(c)箭頭所指處有漏氣，因此叫廠商換一個，現在貨已到，正在測試中。如果完成真空測試後，進一步灌液氮與液氮冷卻偵測器溫度到  $4.2\text{K}$ ,即可測量 THz 輻射之功率

### 3b. FTIR

為了量測高同調性的 THz 輻射波形以及實現材料的全譜量測，我們將架設一個以 Martin-Puplett 偏振式干涉儀為基本架構的傅立葉轉換遠紅外光譜儀(FTIR), 系統如圖九所示：



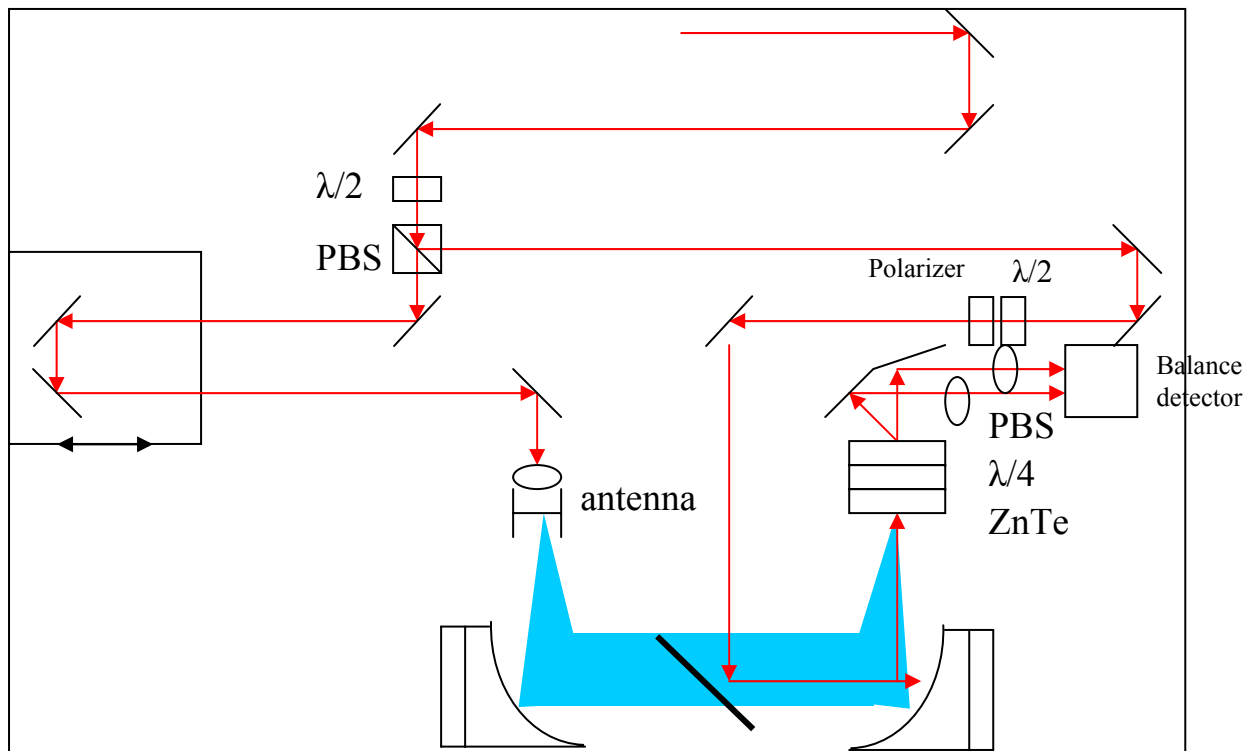
圖九 傅立葉轉換遠紅外光譜儀(FTIR) THz 輻射干涉儀系統 (Martin Puplett 架構)

其規格為：頻寬由 wire grid beam splitter 線距 12.5um 限制, =>60GHz~18THz. 解析度由移動平台總長決定: 30cm=>500MHz, (而移動平台一步距 5um=>可達 30THz 之頻寬)

目前大致上的組件都已具備, 正在架設當中. 完成後將可直接量測 THz 的頻譜及一些在 THz 波段材料的分子光譜(因 THz 頻寬夠窄)

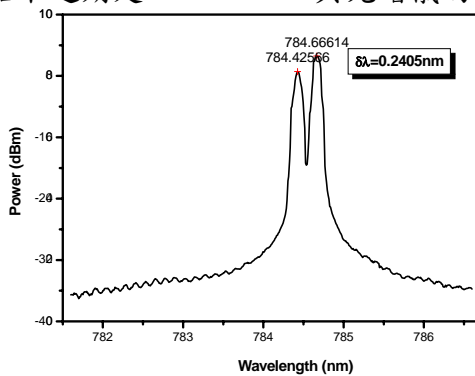
#### 4. CW THz 量測與應用

我們實驗室本已有一套同調整光量測系統來偵測寬頻 THz 輻射, 我們將先用此系統來量測雙波長混頻後的 THz 輻射訊號. THz 產生量測系統的架構如圖十所示, 將雷射光經過 PBS 後分成兩束, 激發光束通過一個 delay stage 後, 打到天線上, 天線所發出的 THz 經過聚焦後打到 ZnTe 晶體上, 再用另一束 probe beam 探測, 之後再分成兩束由 balance detector 接收, 再接到 lock-in amplifier 讀取數據。

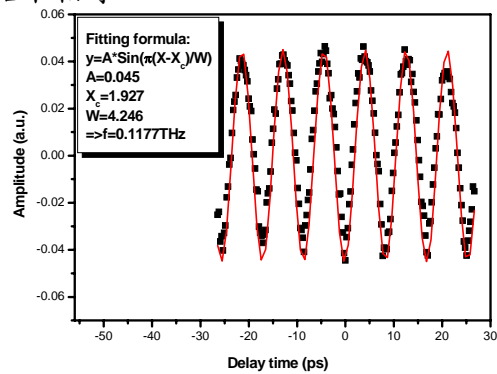


圖十. THz 產生量測 系統的架構圖

首先讓光源打進 THz 產生量測系統，並把天線拿掉，直接讓兩束光束打到 balance detector，量測這兩顆雷射的相干長度，圖十一(a)是這兩顆雷射的光譜圖，波長差 0.24nm(相當於 0.117THz)，圖十一(b)是所量到的干涉圖形，fit 出來的結果週期是 0.117THz，與光譜儀的計算結果相等。



