

國立清華大學 電機工程學系

實作專題研究成果摘要

Terahertz Transmissive Scanning  
System for Non-Contact Detection of  
Adulterants in Honey

太赫茲穿透式掃描系統實現非接觸式  
蜂蜜摻雜物辨別

專題領域：光電領域

組別：A406

指導教授：楊尚樺 教授

組員姓名：蔡軒宇

研究期間：112年7月1日至113年6月30日止，共12個月

## 一、報告摘要

蜂蜜不僅被當作食品來食用，許多產品中也有添加蜂蜜的成分，甚至被指出有許多健康上的功效。然而蜂蜜摻偽的手法相當多，除了加入的糖漿成分不同，還有分成直接摻偽和間接摻偽方式的不同。直接摻偽是在蜂蜜中添加一定比例的高果糖糖漿販售，間接摻偽則是餵食商業糖漿給蜜蜂進行間接摻假。經過資料的查詢，我發現目前的蜂蜜的檢驗大多有速度較慢以及消耗樣品的問題，因此只能在出貨時做抽檢，無法做全面性檢查。

本研究目的在於藉由太赫茲頻譜學（Terahertz Spectroscopy）不同物質會有不同頻率吸收峰、不同穿透訊號強度的特性來分辨蜂蜜是否含有摻雜物，並且藉由太赫茲非接觸式、非破壞性的特性，可以對所有待測產品達成全檢。

為了確認利用太赫茲頻譜學分辨摻雜物的可行性，我先使用實驗室原有的太赫茲穿透式掃描系統，對於掃描出的結果進行分析，透過結合各個頻率下的吸光度得出吸收頻譜，便可看出待測物吸收峰的位置以及穿透訊號的強度，進而分辨蜂蜜中是否有果糖等摻雜物。接著為了提高掃描速度，我使用 Zemax 軟體模擬新系統架構，最後著手架設包含振鏡在內的穿透式振鏡掃描系統。

未來我將繼續研究，使用更多種類的摻雜物以及蜂蜜，並且要更進一步量化摻雜物濃度。希望我的研究能提供一個更快速且正確檢驗蜂蜜摻雜物的方式，也期待在研究成功後，將本研究的經驗延伸到其他食品的真偽辨別或是食安檢驗。

## 二、報告內容

### 1-1. 背景及研究動機

根據美國食藥局（U.S. Food and Drug Administration）在2023年發表的報告[1]，食物詐欺（Food Fraud）影響了全球1%的食物產業，詐欺手法包括不實標示、稀釋或摻雜其他替代品。其中蜂蜜是常見用於取代各種醣類添加物的食品，被視為比較健康的糖漿，然而因為蜂蜜的產量較不固定，不肖商人為了獲利製造摻偽蜂蜜，會在蜂蜜中添加一定比例的高果糖糖漿販售，或是餵食糖漿給蜜蜂間接摻假。

經過資料的查詢，我發現目前的蜂蜜的檢驗有速度較慢以及消耗樣品的問題，因此只能在出貨時做抽檢，無法做全面性檢查。Blanka Zábrowská 和 Lenka Vorlová[2]在2014年也有提到因為目前的檢驗分別都只能檢測出一部分特殊的摻雜物，因此需要用各種不同檢驗方式的結果合併比較。並且在 Blanka Zábrowská 的文章中介紹的這些檢測，大部分需要與待測物接觸或者添加藥劑，不僅比較耗費時間及資源還仍有可能漏掉特例。在添加藥劑以及耗費時間的限制下，這些檢驗都只能採取抽樣檢測，無法將

所有產品都進行檢驗。

## 1-2. 研究目的

本研究目的在於藉由太赫茲頻譜學，不同物質會有不同頻率吸收峰、不同穿透訊號強度的特性來分辨蜂蜜是否含有摻雜物，並且藉由太赫茲非接觸式、非破壞性的特性，可以對所有待測產品達成全檢，希望我的研究能提供一個更快速且正確檢驗蜂蜜摻雜物的方式。

