

國立清華大學 電機工程學系  
實作專題研究摘要

Terahertz Reflective Ptychography Using  
Divergent Illumination with a Beam  
Splitter

利用發散照明與分光鏡實現  
太赫茲反射式疊層成像術

專題領域：光電領域

組別：B435

指導教授：楊尚樺 教授

組員姓名：張守豐

研究期間：113年2月1日至113年11月30日止，共10個月

## 一、報告摘要

在本研究中，我們開發了一個高效的太赫茲反射疊層成像(Terahertz Reflective Ptychography)系統，旨在捕捉高解析度的衍射圖樣，應用於先進成像技術。該系統使用分光鏡產生一束發散的球面光束，並將其引導至樣品進行掃描。這種發散光束的設計對於確保樣品均勻照明至關重要，從而提高了反射信號的精確性。樣品表面反射的光線由太赫茲探測器陣列接收，並且經過精確調整的探測器陣列位置，能夠最大化信噪比，確保數據採集的高精度。

為進一步提升系統的精確度，我們實現了信號發生器、太赫茲波段發射器、電動平台和探測器陣列之間的同步控制。這種緊密的同步控制有效減少了掃描過程中可能因時間誤差而引發的系統誤差，例如發射器輸出波動或電動平台移動的不精確。這樣的設計確保了在不同樣品區域和掃描條件下所收集數據的高度可靠性和一致性。

獲取原始數據後，我們利用程式碼將系統所捕捉的圖以初步的後處理結果顯示，樣品的出射波——即與樣品相互作用後的波——呈現出了清晰的衍射圖樣。值得注意的是，這些圖樣以明顯的圓形出現，這與太赫茲反射式成像系統中常見的橢圓形失真形成了鮮明對比，後者通常是由反射幾何形狀所引起的。

橢圓形失真的消除是系統設計上的一大突破，表明該系統能有效減少不必要的投影偽影。這使我們能夠無需進行在數學上的影像校正，直接利用系統所得的衍射圖形重建樣品的結構信息。總體而言，這些初步結果展示了該系統在高精度太赫茲成像中的巨大潛力，為未來在材料特性分析、生物醫學成像以及無損檢測中的反射疊層成像技術應用奠定了堅實基礎。

隨後，我們計劃使用擴展疊層成像迭代引擎（extended Ptychographic Iterative Engine, ePIE）進行進一步的數據處理，藉由分析衍射圖樣來重建樣品的相位和振幅資訊。這一過程對於提升影像解析度和準確還原樣品的結構至關重要。目前，這項工作仍處於專題研究的探索階段，因此尚未進行最終的統整和優化。

## 二、報告內容

### 1-1. 研究背景與動機

疊層成像術(Ptychography)是一種無透鏡且無需參考的先進成像技術，能夠通過相位恢復算法來解決相位問題，並已廣泛應用於短波長光源，如 X 射線、紫外線和可見光。傳統上，這些技術在科學研究與工業應用中展現出強大的潛力。然而，隨著科技的進步，疊層成像術的應用範圍正在向太赫茲（Terahertz）頻率領域擴展，該頻率區域因其能夠實現非破壞性檢測以及穿透不透明物質的特性，正成為新的研究熱點[1]。近年來，隨著太赫茲技術的發展，越來越多的應用場景得以探索，涵蓋了生物醫學成像、材料檢測、無損檢測等領域，這為太赫茲疊層成像術的應用提供了廣闊的前景。

目前，太赫茲疊層成像術主要是基於透射模式。然而，反射模式的太赫茲成像在許多特定應用中極具潛力，例如皮膚燒傷的次表面成像、隱藏於不透明層下的物體形

貌測量，甚至在爆炸物探測等特殊環境中進行遠程檢查[2]。因此，我們的研究動機是開發一種基於反射模式的太赫茲疊層成像術成像系統，以填補現有技術在這些應用中的空白。

當前的太赫茲探針大多為平面探針，且數據多為透射模式下獲取。然而，平面探針通常需要經過光圈以形成均勻的光束，這會導致能量損失並限制掃描區域的大小。在反射模式下，額外的橢圓校正進一步增加了系統的複雜性，並可能對重建的數據產生不必要的影響[3]。因此，為了克服這些挑戰，我們提出了使用發散球面探針作為替代方案。這種探針能夠捕獲更大範圍的散射角度，並通過增加光通量及擴大照射範圍，來提升成像質量和信噪比（SNR）[4]。

## 1-2. 研究目的

本研究的目的是利用發散球面探針，結合太赫茲頻率範圍內的反射成像系統，實現更高效且精確的成像。我們使用分光鏡將發散探針反射至樣品表面，並透過非制冷微測輻射熱計相機 (uncooled microbolometer FPA camera) 來捕捉反射光。為了進一步降低環境干擾，我們開發了一套自動化掃描系統。通過初步數據處理，我們成功觀察到了樣品出射波中的繞射圖樣，這項研究的成果將為未來的反射模式太赫茲成像應用提供有力的技術支持。隨後，我預計利用擴展疊層成像迭代引擎（ePIE）演算法進行了相位重建並作分析。