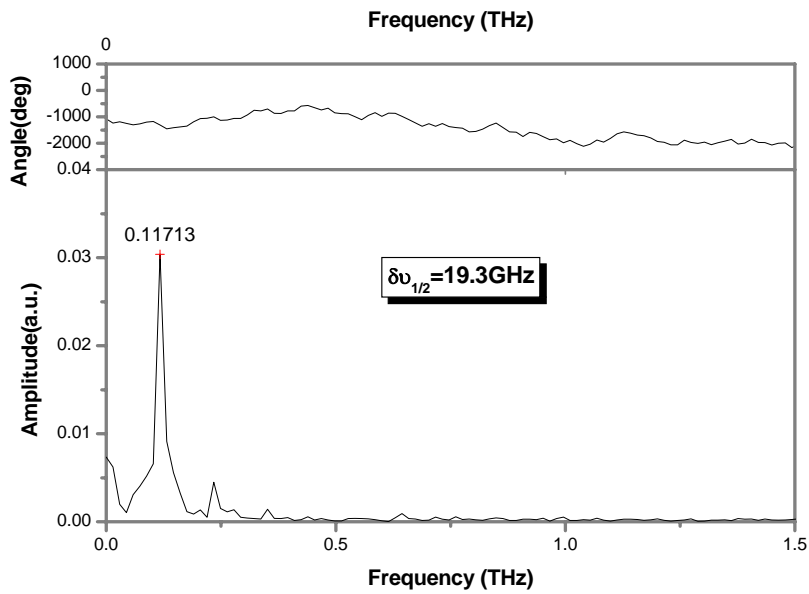
圖十一(a).兩顆雷射的光譜圖



圖十一(b).量測到的干涉條紋

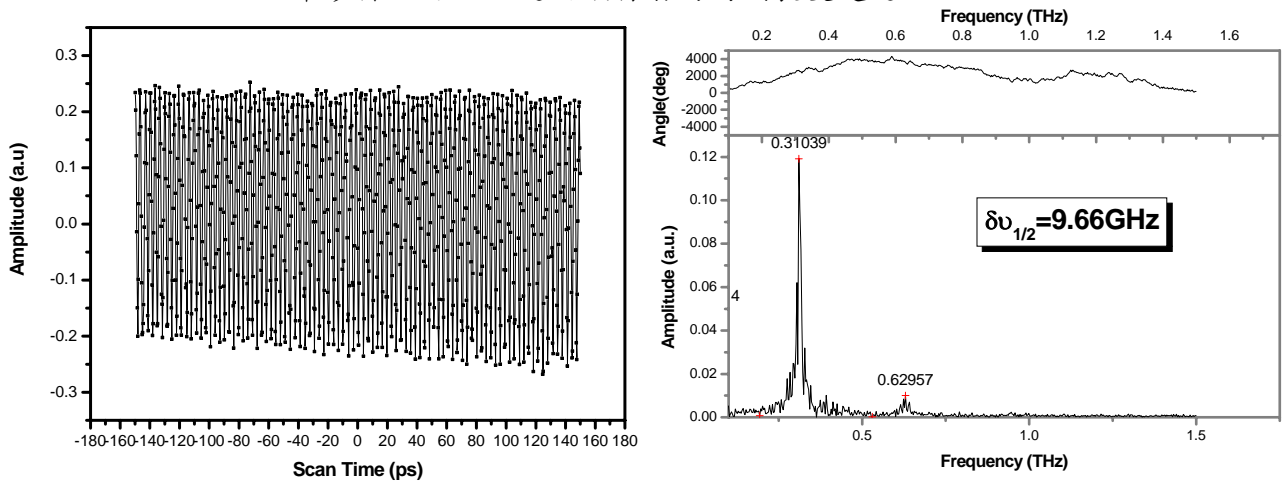
若將干涉條紋經過富利葉轉換後，可以看到所對應的頻譜，從圖十一(c)中可以看到其頻寬約 19.3GHz，會這麼寬是因為所取的干涉條紋太短，所以解析度不夠(約 16GHz)。





圖十一(c) 將干涉條紋做 FFT 之後的結果

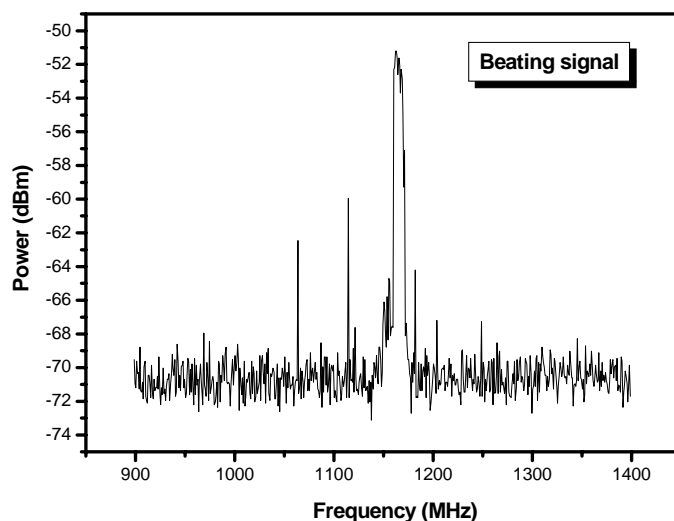
因為目前設備能推的最大長度只有約 50mm(解析度 6GHz)，所以在這範圍內，所看到的干涉條紋如圖十二所示，其富利葉轉換後所看到的頻寬為 9.66GHz，由干涉條紋可知，這兩顆雷射的同調長度超過 50mm。



圖十二(a).兩顆雷射的干涉條紋

圖十二(b).將干涉條紋 FFT 的結果

將兩雷射光波長差調到很接近後，打到天線，觀察天線上所產生光混頻的電訊號，實驗所用的天線是砷離子佈值砷化鎵光導 dipole antenna，gap 是 5 $\mu$ m，將其光電流訊號直接接到頻譜分析儀來觀察，其光混頻的訊號如圖十三所示，因為此時雷射系統沒有穩頻的設計，所以光混頻的訊號跳動的很快，但是這些變化對 THz 而言只是千分之一的變化，穩定性還算好。



圖十三.經過天線的 beating 訊號

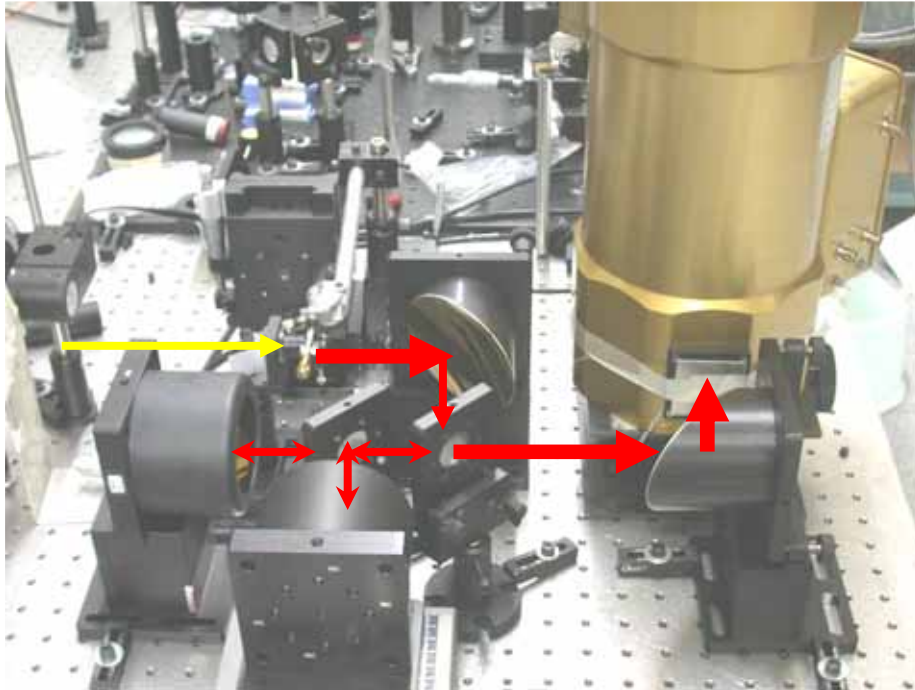
因此我們已成功的利用干涉的方法量測到雙波長之干涉的圖形，可調到約 1THz。在移動 50mm(解析度~6GHz)的範圍內，看到干涉條紋的 modulation depth 沒有下降的趨勢，所以此兩顆雷射的同調長度遠大於 50mm。而由較低頻的光混頻訊號也可藉由量測天線上的光電流得知，訊號約比雜訊(SMSR)高 20dB。我們確定有混頻訊號後,接著即將由量測系統觀察混頻電流經天線所輻射出來的 THz 波形或頻譜。並作為 CW THz 輻射源診斷材料之介電係數與吸收係數在此頻率之特性。