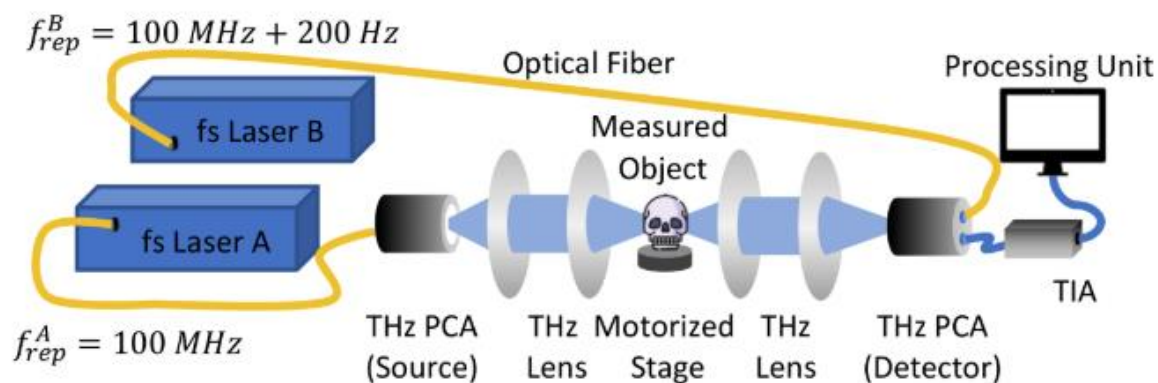
## 1-3. 研究方法

### 太赫茲頻譜學理論

太赫茲(Terahertz, THz)頻率範圍是 0.1THz~10THz，對應電磁波波長為3 mm~30 $\mu$ m，介於微波和可見光之間。因為太赫茲能量落在原子和分子的振動及轉動能階，特定的待測材料會吸收特定頻率的太赫茲波，因此透過分析物質的太赫茲吸收頻譜或穿透頻譜就可以幫助我們分辨材料的種類，這就是太赫茲頻譜學的原理。

### 太赫茲成像系統

本研究所使用的太赫茲成像系統為太赫茲時域光譜系統 (Terahertz time-domain spectroscopy system, THz-TDS system)，此系統用一個 PCA (Photoconductive Antenna) 射出太赫茲脈衝 (Terahertz pulse)，再用另一個 PCA 接收太赫茲訊號[3][4]。而本研究用於驗證的舊系統便是基於如此，示意圖如圖(一)，第一個 PCA (Emitter) 射出太赫茲脈衝會經過四個凸透鏡再傳到第二個 PCA (Detector)，待測物會放在可移動的平台上，藉由馬達移動待測物來掃描到待測物上的每一個位置。然而因為馬達移動的時間需要較久，當待測物越大也需要更久的時間，因此本架構仍有改進空間。雖然這個掃描系統較花時間，但因為掃描結果較穩定，因此可以用來確認太赫茲光譜學用於蜂蜜摻雜物檢驗的可行性。



圖(一) Asynchronous optical sampling (ASOPS) THz-TDS system [5]

## 驗證太赫茲檢驗蜂蜜的可行性

為了驗證太赫茲檢驗蜂蜜的可行性，我先使用在3-1提及的穿透式太赫茲掃描系統進行實驗。我選擇使用對太赫茲訊號有高穿透率的矽當作基板，並購買100%純蜂蜜及果糖糖漿進行實驗。實驗方式是分別調配三種待測物（純蜂蜜、純果糖、蜂蜜果糖各半混合），並將待測物塗抹於矽基板上，放置於系統掃描處進行測量。接著把原始資料用 matlab 撰寫的程式進行分析，時域的訊號資料經過傅立葉轉換產生頻域訊號，把有待測物、無待測物的資料進行比較計算，可以求出該待測物在特定頻率下的穿透率。最後將所有不同比例待測物的計算結果畫在同一張圖上方便查看。

