

Diffraction-modified Terahertz Compressed Sensing Imaging System

繞射修正太赫茲壓縮感知相機

組別:A177 組員姓名：李以明 指導教授：楊尚樺

一、Abstract

太赫茲 (Terahertz, THz) 技術近年來廣受關注，尤其因為太赫茲**非破壞性、高穿透性以及能夠分析物質特性**等獨特的物理特性使得太赫茲技術的發展在各個領域都吸引了十足的目光。而太赫茲影像的發展在近二十年來蓬勃發展，許多成像技術都被試著用在太赫茲成像系統上。但受限於昂貴的元件價格，太赫茲成像系統目前無法使用一般相機使用的多像素系統來成像，因此目前大多數的太赫茲成像系統都是以單像素的成像系統來成像。但這也衍生了其他問題，像是被廣為使用的光柵掃描 (Raster Scanning) 成像方法往往需要耗費數個小時來解回一張圖片，無法應用於即時影像。而本實驗室去年開發出了**全台第一台能夠及時成像的太赫茲壓縮感知成像系統 (Terahertz Compressed Sensing Imaging System)**，將需要耗費數小時才能解回的圖片以壓縮感知的取樣方式在數分鐘內就解出。但在既有系統中，紅外光光路中數位微反射鏡片 (Digital Micromirror Device, DMD) 之縫隙形成一光柵結構導致繞射現象的發生，以及太赫茲光波波長和欲解回物體大小太過接近也衍生了繞射現象，導致系統的成像能力倍受影響。因此我基於既有系統的架構，在其中加入光學 4f 系統，藉由分別在既有系統的兩道光路中分別多加入兩個透鏡以硬體的方式來解決在紅外光光路和太赫茲光光路中的繞射問題。最後成功以此系統解回出較以往對比度更高的圖片，完成繞射問題的初步改善。在這一年的專題中，我從既有系統開始學習，包括演算法理論、軟體模擬、儀器控制、硬體實作等方面開始著手，再到實際系統之硬體架設，最後成功將具有更好對比度的圖片解回，完成階段性的改良。

二、Introduction

2.1、既有系統介紹

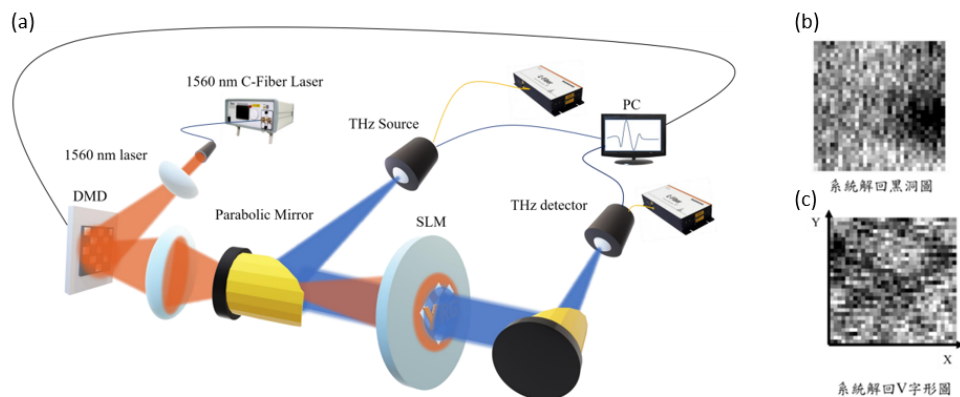


圖 1. (a) 既有系統示意圖。(b) 系統解回之拋物面鏡 (c) 系統解回之 V 字形物體

如圖1所示，在本實驗室已開發的系統中，已完成了太赫茲壓縮感知像機的實作，包括演算法編寫、儀器控制、感知矩陣選擇等等，並已成功的在數分鐘內拍得一張圖，相較於光閘掃描的成像系統數小時的解圖時間，此為一大進展。但在本系統中，在紅外光光路和太赫茲光光路中都有繞射的問題，此繞射問題來自於數位微反射晶片的光閘結構以及太赫茲光波波長與物體十分相近等原因。因此在本專題中，將針對系統中兩道光路進行改良(紅外光光路及太赫茲光光路)，在其中加入光學4f系統，在硬體上以物理的方式解決此問題，並因此解回對比度更佳的圖片。