## 1-3. 研究方法

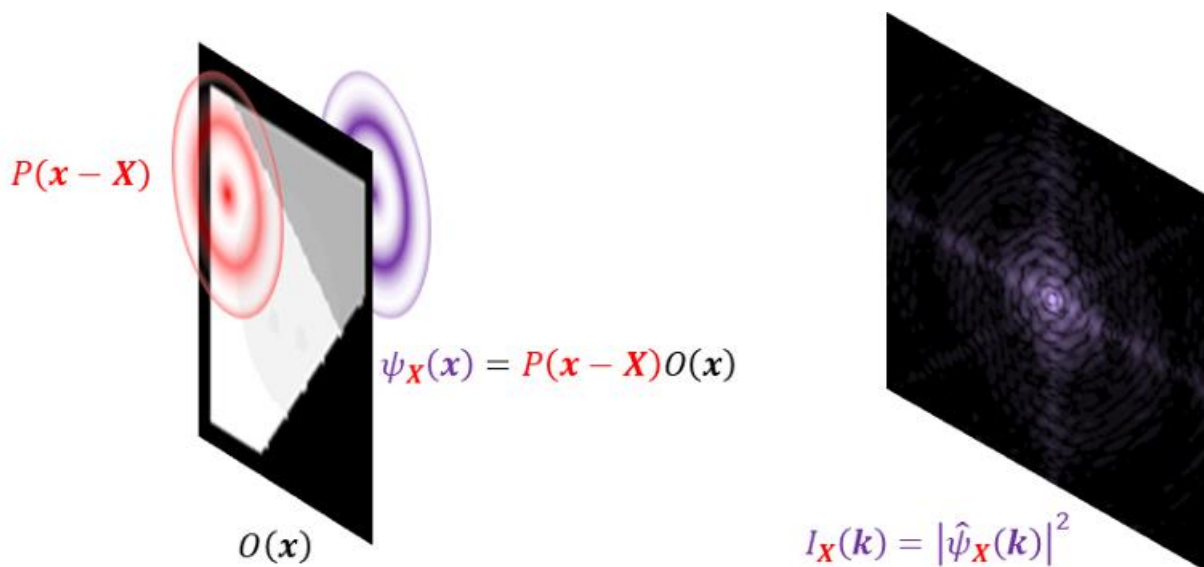
### 太赫茲疊層成像術簡介

如圖(三)，太赫茲疊層成像術 (Terahertz Ptychography) 是一種利用太赫茲波段 (0.1至10 THz) 的電磁波來實現非破壞性檢測與成像的技術。太赫茲波位於微波與紅外線之間，具有穿透許多常見材料 (如塑膠、紙張、陶瓷等) 而不會對材料產生破壞的特性，因此在無損檢測、材料鑑定、醫學成像等領域有著廣泛的應用。

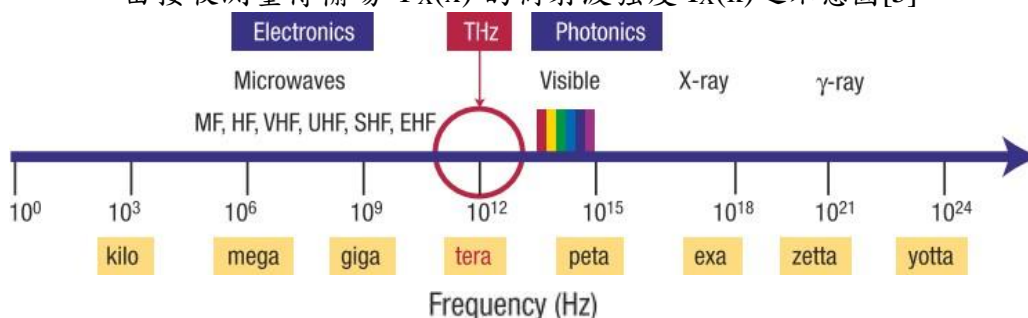
圖(二)是疊層成像術的運作模擬圖，疊層成像術是一種利用繞射圖樣來重建物體特性 (如相位和振幅) 的計算成像技術。該方法最早於1970年由 Hegerl 和 Hoppe 在晶體學領域提出，隨著 Rodenburg 和 Bates 的進一步發展，疊層成像術已經成為處理非週期樣品的強大工具。

在疊層成像術中，實驗的核心在於使用已知的探針光束 (probe, P) 來照射物體 (object, O)，並測量透射或反射光的繞射圖樣強度。這個過程需要將探針移動至物體的不同位置，並確保每個位置的探針照射區域部分重疊 (約60%至90%)，重疊區域能夠在不同探針位置之間提供關聯性，這使得演算法可以更可靠地估計樣品和探針的特性，如果沒有足夠的重疊，這些區域的資訊會不足，導致重建結果不完整或不穩定。每當探針移動至新位置時，會產生新的繞射圖樣，這些圖樣會逐一被記錄。通過分析這些不同位置的繞射圖樣，並運用相位恢復演算法進行影像重建，最終可以重建物體的相位與振幅資訊。