總之我們現階段已初步完成雙波長干涉系統之架設,THz 輻射源的部分也幾乎完成而正在測試輻射特性, THz 偵測器(bolometer)與干涉儀也正在架設與測試中. 進度還算在掌控中.

## 第二年

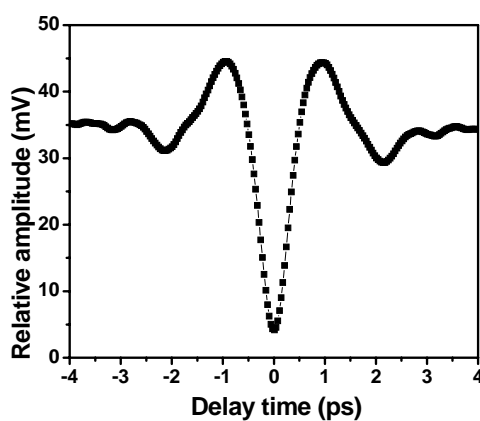
### 1.輻射量測系統

由於 CW THz 輻射功率比脈衝 THz 輻射小了將近 4 個數量及以上,因此我們採用 Martin-Puplett 干涉儀來偵測 CW THz 輻射的波形與強度.

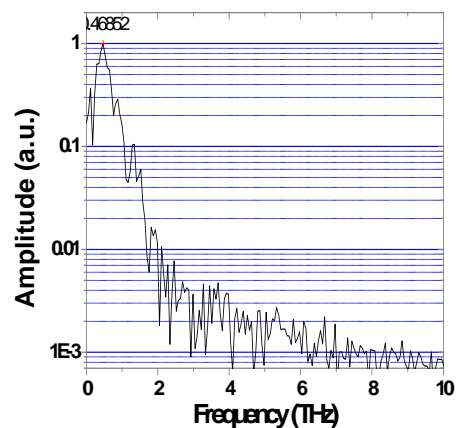


圖一 Martin-Puplett 干涉儀系統實體圖

圖一為架好的 Martin-Puplett 干涉儀系統實體圖。包含了天線,輻射干涉系統與 Bolometer 輻射偵測器。由於 SI GaAs 有比 LT-GaAs 等較好的 mobility, 且較易製備, 而蝴蝶結(bow-tie) 型的天線有較好的輻射效率, 因此我們以 SI-GaAs 製成 Bow-tie 天線,先以 100fs, 50mW 脈衝雷射激發此天線產生脈衝式的寬頻 THz 輻射來測試此系統, 量測之輻射波形與頻譜結果如圖二所示, 中心頻率為 0.43THz, 半高寬約波形相當對稱,其 S/N 可到超過 1000。



圖二 (a) 脈衝式 THz 輻射干涉圖

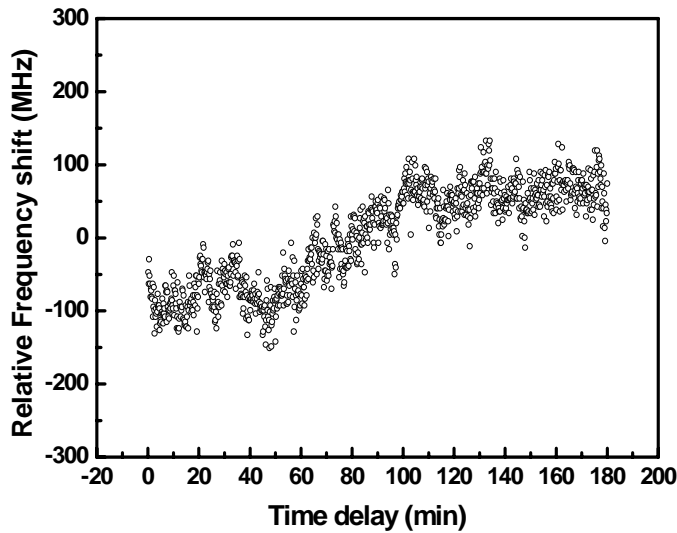


(b) 脈衝式 THz 輻射頻譜圖

## 2. CW THz 輻射量測

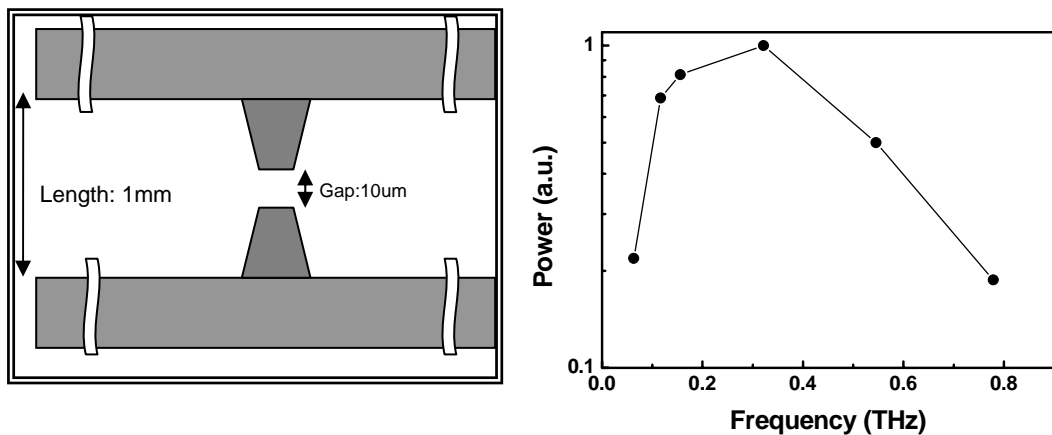
因此利用我們在第一年架好的雙波長雷射來激發天線即可產生 CW THz 輻

射. 將兩顆單獨的 DBR 半導體雷射, 工作波長在 785nm 附近. 將約 20mW 的總功率輸出至天線, 並控制兩者在天線前空間模的吻合與水平偏振, 使兩個不同波長的雷射產生的連續波 THz 效率最高. 由於我們量測連續波的波形, 頻率解析度是一個很重要的參數, 解析度高意味著需要量測較長程的波形, 而長時間的量測便會有長程的頻率飄移, 此相對頻率漂移量更是決定了輸出 CW THz 輻射頻域上的線寬. 我們以 Fabry-Perot 干涉儀量得其在 3 小時內最大頻率飄移量只有約 250MHz, (如圖三所示), 可知解析度最小可以到這個值. 而同調性更 CW THz 輻射的一個重要參數, 其決定了 CW THz 輻射的頻域線寬或純度. 因此需要量測其同調長度, 並須量測其長程的波形.