2.2、原理分析

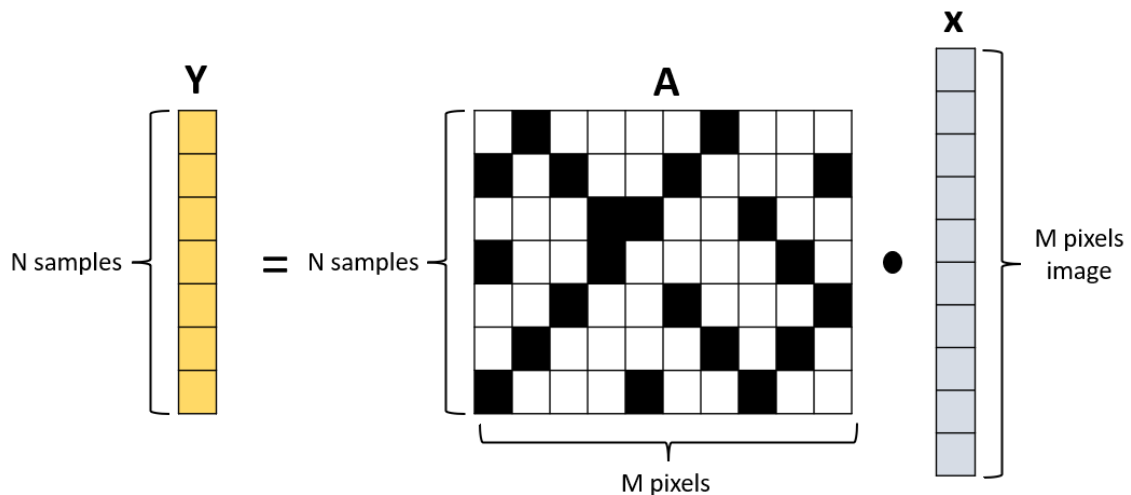


圖 2. 壓縮感知矩陣數學式表達

壓縮感知的原理為利用現實中許多圖像訊號都可藉由轉換表示域的方式將訊號表示成具稀疏性的訊號之事實，利用感知矩陣去對圖片作極少的取樣來完成圖片的重建。壓縮感知問題可以以數學表示，如下：

$$Y = A \cdot x \quad (1)$$

其中 Y 為取樣結果、 A 為感知矩陣， x 為待測圖片。其矩陣表示方法如圖2所示。在壓縮感知的理論中，藉由對 (1) 中的 A 和 x 作出條件限制後，能夠將此問題簡化為一最小值問題，如 (2) 所示：

$$\min \|x\|_1 \text{ subject to } Y = A \cdot x \quad (2)$$

其中 $\|x\|_1$ 代表所有在 x 之中非零元素的絕對值之和。在這樣子的情況下，根據壓縮感知的理論，我們需要讓 x 具有足夠的稀疏性才能夠使得這個壓縮感知的問題有辦法以此方法解回，而本實驗室既有系統中已開發的演算法即以此種方法來解回圖片，本專題沿用此演算法。

2.2、軟體模擬

圖3為系統繞射之模擬圖，根據克希荷夫繞射公式，我把圖片的每個像素當作點光源，並以此去計算出每個像素之間的繞射影響，得到以下結果。由此可知，繞射對於成像系統的解圖有十分大的影響，也因此在本專題中去針對繞射問題作處理。