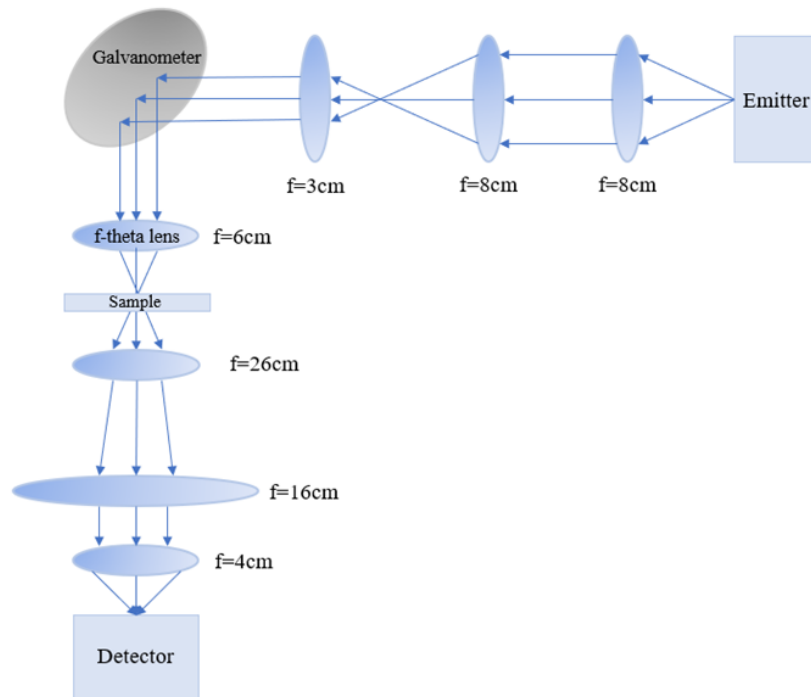
另外，由於蜂蜜和果糖都是具有流動性的黏稠液體，因此在測量時受到重力作用會往下流，造成測量時太赫茲波穿越待測物的厚度並不恆定，因此後來我改為使用 HybriWell Sealing Covers，規格為0.15mm Deep、13mm Dia.，將兩片 Sealing Cover 對準黏貼，就能夠得到直徑為13mm、厚度為0.3mm 的圓形空間，確保在該空間內放滿待測物後能夠維持相同的厚度不流動，並且調配出更多不同濃度比例的蜂蜜-果糖糖漿混合液作為待測物（包含:10\_90、25\_75、50\_50、75\_25、90\_10，其中前面的數字表示蜂蜜占百分之幾，後面的數字表示果糖占百分之幾），最後使用與前述相同的分析方式，可以得到的結果如圖(三)。

## 新系統設計及架設

基於光學系統理論基礎[6]，以及已畢業實驗室學長做過包含振鏡（Galvanometer）的穿透式掃描系統，我使用 Zemax 重新修改了原先系統中凸透鏡的參數，得到新系統後半部光路的模擬結果，接著就能夠根據模擬結果來協助實際掃描系統的架設。

如圖(二)，經過振鏡反射的太赫茲波會隨著振鏡旋轉角度的改變，入射場鏡（f-theta lens）的時候會有夾角，場鏡的性質可以讓不同入射角的太赫茲波最後同樣都交於焦平面上，並且光束入射角與像面上的光斑位置滿足線性關係，此關係滿足公式 $y = f \times \theta$ ，其中 $y$ 為像高、 $f$ 為焦距、 $\theta$ 為視場角。因此，我們就能將待測物放置於焦平面上，透過旋轉振鏡掃描整個待測物，這樣便可以提高掃描效率。最後三個凸透鏡的功能則是將發散的太赫茲波重新聚焦，回到接收器（detector）取得訊號資料。