疊層成像術的發展使其在多個領域展現出強大的應用潛力，特別是在需要高精度相位重建的場景，如生物成像和材料科學。透過有效的探針設計與複雜的演算法處理，該技術能夠從有限的繞射圖樣中還原出高解析度的物體影像。



圖(二) 疊層成像術設定：將照明探針  $P(x)$  掃描物件  $O(x)$  上的不同位置  $X$  由接收測量傳輸場  $\Psi_X(x)$  的衍射波強度  $I_X(k)$  之示意圖[5]



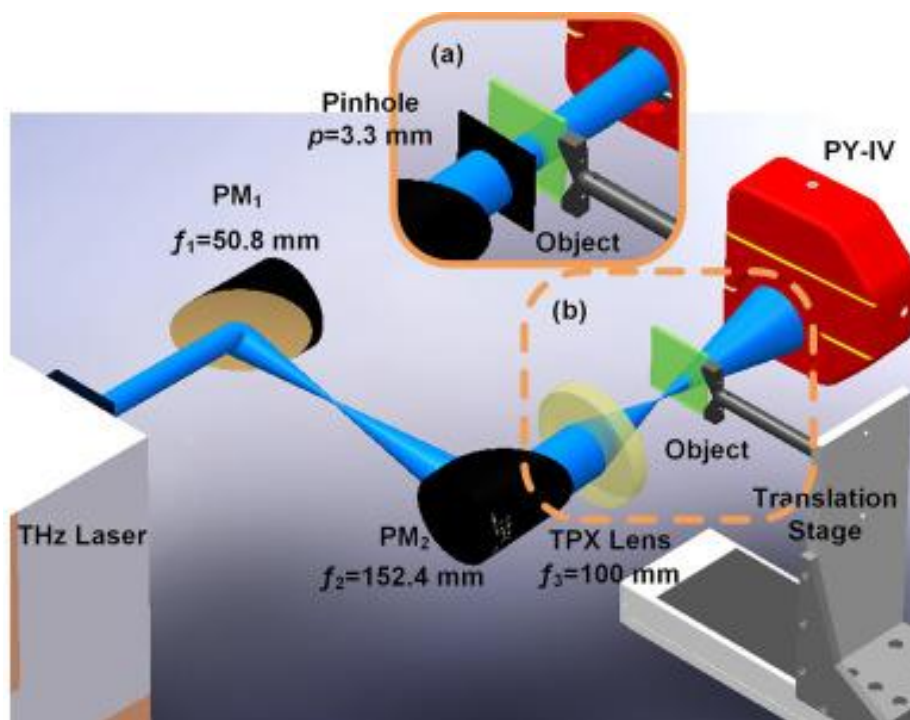
圖(三) 太赫茲波段對應電磁波頻譜位置圖 [6]

### 現階段太赫茲疊層成像術掃描探針

研讀有關太赫茲疊層成像術的論文後，了解目前主要使用的掃描探針包括發散球面探針 (Divergent Spherical Probe) 和平面探針 (Planar Probe)，其中平面探針因其設計簡單，應用最為廣泛。接下來將對這兩種探針形式進行詳細探討：

圖(四)(a)是平面探針的示意圖，該探針利用光束通過小孔來削減光束直徑，進而產生近似均勻的平面波，隨後掃描物體以獲取影像。由於其結構簡單且易於實現，平面探針廣泛應用於多數成像系統。然而，這種探針的光束分佈相對集中，小孔效應會削弱部分光子通量，導致光強度降低。在解析度需求較高的應用中，平面探針可能會受到光強度不足的限制，無法捕捉到足夠的衍射資訊。

圖(四)(b)是發散球面探針的示意圖。這種探針通過透鏡將準直光束聚焦，並將被掃描物體放置於焦點之後，使其產生發散的球面波進行掃描。由於發散球面探針不依賴小孔削弱光束，因此其光強度較平面探針高。此外，這種照明幾何形狀降低了偵測器所需的動態範圍。且具有更廣的覆蓋範圍，能捕捉更多高頻衍射訊息。這使得發散球面探針在解析度和信號噪聲比要求較高的應用中，具有明顯的優勢，尤其是在需要高精度成像的領域。



圖(四) 平面探針(a)和發散球形探針(b)的太赫茲疊層成像的實驗裝置 [4]