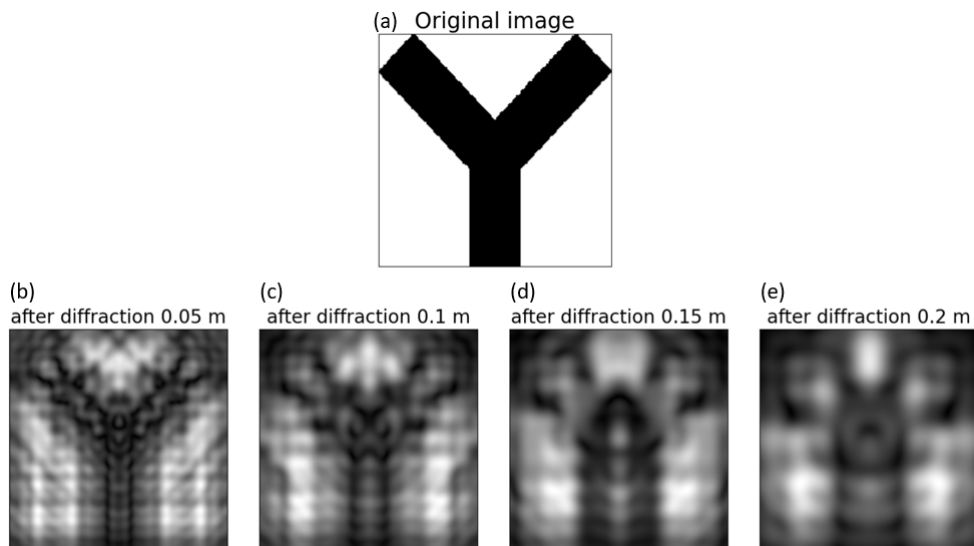


圖 3. 繞射在不同距離時的影響。

2.3、光學 4f 系統簡介

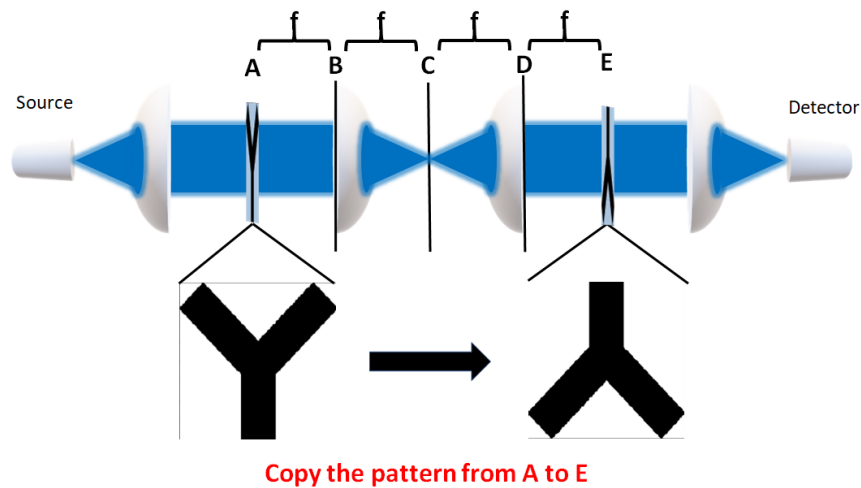


圖 4. 太赫茲光光路及 4f 系統示意圖

根據 2.1 中所述，在既有系統中繞射問題十分的嚴重，因此在本專題中在既有系統中加入了 4f 光學系統來解決繞射問題如圖 4 所示，4f 系統將整個光路系統分割成兩道平行光，且能將圖案從 A 完美的複製到 E 這個點上，其效果等價於直接用原圖案去做解圖，且能夠消除繞射對圖片的影響。

2.4、平行光與 4f 系統架設

圖 5 為太赫茲光光路之實際架設完成照片。由於本實驗實沒有光束輪廓儀 (Beam Profiler)，且太赫茲光不可見，因此我們藉由在 A、B、C 三點切刀口法來得到光斑大小和能量最大值，並藉此確認此光路是否為平行光路。刀口法的使用可以分成兩個部份解釋。**第一**，根據圖中之透鏡編號，2、3 號透鏡是 4f 系統之實現，我們先移除這兩個透鏡來完成 1、4 號透鏡的平行光架設。其原因是倘若照編號順序架設則需要細部校正兩條光路，但若先完成 1、4 號透鏡光路之架設，則可使得 2、3 號透鏡加入之後的光路較為容易校正。因此我們的作法是，在架 2、3