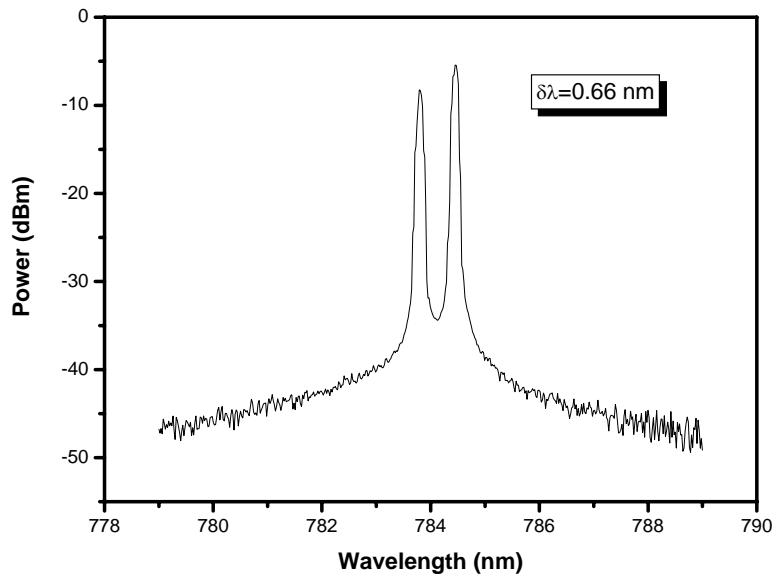
圖三 在 3 小時長時間內量測兩顆半導體雷射相對頻率飄移量

藉由控制兩顆 DBR 半導體雷射的溫度與電流, 最大波長差可調至將近 2nm (即 1THz). 以不同的波長差(即不同的頻率差)激發圖四(a)的天線. 利用不同波長在天線上做差頻, 可產生各種不同強度的 CW THz 輻射, 而得到如圖四(b)的天線頻率響應圖. 可看出此天線頻率響應最高大約在 0.32THz. 其 3dB 頻寬約 400GHz.

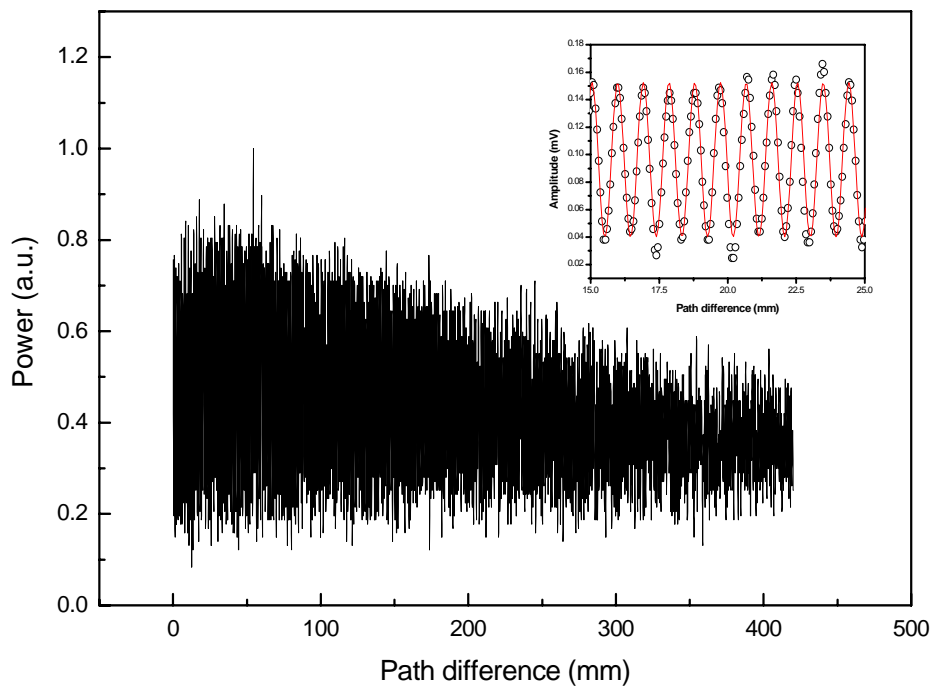


圖四 (a) Bow-tie 天線尺寸示意圖 (b)雙波長雷射在天線所得頻率響應

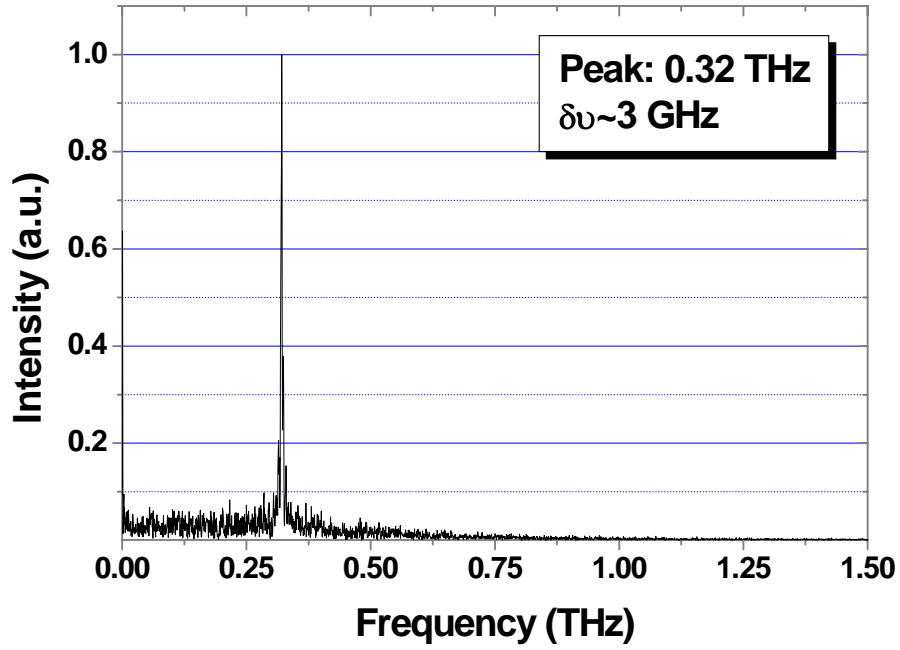
因此我們將兩顆雷射波長差定在約 0.66nm (即 0.32THz), 其輸出光譜如圖五所示. 激發天線之總功率約 20mW. 激發天線產生 CW THz, 並經 Martin-Puplett 干涉儀系統量得 CW THz 輻射波形與頻譜分別如圖六(a)與(b)所示. 量測波形總長約 420mm, 相當於頻率解析度約 0.8GHz.