除了系統架設外，為了確認系統正確，還需要改寫 Python 程式來產生太赫茲影像（Terahertz Image），目標是將鍍金屬的圖形待測物掃描成像。程式寫法為將背景掃描資料與待測物掃描資料相減，也就是在掃描待測物前，需要先掃描背景的訊號再相減。因此產生的影像中訊號較弱則代表在該位置太赫茲穿透較多，訊號強則表示待赫茲波被吸收或被反射較多。目前架設後掃描結果如圖(五)所示



圖(二) 新設計含振鏡穿透式掃描系統總架構

## 1-4. 研究結果

### 蜂蜜以及不同果糖摻雜濃度分析結果

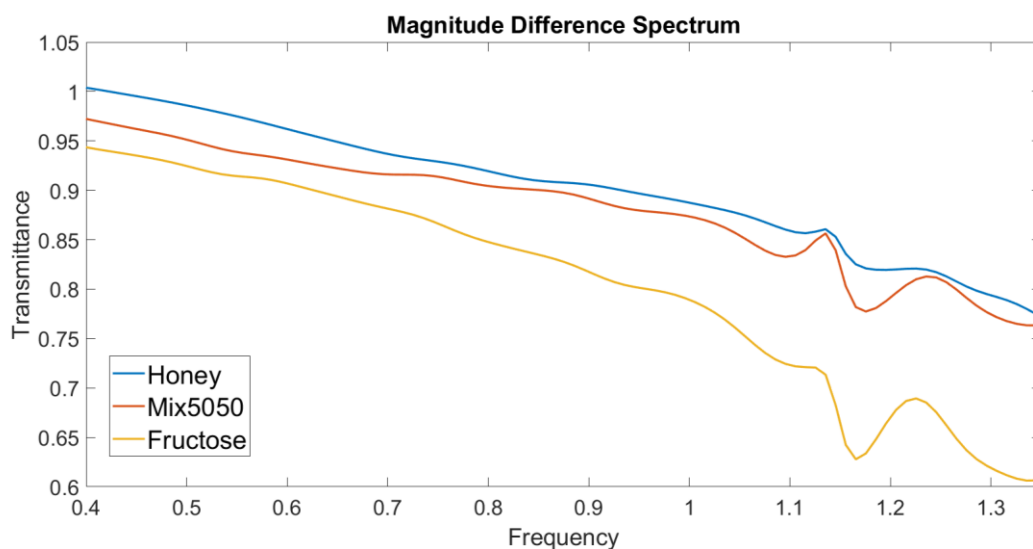
圖(三)是三種待測物的穿透率曲線，穿透率由公式  $T = [E_{sample}(\omega) / E_{reference}(\omega)]^2$  求得，而實驗室使用儀器取得的資料為時域上的訊號  $D(t)$ ，在資料處理時要先經過單位轉換  $E(t) = 20 \log_{10} D(t)$ ，再將  $E(t)$  傅立葉轉換才能進行穿透率的計算。圖中可以看到，蜂蜜及果糖在不同頻率下的吸收率有著些許不同，尤其是當頻率為 1.16THz，和 1.22THz 時有最明顯的差異。

可以看到蜂蜜-果糖混合液的穿透率在各個不同的頻率下，都介於蜂蜜及果糖之間，並且在上述提及的 1.16THz 和 1.22THz，混合液的穿透率變化與果糖相當接近。因此，在使用矽基板的前提下，這兩個頻率可以幫助我們分辨蜂蜜中到底有無摻雜果糖。然而雖然結果符合預期，但在實驗時發現待測物會流動的特性會改變測量的結果，也無法確認每次測量待測物的厚度都維持一致，因此我嘗試了許多不同的容器以解決這個問題，最後改為使用兩片 HybriWell Sealing Covers。