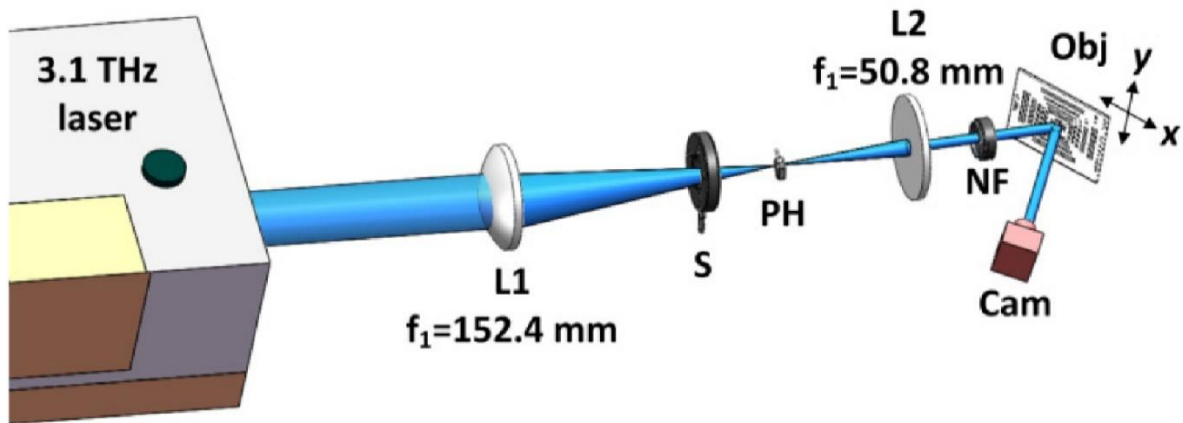
### 現階段太赫茲疊層成像術系統配置

研讀有關太赫茲疊層成像術的論文後，了解到現階段的系統配置大多以穿透式為主。該系統通過構建平面探針或發散球形探針對樣品進行掃描，並將探測器置於樣品的後方，以接收探針掃描樣品後透射出的衍射波。這種方式能夠在不破壞樣品的情况下，透視其內部結構，並取得其振幅和相位信息，如圖(四)所示。

在反射式系統配置中，尤其是針對反射性或不透明物體的檢測，該系統能夠有效捕捉樣品的表面信息。然而，與穿透式系統相比，反射式系統的配置更具挑戰性，特別是在探針與樣品角度的精確設定以及探測器的校正方面。即使接收角度出現微小偏差，有稍微偏準，都可能導致成像結果的不準確性，系統可能會錯誤解讀反射波的相位和振幅信息，導致最終重建的圖像產生變形或失焦，進而影響重建圖像的清晰度和精度。

圖(五)展示了當前反射式系統的配置研究。根據現有研究[2]，反射式系統配置的操作流程首先是生成發散的球形探針，接著使用透鏡將其整形為平行的平面探針，最後利用平面探針對樣品進行掃描，樣品所反射的衍射波則由安裝在一定角度的相機進行檢測。

在這類反射式系統中，快門 (Shutter) 被用來抑制熱背景噪聲。由於探測器和樣品之間存在角度差異，研究人員對頻譜座標進行了變換校正，以修正由傾斜平面產生的圖像變形。如果不進行校正，成像結果可能會失焦，進而增加圖像重建的難度；而經過校正後，雖然圖像更加聚焦，但探針形狀會變為橢圓。即使校正後的衍射圖形能提升物體重建的易度，卻難以確保校正過程中沒有扭曲原始信息，這也是該系統的一個缺點。為解決此問題，我提出了一些方案，解決衍射波橢圓形失真的問題，潛在的改進重建過程中的準確性。



圖(五) 現階段太赫茲反射式疊層成像術示意圖[2]

### 新系統設計及架設

基於以上討論的太赫茲疊層成像法理論基礎及相關研究，我們得知發散球面探針在解析度和信號噪聲比要求較高的應用中具有顯著優勢。這種探針特別適用於需要高精度成像的領域，並且由於它是用透鏡聚焦的方式形成探針，探針的能量不會因為光束通過光圈而顯著下降，這使其在能量傳輸和信號保持方面表現出色。

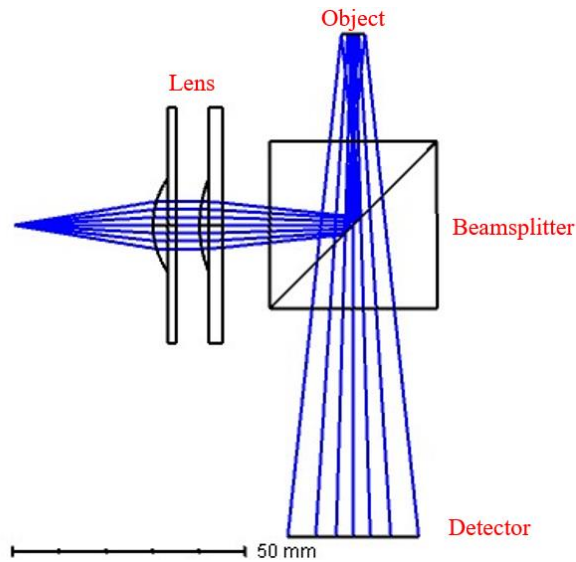
然而，儘管發散球面探針在透射式應用中展現了其潛力，在反射式成像的應用中，尚未見到利用該探針進行樣品掃描的具體實踐。因此，為了突破這一技術瓶頸，我計畫引入分光鏡來實現這一應用。分光鏡的引入將使得發散球面探針在反射式架構中能夠更加有效地工作，預期可實現高精度掃描成像，同時保持信號強度和探針性能。