圖五 兩顆雷射之輸出光譜圖



圖六 (a) CW THz 輻射波形. 附圖為細部的波形, 紅色線為模擬的正旋函數曲線



圖六 (b) CW THz 輻射頻譜

其中,圖六(a)附圖為細部的波形,紅色線為模擬的正旋函數曲線,實驗點為黑色空心圓圈,可看出實驗與理論上的模擬曲線十分吻合. 而將所量得之 CW THz 輻射波形做富氏轉換後的頻譜,其中心頻率為 0.32THz,而頻寬約為 3GHz. 然而此頻寬並非 CW THz 輻射真正的頻寬,因為在長程的掃描下,越後面則訊號較小,導致雜訊變大使得輻射波形越不準. 不過我們可以藉由同調長度來推出真正的頻寬. 由圖六(a)可看出波形大小隨距離的增長而變小,亦即同調性降低. 由干涉理論可知干涉訊號為以下公式:

$$\langle I_d(t, \tau) \rangle_t = 2 \langle I(t) \rangle_t [1 + \text{Re} \gamma(\tau)] \quad (1)$$

$$\text{其中 } \gamma(\tau) \equiv \frac{\text{Re} \int_{-\infty}^{\infty} d\omega I(\omega) e^{-i\omega\tau}}{\int_{-\infty}^{\infty} I(\omega) d\omega}$$

同調時間為:

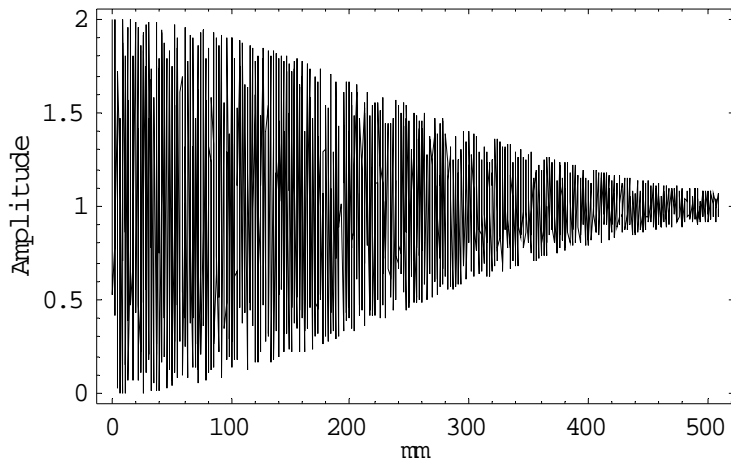
$$\tau_c \equiv \int_{-\infty}^{\infty} |\gamma(\tau)|^2 d\tau = 2 \int_0^{\infty} |\gamma(\tau)|^2 d\tau \quad (2)$$

同調長度為:

$$l_c \equiv c \tau_c \quad (3)$$

我們假設 CW THz 輻射頻譜為:

$$I(\omega) = e^{-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{\delta\omega}} \quad (4)$$



圖七 模擬的 CW THz 干涉圖

模擬出 CW THz 輻射波形如圖七所示,與實驗比較得知我們 CW THz 輻射的同調長度約 100cm, 對應的頻譜線寬約為 250MHz, 與兩個雷射的頻率擾動所造成的頻譜拉寬吻合(~250MHz)

總之, 我們已經成功的利用兩顆獨立的 DBR 半導體雷射架設出一個雙波長雷射系統, 總系統面積只有 50 cm<sup>2</sup>, 搬移方便。它的最大輸出功率約 25 mW, 波長差可調範圍為 2 nm, 而且長時間的相對頻率漂移量小於 300 MHz。我們使用 Martin-Puplett 偏振式干涉儀和輻射熱偵測器, 來量測由做在半絕緣性砷化鎵基板上的蝴蝶結式(Bow-tie)天線產生的連續波(CW)THz 的同調性。此天線的間隙是 10um, 長度是 1mm。量測到的連續波 THz 同調長度約為 100 公分, 線寬相當於 250 MHz, 與雙波長雷射系統所量測到的頻率漂移量相符。若是再對雙波長雷射系統做穩頻的控制, 及配合上 THz Fabry-Perot 系統, 相信所產生的連續波 THz 線寬可以小到數十 MHz 到數百 KHz。此窄頻寬的 THz 輻射可以用在光譜學或是成像上, 可以得到較高的解析度。

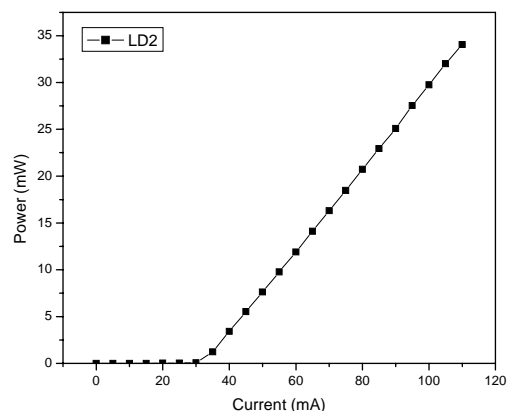
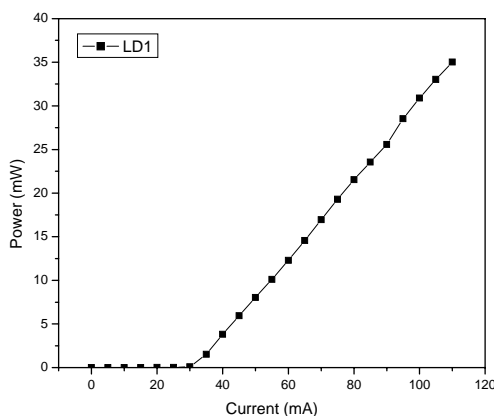
## 第三年

### 1. 輻射量測系統

與第二年相同

### 2. CW THz 輻射量測

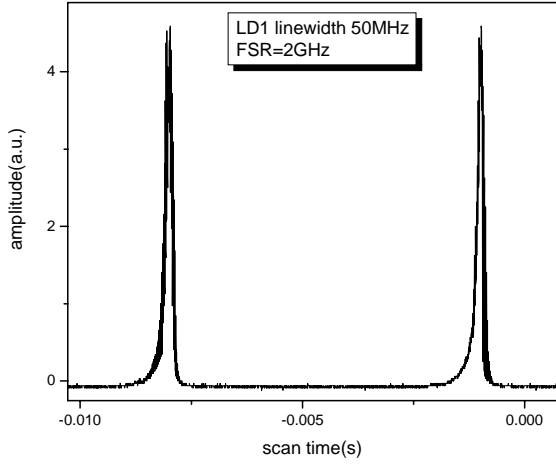
由於 CW THz 是這雙波長雷射打到天線所產生, 故雙波長雷射的模態是否互相符合是非常重要的。因為 PS025-00 830nm 雷射二極體的模態比較圓, 所以我們改用它來當我們產生 CW THz 的光源, 圖一(a) (b)為此 LD1 與 LD2 的 L-I curve