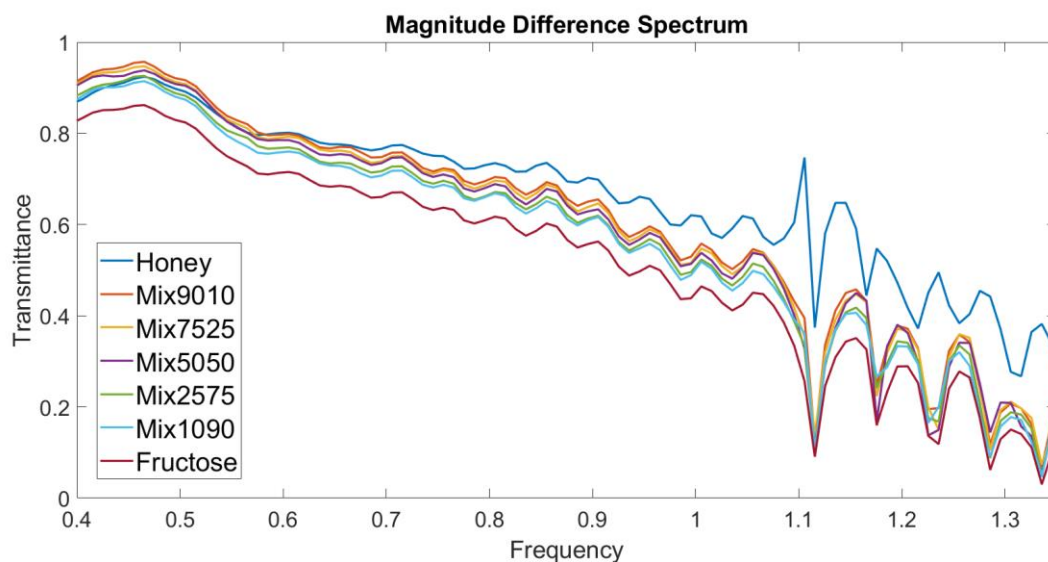
使用 HybriWell Sealing Covers 的結果為圖(四)，可以看到蜂蜜、果糖以及蜂蜜果糖混合液（包含:10\_90、25\_75、50\_50、75\_25、90\_10，其中前面的數字表示蜂蜜占比，後面的數字表示果糖占比）共七種待測物的頻域曲線，每條曲線的整體趨勢大多相同。

圖(四)是七種待測物的穿透率曲線，可以發現和圖(三)相比能夠更加準確分辨待測物是否有摻雜果糖，然而雖然更好分辨有無摻雜果糖，在未來的定量分析卻較為困難，

因為從圖(四)來看，不同的濃度比例之間的差別並不明顯，在頻率大於1.1THz 時，更會出現穿透率交錯的情形。



圖(三) 使用矽基板測量三種待測物的穿透率曲線



圖(四) 使用Sealing Covers測量七種待測物的穿透率曲線

### 含振鏡穿透式掃描系統模擬及架設結果

如圖(二)，因為振鏡前的透鏡目的僅僅是將發射器 (Emitter) 發射的太赫茲波，縮小光斑大小與振鏡大小接近，再產生平行光入射振鏡，因此我在 Zemax 軟體中只模擬振鏡後段的光路設計。