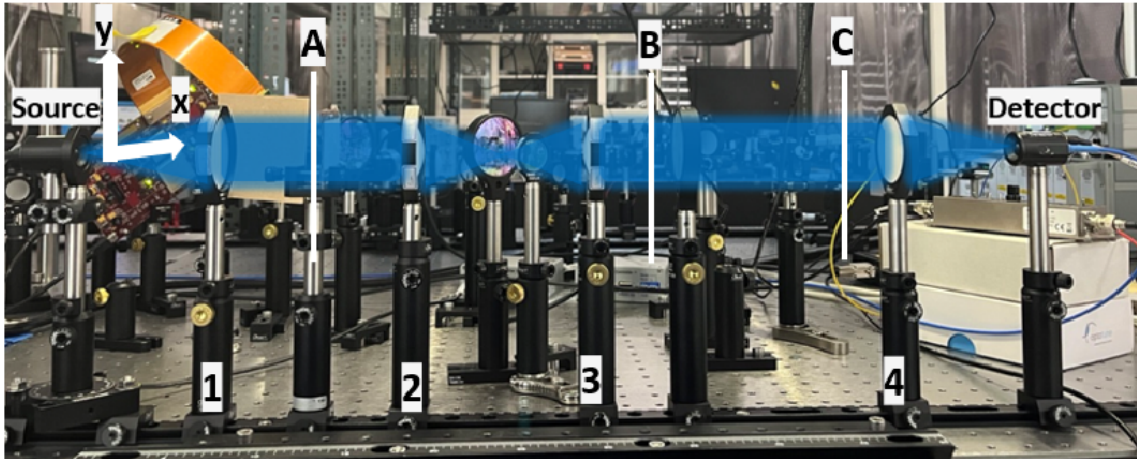


圖 5. 太赫茲光光路平視圖。為確認平行光，在 4f 系統架設前先於 A、C 兩個位置切刀口法來確認平行光；再加入 4f 系統，並於 B、C 兩個位置再切一次來確認平行光有精準架設完成。其中 1 4 為透鏡編號，A 為距離透鏡前 5 公分之焦平面，B 為距離透鏡後 5 公分之焦平面，C 為聚光之前的位置。

號透鏡之前先於 A、C 兩點的 x 和 y 方向切刀口法以確認是否為平行光。**第二**，我們於確認完編號 1、4 號透鏡之光路為平行光之後，加入 2、3 號透鏡，並再於 A、B、C 兩點切 x 方向與 y 方向之刀口法，來確認光路為平行光。

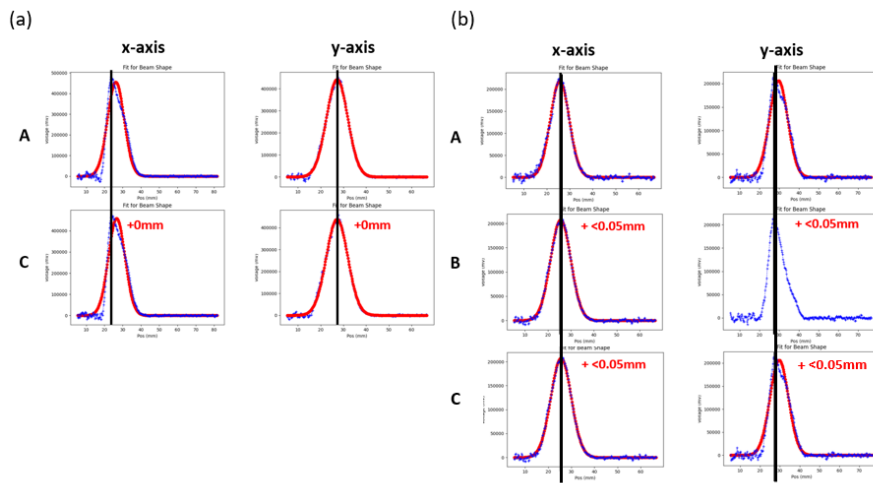


圖 6. 刀口法結果。(a) 在架設 4f 系統前於 A、B 兩點的結果。(b) 在架設 4f 系統後於 A、B、C 三點的結果。

其結果為圖 6 所示，在圖 6(a) 中顯示的是只完成 1、4 號透鏡架設之結果，可以看出在架設 4f 系統之前我已經將太赫茲光光路的能量最大值架設至完全相同，且不論在 x 軸方向或是 y 軸方向都成功架設至零誤差。而在圖 6(b) 中呈現的結果是在加入 4f 系統之後於 A、B、C 三點分別切刀口法的結果。由圖可知在架設完 4f 系統之後誤差僅有不到 0.05mm，顯示出第二到光路也已經是平行光，至此已確認太赫茲光路之平行光架設。