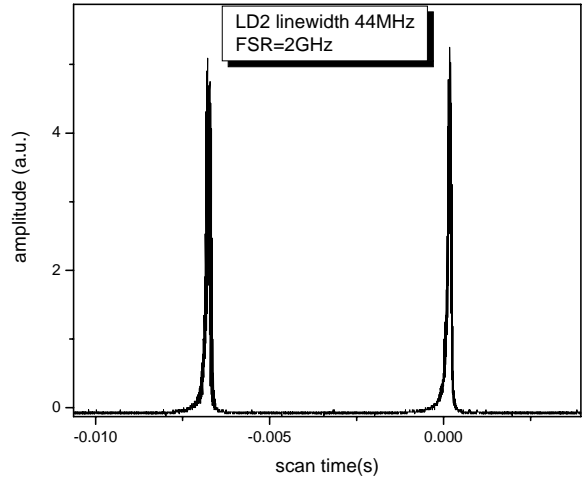
圖一(a)、LD1 的 L-I curve

圖一 (b)、LD2 的 L-I curve

此兩顆雷射的線寬從 Fabry-Perot 的量測，可知約為 50MHz 及 44MHz(圖二(a),(b))。

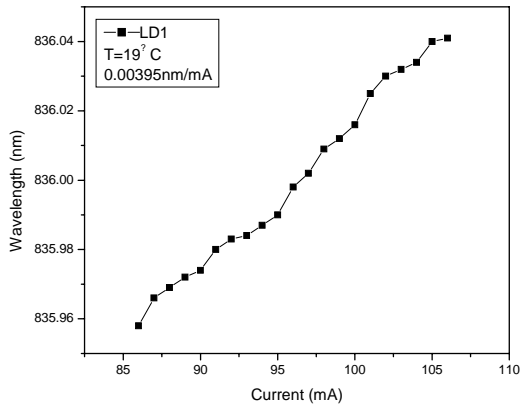


圖二(a)LD 1 的 F-P 量測

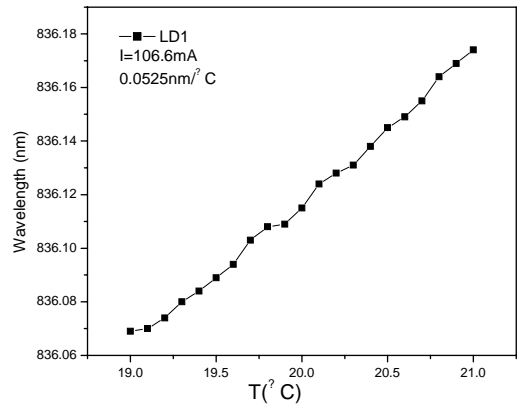


圖二(b)LD 2 的 F-P 量測

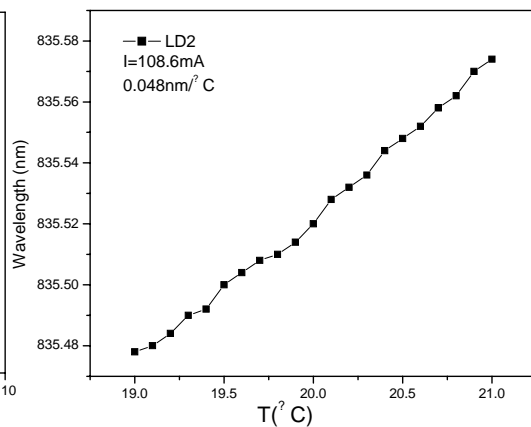
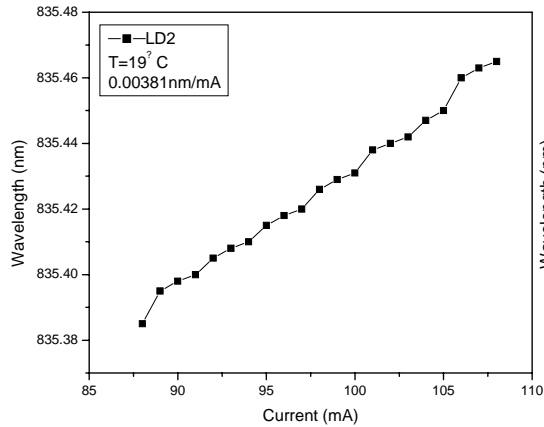
利用控制雷射的操作溫度及電流，可以微調兩顆雷射的中心波長，如圖三(a)，(b)，(c)，(d)。



圖三(a)改變電流波長漂移量



圖三(b)改變溫度波長漂移量

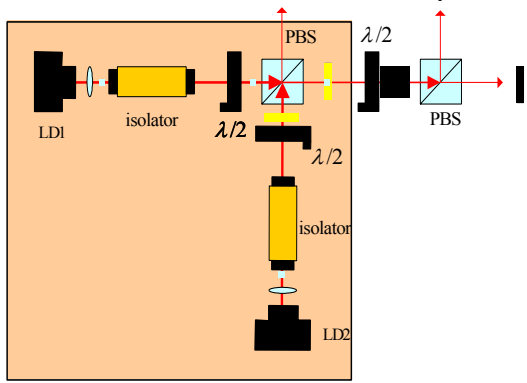




圖三(c)改變電流波長漂移量

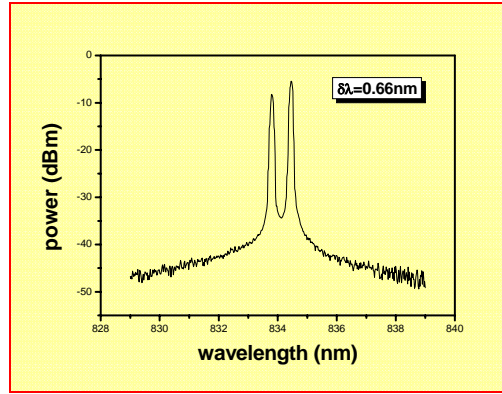
圖三(d)改變溫度波長漂移量

因此我們利用此雙波長架設如圖四(a)所示，雙波長差同樣調在0.66nm,(如圖四(b)所示) 由於中心波長的不同,因此產生出來的拍頻也不同( $\sim 0.26\text{THz}$ ).此雙波長雷射輸出波長約 830nm, 功率約 40mW, 可調範圍約 2nm, 雷射各別線寬約 30MHz. 天線材料為 SI GaAs, 天線結構為 bow-tie (與第二年相同), 產生的輻射經由干涉儀與熱偵測器(如圖五所示)進行量測.