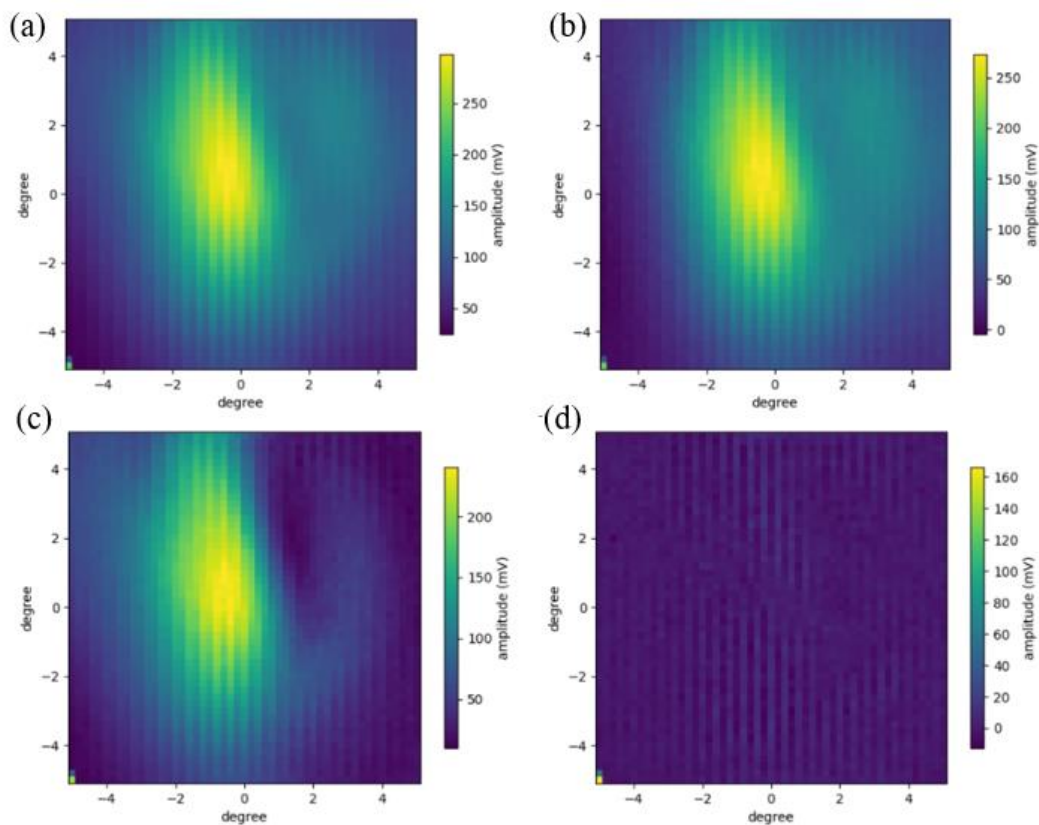
實際掃描結果則如圖(五)，四張圖的 XY 軸都是掃描角度 ( $\pm 5^\circ$ )，而圖中顏色越亮表示接收到的訊號越強。

背景掃描結果為圖(五) (a)，而(b) (c) (d)則是在不同情況掃描，與(a)相減的結果。可以發現當全反射時產生的影像與背景幾乎相同，原因在於全反射時掃描接收到的太赫茲訊號強度幾乎為0，因此在相減後無差別。而不放置待測物則會產生接近全黑的圖形，因為接收到的太赫茲訊號強度與掃描背景時相同，相減時會為0。因此藉由(b) (d) 兩圖可以確認程式碼結果符合預期。圖(五) (c)則是將金屬片遮住一半光斑，因此可以看到最後得到的結果，有一半是接近全反射結果(b)，另一半則接近全穿透結果(d)。

然而，在掃描鍍金屬的圖形待測物時，結果不明顯，並且待測物擺放的位置改變也會使成像影像大幅改變，推測原因可能有二：

1. 經過場鏡後聚焦不夠強（也就是穿透過待測物時的光斑過大），使得每個角度掃出的結果都差不多。
2. FOV 太小，使掃描範圍限縮在小範圍，THz 波只會出現全被反射或全部穿越的現象但因為圖(五) (c)中可以看到明顯的分界線，因此我認為 FOV 太小較可能是主要原因。

掃描時間則和各種參數有關，包含掃描角度大小 degree、掃描間距 step、平均次數 avg。以圖(五)為例，四張圖的參數都是 degree： $\pm 5^\circ$ 、step： $0.2^\circ$ 、avg：5次，所需的掃描時間約為5分鐘，比起原先靠馬達移動待測物的掃描系統速度快了超過兩倍。