2.5、實驗結果

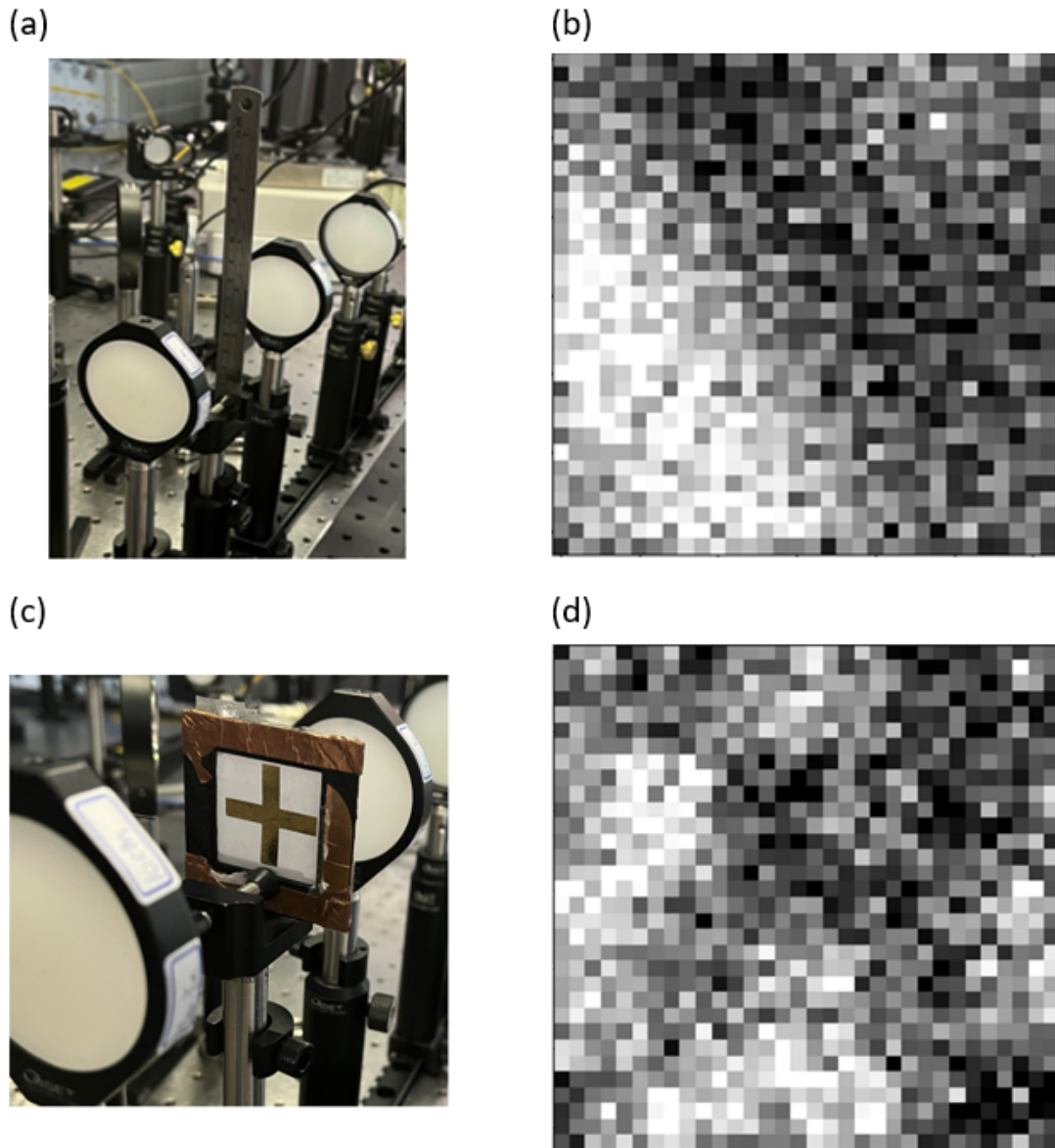


圖 7. (a) 被拍攝的直尺 (b) 直尺解回圖 (c) 被拍攝知十字物件 (d) 十字物件解回圖

圖8為實際完成架設後的太赫茲光光路和紅外光光路，其中 TIA 為轉組放大器 (TransImpedance Amplifier, TIA)。此光路可以分成紅外光光路與太赫茲光光路兩部分來說明。首先是紅外光光路，可從圖中看到紅外光在被 DMD 反射之後我多加了兩個透鏡，此即為 4f 系統之實現。

由圖7可看出，本系統成功的解回了直尺與十字的圖片。值得注意的是實際物體相較於被解回之圖片會傾斜 45° ，這是因為在系統中將 DMD 傾斜了 45° ，因此感知矩陣的圖案和打到物體的太赫茲光相差了 45° 角，解回圖也就會因此傾斜。可由此現象再次印證此系統有正常運作，圖片有被正常的解回。