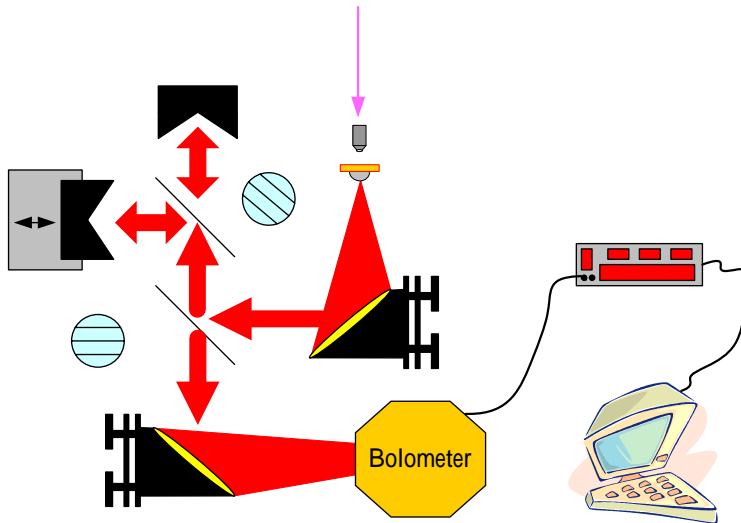
(a)

圖四 (a) 雙波長半導體雷射系統

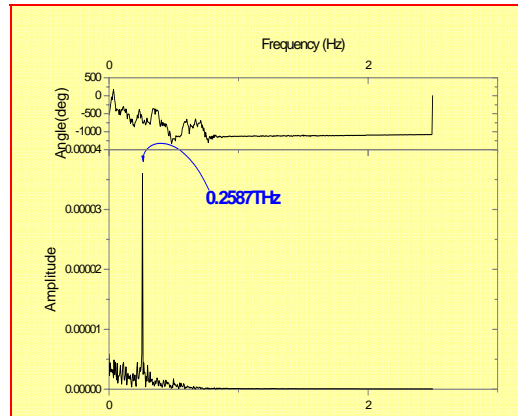
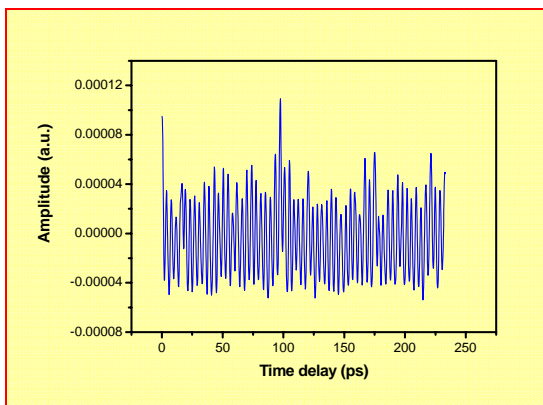


(b)

(b)此雷射之頻譜 (調到波長差約 0.66nm)



圖五 自組之 Martin-Puplett 遠紅外干涉儀



(a) (b)  
圖六 (a) CW THz 輻射波型與其(b)快速富氏轉換頻譜

量測的 CW THz 輻射波型與富氏轉換頻譜如圖六所示，中心頻率約 0.2587THz. 與雙波長的波長差相符。

理論上,我們假設雙波長雷射的功率頻譜為高斯分佈, 並假設此兩顆半導體雷射的線寬都一樣  $\delta \omega$ .  $I_i(\omega) = \exp[-(\omega - \omega_i)^2 / \delta \omega^2] / \delta \omega^2$  那麼, 我們可以由反富氏轉換與時域的拍頻訊號  $I(t)$ (式 1)得到在光導天線上的時域的電場分佈  $E_i(t)$ .

$$I(t) = (E_1(t) + E_2(t))(E_1(t) + E_2(t))^* = e^{i(t(\omega_1 + \omega_2) - t\delta\omega^2)} * (e^{i\omega_1 t} + e^{i\omega_2 t})^2 \quad (1)$$

$I(t)$  的富氏轉換為  $I(\omega)$ . 由光電流遽增效應與歐姆定律 (式 2, 3), THz 輻射正比於天線上光電流的一階微分

$$\vec{E}_{rad}(\vec{r}, t) \cong -\frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{A}{z} \frac{d}{dt} \vec{J}(t) \quad (2)$$

$$J(t) = n(t)q\mu E \quad (3)$$

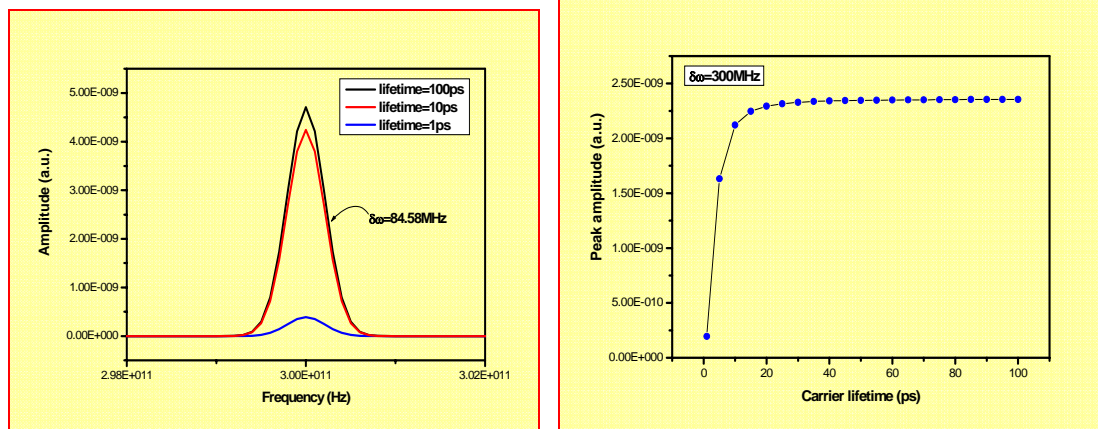
載子動態分佈如式 4 所示

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{I_{beat}(t)(1-R)}{h\nu} - \frac{n(t)}{\tau_c} \quad (4)$$

我們由式 4 的富氏轉換代入頻域  $E(t)$  and  $J(t)$  解出  $N(\omega)$ , 電場的頻域分不可解出如式 5 所示

$$E_{THz}(\omega) \propto \frac{e^{-\frac{\omega^2 + (\omega_1 + \omega_2)^2}{2\delta\omega^2}} (2e^{-\frac{\omega^2 + 2(\omega_1 - \omega_2)^2}{4\delta\omega^2}} + e^{-\frac{(\omega + \omega_1 - \omega_2)^2}{4\delta\omega^2}} + e^{-\frac{(\omega - \omega_1 + \omega_2)^2}{4\delta\omega^2}})}{\sqrt{2}\delta\omega(1 + \frac{1}{\omega^2\tau_c^2})} \quad (5)$$