圖(五) 含振鏡穿透式掃描系統掃描結果 (a)背景掃描結果 (b)放置金屬片全反射掃描結果 (c)放置金屬片一半區域全反射一半區域全穿透掃描結果 (d)不放待測物掃描結果

## 1-5. 總結

從研究結果4-1可以看到，透過太赫茲頻譜學便可以在不接觸、不破壞待測物的情況下正確的檢驗蜂蜜中所摻雜的果糖，判斷蜂蜜中是否有加入果糖摻雜物。

另外藉由新設計的含振鏡太赫茲穿透式掃描系統的優勢，將能夠大幅減少檢驗所需時間。利用此快速且非破壞的掃描檢測，可以讓蜂蜜的檢驗能夠達到全檢而非目前的抽檢。雖然目前還尚未完成多種摻雜物的定量分析以及新系統的架設，但未來我將會繼續把這部分的研究完成。

## 1-6. 參考資料

[1] U.S. Food and Drug Administration : Economically Motivated Adulteration

Available : <https://www.fda.gov/food/compliance-enforcement-food/economically-motivated-adulteration-food-fraud>

[2] B.Záborská and L.Vorlová, “Adulteration of honey and available methods for detection – a review,” *Acta Vet. Brno*, vol. 83, pp. S85–S102, 2014, doi : 10.2754/avb201483S10S85.

[3] H.Guerboukha, K.Nallappan, and M.Skorobogatiy, “Toward real-time terahertz imaging,” *Adv. Opt. Photonics*, vol. 10, no. 4, p. 843, 2018, doi : 10.1364/aop.10.000843.

[4] L.Afsah-Hejri, P.Hajeb, P.Ara, and R. J.Ehsani, “A Comprehensive Review on Food Applications of Terahertz Spectroscopy and Imaging,” *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 18, no. 5, pp. 1563–1621, 2019, doi : 10.1111/1541-4337.12490.

[5] Y.-C.Hung, T.-H.Chao, P.Yu, and S.-H.Yang, “Terahertz spatio-temporal deep learning computed tomography,” *Opt. Express*, vol. 30, no. 13, p. 22523, Jun.2022, doi: 10.1364/OE.461439.

[6] Z. B.Harris, A.Virk, M. E.Khani, and M. H.Arbab, “Terahertz time-domain spectral imaging using telecentric beam steering and an f- $\theta$  scanning lens: distortion compensation and determination of resolution limits,” *Opt. Express*, vol. 28, no. 18, p. 26612, Aug.2020, doi: 10.1364/OE.398706.

## 三、心得感想

在整個學年的專題實作中，我深刻地了解了實驗室的運作模式和研究方法。參加每兩周一次的 Journal Club，與專題生和碩士一年級學長分享閱讀的論文，讓我有機會接觸到太赫茲領域的其他應用研究，這樣的活動擴展了我的視野。另外，每兩周一次的會議中，各組別的學長們做 Keynote Presentation，讓我更了解太赫茲領域的應用和技術，並從碩士學長的 Progress Report 中學習到處理研究問題和報告技巧。

我要特別感謝指導教授楊尚樺以及影像組的學長們，包括麥家銘、吳劭軒和高浚育，他們不僅在程式、系統架設、儀器使用等方面給予我很多建議，也在研究方向上提供了寶貴的意見和想法，幫助我不斷改進專題研究。

研究期間實驗結果不符預期是很常見的狀況，重要的是在過程中我學到了如何找到問題點，並想辦法找出對應的解決方法，也因為如此，雖然研究過程遇到許多的困難，但最後還是順利完成了研究。

這次的專題讓我對太赫茲領域有了更深入的了解，也實際利用太赫茲光譜學檢驗蜂蜜，動手架設掃描系統，我相信未來太赫茲的發展一定能夠應用於各個領域，融入我們的生活中。