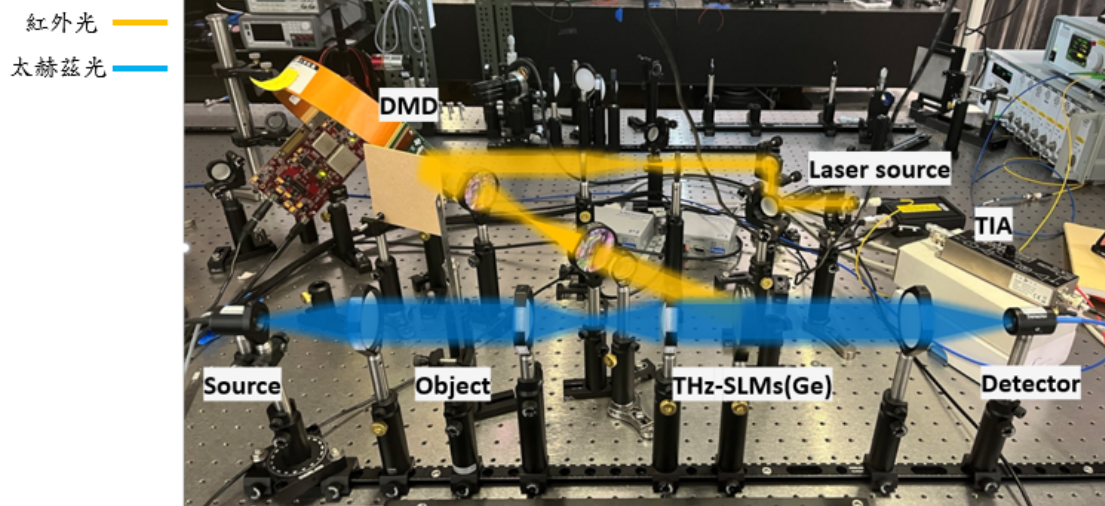


圖 8. 實際系統架設完成之圖片。

2.6、實驗流程

在本專題中，我的實驗流程如下：

1. 閱讀論文已建立相關背景知識
2. 熟悉紅外光光路及太赫茲光路架設
3. 從既有系統中學習相關儀器控制
4. 以軟體模擬 SNR 和繞射對解圖演算法之解圖能力之影響
5. 綜合以上完成系統架設並成功解圖

三、心得感想

在本次的專題中我接觸到了許多我從未接觸過的以及我從前十分排斥的領域，例如我從未接觸過有關嵌入式系統的課程，但在本專題中卻需要大量的控制儀器，雖然我並未完成程式編寫的部分，但仍從中學到許多有關儀器控制的相關知識，以其如何去看懂一份寫來控制儀器的程式。這也帶到了我從前覺得十分不擅長且排斥的領域，也就是軟體實作的部分。在這次的專題中，我必須要實際去使用許多程式，也就必須強迫自己至少要能了解程式在作甚麼，以及程式編寫環境的基本操作，甚至更接觸了需要實作模擬的部分。起初我仍蠻排斥有關於軟體方面的操作，但經過這次專題之後，雖然我依舊稱不上擅長軟體編寫，我卻已經不排斥這方面的實作，替自己多開了一扇門。

此外，除了有關實驗相關的專業知識，我認為在此學到同樣重要的是實驗精神跟如何站上台報告。老師總跟我們說「Make it happen」，在我們對於實驗一籌莫展的時候給予我們信心喊話，喊著喊著自己也開始相信事情真的可以完成，不論是在面臨階段性的任務或是眼前的麻煩，都能夠提起精神去繼續投入。另外則是報告的部分，我清晰記得第一次在實驗室的眾成員前報告時在台上被實驗室學長問倒的情形，在之前我以為我報告準備得很完整了，但直到那一刻我才發現原來自己的眼界太狹隘，原來針對一個議題可以從這麼多不同的角度切入，也學到一場好的報告所需要具備的要素是甚麼，以及倘若報告中無法清楚的呈現成果，那麼就算成果再怎麼優秀也是徒然。在這接近一年的時間中，我體驗到了實驗室生活，學到了許多在進

入實驗室作專題之前無法想像到的事情，雖然做實驗的過程常常是非常挫折的，但在經歷之後發現這一切都是令人難以忘懷的經驗。

最後則是十分感謝所有在進行這個專題時給予我建議和指教的教授和所有實驗室學長，在這裡我深深體會到自己在各方面仍需精進的地方，也因此學到許多從前沒有辦法想像的事情。雖然在本專題競賽分組名義上只有我自己一個人報名，但如果沒有實驗室中的各種幫助，我沒有辦法學到這些對我而言新穎而未知的知識，也沒有辦法對研究生活有更多的了解。十分感激這些來自各方的幫助。