### Ansyz Zemax 軟體系統模擬

在實際架設系統之前，我使用 Ansys Zemax 光學模擬軟體進行了詳細的模擬，以設計和優化整個光路系統。模擬的重點在於如何利用分光鏡將發散的球面探針光束引導至光路的左側或右側，以實現對樣品的掃描。該設計使探針的入射光能夠準確打到樣品表面，經樣品反射後，衍射波被探測器捕捉。

在此過程中，分光鏡有效地將發散球面探針產生的太赫茲光束引導至樣品表面，並確保反射光不會被其他元件阻擋。此外，衍射波以不扭曲的形式進入探測器，從而減少影像校正的繁瑣步驟，最大限度地提高系統的信號接收效率。

圖(六) Ansys Zemax 光學模擬軟體的模擬示意圖。首先，在軟體中設定發射器 SGX-M (220-330 GHz) 的頻率及發射角 (Divergence angle)，其中以頻率為 275GHz 及發散角 8.8°。接著，利用兩個聚焦透鏡來塑造準直光束並進行聚焦。第一個透鏡的焦距為 17.5 mm，第二個透鏡的焦距為 26.2 mm。在光經過第二個透鏡聚焦之前，在光路中放置了分光鏡，將光束引導至光路的左側(上方)以便對樣品進行掃描。探測器則位於光路的右側(下方)，用於接收從樣品反射回來的衍射資訊。



圖(六) Ansys Zemax 光學模擬軟體的模擬示意圖

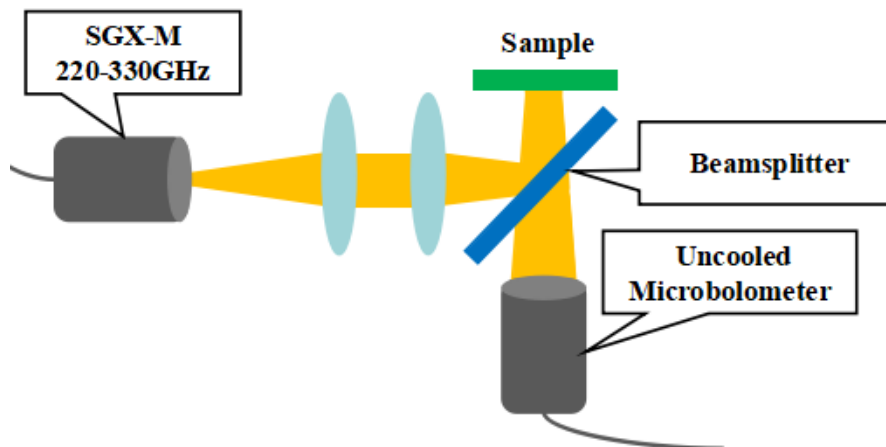
### 自動化掃描系統設置

使用實驗室的儀器進行系統架設，如圖(七)。系統設計中包含 MXG 信號發生器 N5138B，用來控制 SGX-M 220-330GHz 系統。在光路中安裝透鏡及分光鏡後，實驗進行了尺寸為 5 cm x 5 cm 的 Siemens star 樣本掃描。掃描過程中，使用電動馬達平台精確移動樣品，以確保探針覆蓋樣本的每一個位置。接收衍射波資訊則使用了由 Institut National d'Optique (INO) 設計的 INO Terahertz 相機（非制冷微測輻射熱計相機）進行接收，如圖(八)所示。

由於疊層成像技術需要數百張圖片進行疊加，因此如何高效地同步控制馬達、發射器和相機成為了實驗的關鍵。為了解決這一問題，我們成功利用 INO 公司提供的 SDK 程式碼，開發出一套自動化圖像收集系統，實現對馬達、發射器和相機的同步控制。整個系統依賴於 INO 提供的 SDK 來協調各元件的工作。

具體操作流程如下：使用 Visual Studio Code 控制電腦，通過路由器向電動馬達平台、信號發生器以及 INO Terahertz 相機發送指令。系統首先在發射源開啟時拍攝一張圖像，然後關閉發射源再拍攝一張背景圖像。隨後，電動平台將樣本移動到下一個位置，重複這一過程，直到所有掃描點完成，確保每個位置都獲得精確的圖像數據，以上說明如圖(九)所示。