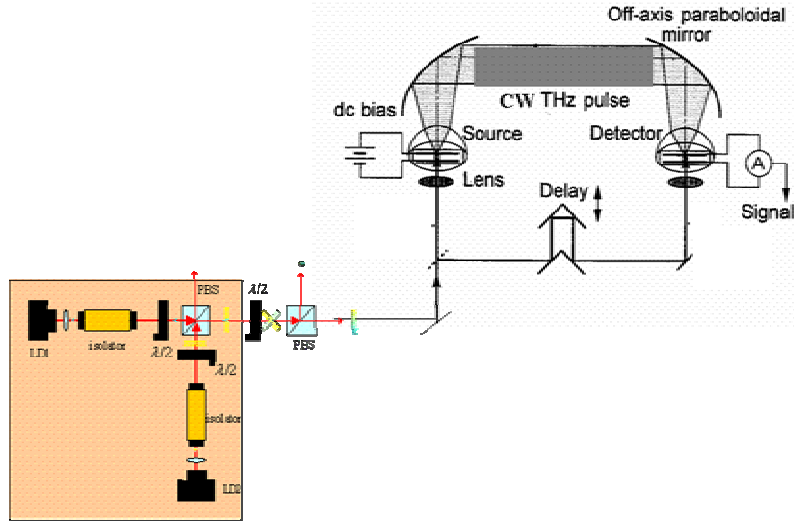
我們畫出對不同材料的載子生命期下的 THz 輻射頻譜如圖七(a)所示. 結果此輻射場的線寬仍然是一樣的, 也就是說無論是何種材料, 輻射的同調長度都一樣. 經計算後, CW THz 的輻射線寬約 84.68MHz, 對應於同調長度約 350cm. 而我們量測到的同調長度約 100cm. 比理論為短的同調長度是由於實驗上雙波長的頻率繞動(250MHz)所造成. 我們以 250MHz 來計算同調長度, 則與我們所預估 100cm 的同調長度相符. 在圖七(a) 我們可以明顯的看到隨著載子生命期的增加而 CW THz 輻射振幅呈現飽和的現象. 這個現象在圖七(b)中更明顯. 在式 5 中 輻射振幅大小的飽和式來自於輻射的中心頻率與光導天線的載子生命期. 當光導天線的載子生命其大於 10 ps 以上, 則連續波兆赫輻射的振幅即達飽和, 它也同時驗證了 LT-GaAs (載子生命期小於 10ps)的輻射行為.



(a) (b)  
圖七 連續波兆赫輻射隨載子生命期之(a)模擬頻譜與(b)模擬尖峰振幅圖

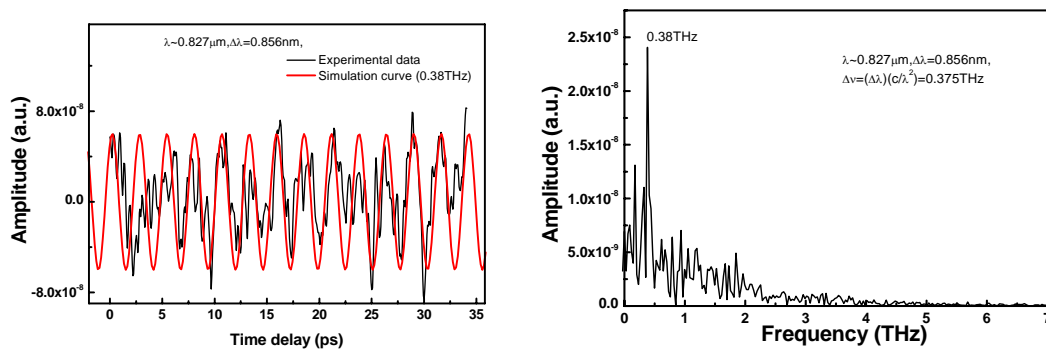
### 3. 高功率 CW THz 輻射量測

我們今年買了兩個高功率的半導體雷射,最高功率約可至 150mW, 波長在 827nm 附近.



圖八 光導取樣連續波兆赫輻射產生與偵測之系統圖

將這兩個雷射放在之前的雙波長雷射系統, 因為這輸出功率較高, 因此我們捨棄較昂貴的 Bolometer 偵測器, 利用實驗室現有之光導天線產生與偵測兆赫時域頻譜量測系統, 觀察產生的 CW THz 輻射, 系統如圖八所示. 將波長差調在約 0.825nm, 經計算得知其頻率約為 0.375THz. 其量測到的波形如圖九(a)所示, 經富氏轉換後看到的頻譜如圖九(b)所示, 與模擬計算雙波長差所得到的頻率 (0.375THz) 幾乎吻合, 可知我們已可由光導系統量得 CW THz 的輻射訊號. 雖然訊號不夠好, 但藉由訊號最佳化, 仍有改善的空間. 因此我們即可以捨棄昂貴的偵測系統而達到便宜與緊緻的連續波兆赫輻射與產生系統.



(a) (b)  
圖九 光導取樣連續波兆赫輻射(a)波形與快速富利葉轉換後的頻譜圖

### 三. 結論

在第一年計劃中, 我們已初步完成雙波長雷射系統之架設, THz 輻射源的部分也幾乎完成而正在測試輻射特性, THz 輻射偵測器 (bolometer) 與干涉儀也正在架設與測試中. 在第二年計劃中, 我們已完成了利用雙波長半導體雷射 (工作在

780nm附近),在光導天線上拍頻產生自由空間輻射的CW THz 輻射,並且由自組的Martin-Puplett 干涉儀,量得同調長度約 100cm,對應到 CW THz 輻射線寬約 250MHz,與雙波長的拍頻擾動量吻合。第三年我們則利用橫模較佳的830nm 雙波長半導體雷射機發光導天線,並藉由改變光導天線的材料參數(例如載子生命期等)分析模擬產生CW THz 的大小與同調長度。從我們模擬的結果可知連續波兆赫輻射的同調長度與光導天線之載子生命期無關,同時驗證了兆赫輻射振幅隨著生命期增加而飽和的趨勢。最後我們也以光導產生與偵測系統量到了由高功率雙波長雷射的拍頻產生出來的窄頻連續波 THz 輻射(頻率~0.38THz)。

#### 四. 參考資料

- [1] Rüdeger Köhler, Alessandro Tredicucci, Fabio Beltram, Harvey E. Beere, Edmund H. Linfield, A. Giles Davies, David A. Ritchie, Rita C. Iotti & Fausto Rossi, "Terahertz semiconductor heterostructure laser," *Nature*, Vol. **417**, pp. 156-159, 2002.
- [2] Ping GU, Masahiko Tani, Masaharu Hyodo, Kiyomi Sakai, and Takehiro Hidaka, "Generation of cw-Terahertz Radiation Using a Two-Longitudinal-Mode Laser Diode," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. **37**, Part2, no. 8B, pp. L976-L978, 1998.
- [3] Masahiko Tani, Shuji Matsuura, Kiyomi Sakai et al, "Multiple-Frequency Generation of Sub-Terahertz Radiation by Multimode LD Excitation of Photoconductive Antenna," *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, Vol. **7**, pp. 282-284, 1997.
- [4] D. H. Martin, and E. Puplett, "Polarised interferometric spectrometry for the millimetre and submillimetre spectrum," *Infrared Physics*, Vol. **10**, pp. 105-109, 1969.
- [5] Masahiko Tani, Shuji Matsuura, Kiyomi Sakai, and Shin-ichi Nakashima, "Emission characteristics of photoconductive antennas based on low-temperature-grown GaAs and semi-insulating GaAs" *Appl Opt*, Vol. **36**, pp. 7853-7859, 1997.