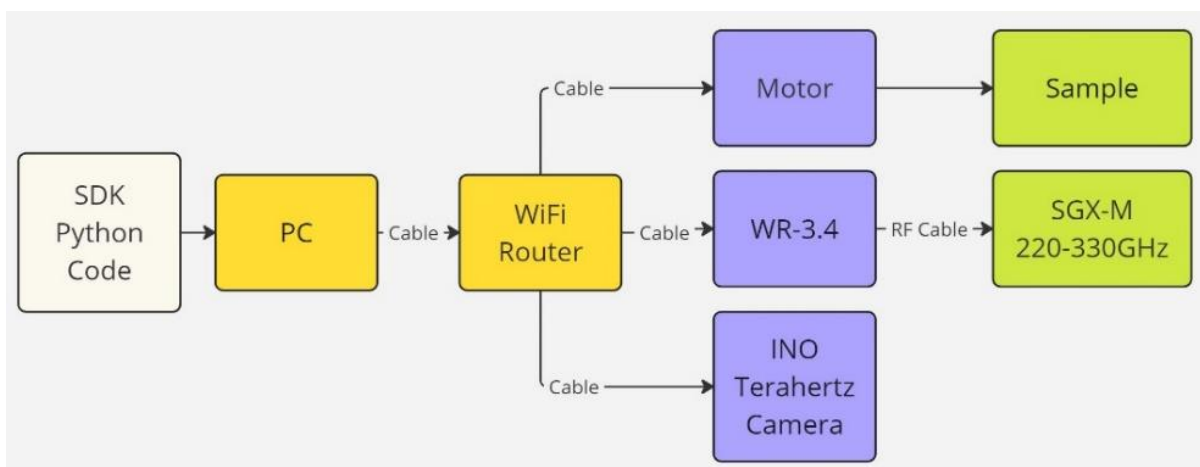
在同一位置拍攝兩張照片的目的，是為了簡化後處理過程。這樣的設計不僅省去了文獻中常用的快門消除背景雜訊的繁瑣程序，還避免了對準快門的複雜步驟。通過直接在開啟和關閉發射源的狀態下拍攝兩張圖像，我們能夠高效的在初步後處理中減去背景雜訊，從而提升了獲取衍射波數據的速度和效率。這一做法在確保數據質量的同時，也顯著縮短了實驗時間。



圖(七) 太赫茲反射式疊層成像系統架設示意圖



圖(八) 太赫茲反射式疊層成像系統架設情形



圖(九) 程式控制系統方塊圖(Block diagram)

## 後處理演算法介紹

在我的研究中，為了實現高精度的物體相位與幅度重建，選擇合適的相位檢索演算法至關重要。傳統的相位檢索方法雖然在某些情況下有效，但面對複雜的樣本結構或樣本移動時，往往難以得到準確結果。擴展疊印迭代引擎（ePIE）之所以成為我的首選方法，是因為它能在樣本移動的情況下有效處理多組衍射圖樣，並通過迭代優化，同時更新物體的傳遞函數和光束照射函數。這一點對於我處理不同步驟移動的數據集尤為關鍵，因為 ePIE 提供了靈活且精確的重建能力，使其成為最適合我研究需求的工具。

Maiden 和 Rodenburg 提出的「擴展疊印迭代引擎」（ePIE）[1]擴展了標準 PIE 的功能，使其能夠更靈活地處理物體移動以及其他系統誤差。在這種方法中，通過反覆調整物體的傳遞函數  $o(\mathbf{x})$  和光束照射函數來達到重建目標，最終實現高精度的物體相位和幅度重建。

接下來是 ePIE 演算法的簡單介紹，在 ePIE [7] 中，物體位移到不同的位置，每個位置  $k$  對應的衍射圖案  $I_k(u)$  是從物體的出射波  $\psi_k(x)$  經過傳播後形成的。出射波與物體的傳遞函數  $o(x)$  和光束照射函數  $p(x)$  之間的關係可以通過如下方程表示：

$$\Psi_k(x) = p_k(x)o_k(x - x_k) \dots \dots \dots (3.1)$$

這個方程描述了當物體位於位置  $x_k$  時，光束與物體相互作用後形成的出射波  $\psi_k(x)$ 。為了從這些衍射圖樣中恢復物體的相位和幅度分布，需要將出射波傳播到偵測平面。

在傳播過程中，出射波  $\psi_k(x)$  會根據傳播距離  $d$  來生成在偵測平面上的衍射圖樣。這一過程可以通過傅立葉轉換來描述。在近場衍射條件下，出射波的傅立葉轉換表示為：

$$\Psi_k(u) = \mathcal{F}\{\psi_k(x)\} \dots \dots \dots (3.2)$$

當出射波傳播到偵測平面後，下一步是將強度約束應用到偵測平面上的波場，這一步是為了確保波場的幅度與實際記錄的衍射圖樣相一致。具體地，波場的幅度由強度圖樣的平方根給出，並保留原本的相位信息  $\arg(\Psi_k(u))$ ：

$$\Psi'_k(u) = \sqrt{I_k(u)} \exp(i \arg(\Psi_k(u))) \dots \dots \dots (3.3)$$

經過這一步之後，修正後的波場會被傳播回物體平面，這個過程是通過反傅立葉轉換來完成的，這一步使得修正後的出射波可以回到物體平面，用於進一步的迭代重建過程。具體表達式如下：

$$\psi'_k(x) = \mathcal{F}^{-1}(\Psi'_k(u)) \dots \dots \dots (3.4)$$

接著，會進行迭代重建，ePIE 演算法的核心是利用多組重疊的衍射圖樣進行迭代更新。在每次迭代中，將預測的衍射圖樣與實際記錄的強度進行比較，並反覆調整物體的傳遞函數  $o_k(x)$  和光束照射函數  $p_k(x)$ 。具體表達式如下：

$$o_{k+1}(x) = o_k(x) + \alpha U_k^o(x + x_k)(\psi'_k(x + x_k) - \psi_k(x + x_k)) \dots \dots \dots (3.5)$$

$$p_{k+1}(x) = p_k(x) + \beta U_k^p(x - x_k)(\psi'_k(x) - \psi_k(x)) \dots \dots \dots (3.6)$$

其中， $\alpha$  和  $\beta$  是控制更新量的參數， $U_o^{(k)}(x) \equiv \frac{p_k^*(x)}{\max|p_k(x)|^2}$  和  $U_p^{(k)}(x) \equiv \frac{o_k^*(x)}{\max|o_k(x)|^2}$

是更新函數。這個過程會反覆進行，直到重建結果收斂，誤差達到最低值。

## 1-4. 研究結果

### 整體實驗流程設計

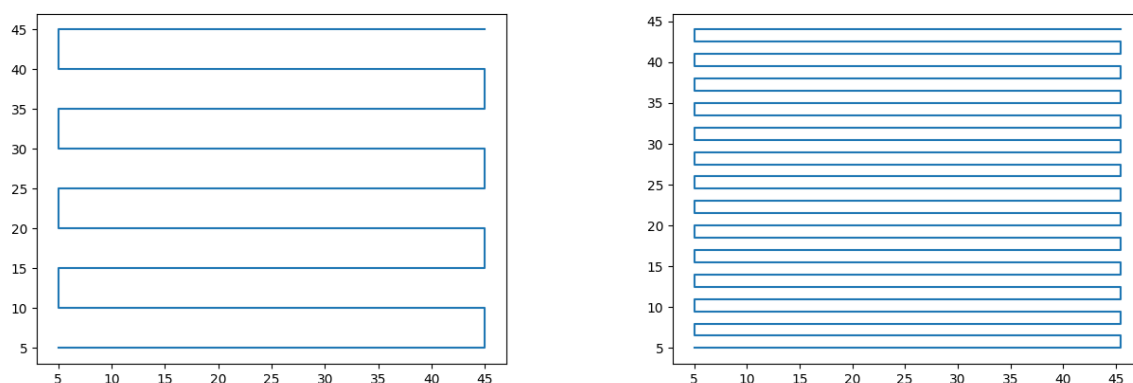
圖(十)展示了電動馬達平台在不同步進距離下的移動方向，分別為5 mm和1.5 mm。該平台能夠精確移動樣品，使探針在各個位置進行掃描，從而實現對樣品的全域覆蓋。在本次實驗中，我們對尺寸為5 cm x 5 cm的Siemens星形樣品進行了掃描，並分別使用5 mm和1.5 mm的步距來移動平台。根據公式(4.1)計算，這兩種設置下的重疊率分別達到66.7%和90%，符合疊層成像術所需的覆蓋百分比。圖(十一)則展示了兩個衍射波重疊計算的示意圖，其中， $o$ 表示重疊長度， $r$ 代表衍射波半徑， $s$ 則為步距。

$$\text{Overlap ratio} \equiv \frac{o}{2r} \times 100\% = \left(1 - \frac{s}{2r}\right) \times 100\% \dots\dots\dots(4.1)$$

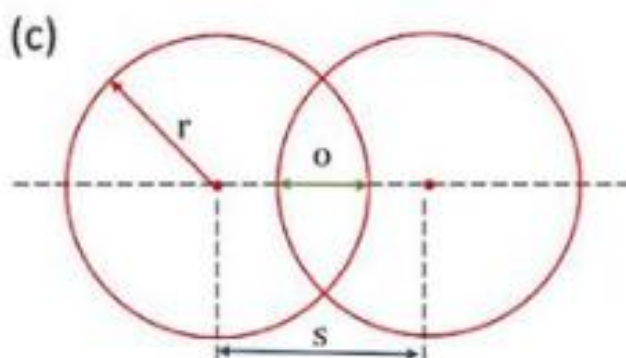
在步距為5 mm時，共攝得81張圖片；而在步距為1.5 mm時，則攝得766張照片。這些影像資料將用於後續的ePIE相位恢復演算法進行重建，進一步提取樣品的結構資訊。

(a)

(b)



圖(十) 電動馬達平台移動方向 (a) 5mm (b) 1.5mm



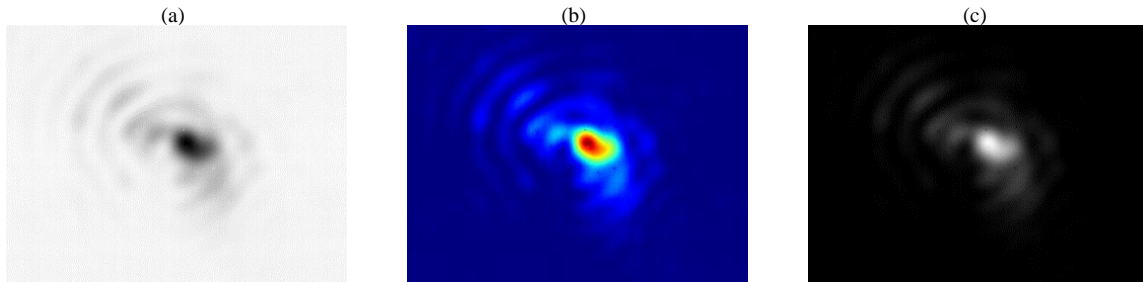
圖(十一) 兩個衍射波重疊計算的示意圖[8]

### 衍射波初步處理結果

圖像以 NPY 檔案格式儲存，並通過影像相減法消除背景雜訊，從而獲得更加乾淨和精確的圖像。此處的影像相減過程有效去除了環境光、背景反射及其他非樣品相關的噪聲干擾，使得樣品的特徵更加明顯和清晰。如圖(十二)所示，實驗結果呈現出大致圓形的圖案，且沒有因反射投影所導致的橢圓形幾何失真現象。這表明了系統具備良

好的幾何保真度與穩定的成像能力。

此外，圖像中的繞射波顯著可見，表明太赫茲波在樣品內部與表面上發生了明顯的繞射效應。這些繞射現象不僅證實了太赫茲波對樣品細節結構的敏感性，同時也揭示了其波長與樣品尺寸之間的相互作用。值得注意的是，繞射波的清晰可見性說明了所採用的掃描與重建技術在捕捉微小特徵和邊緣細節方面的精度。此外，實驗中採用的背景去除及圖像處理技術，進一步優化了數據質量，提升了最終重建影像的解析度與真實性。這些結果為後續的分析提供了可靠的數據基礎，也顯示出系統在處理複雜樣品時的優異性能。



圖(十二)以第 33 點為例的部分實驗結果包括：非冷卻型微測輻射熱計拍攝的初始影像 (a)、後處理後的彩色影像 (b) 以及後處理後的灰階影像 (c)。

## 1-5. 總結

本研究成功實現了基於發散球面探針的太赫茲反射式疊層成像系統，並驗證了其在高解析度成像中的潛力。我們利用分光鏡配置，結合自動化掃描裝置，確保樣品均勻照明並有效提高了信噪比。初步實驗結果顯示，該系統能夠有效消除傳統反射成像中的橢圓形失真，並生成清晰的圓形衍射圖樣，這為後續的影像重建提供了可靠的數據基礎。

此外，我們的設計通過緊密的同步控制降低了掃描過程中的系統誤差，從而提高了數據收集的穩定性和一致性。系統在不同掃描條件下均能保持高精度，並且提升我們獲取資訊的效率，進而使得反射模式的疊層成像更具實用性。

目前，我們已經利用擴展疊層成像迭代引擎 (ePIE) 進行了一部分資料的相位與振幅重建，並取得了初步成果。這些結果顯示出該演算法在提升影像解析度與準確度方面的巨大潛力，未來將會對這些數據進行整理與深入分析，以提供更為完整的呈現與討論。這項工作為太赫茲成像應用提供了重要的技術支撐，提供相關領域更多的應用前景。

## 1-5. 參考資料

- [1] Lorenzo Valzania, Thomas Feurer, Peter Zolliker, and Erwin Hack, “Terahertz ptychography,” *Optics Letters.*, vol. 43, no. 3, pp. 543–546, 2018, doi : 10.1364/OL.43.000543.
- [2] Lu Rong, Chao Tang, Yuchen Zhao, Fangrui Tan, Yunxin Wang, Jie Zhao, Dayong Wang, and Marc Georges, “Continuous-wave terahertz reflective ptychography by oblique illumination,” *Optics Letters.*, vol. 45, no. 16, pp. 4412–4415, 2020, doi :

- 10.1364/OL.400506.
- [3] Chao Tang, Yuchen Zhao, Fangrui Tan, Dayong Wang, Lu Rong, “Terahertz reflective ptychography,” *SPIE Photonics Europe.*, vol. 11351, pp. 1135116, 2020, doi: 10.1117/12.2559209.
- [4] Lu Rong, Fangrui Tan, Dayong Wang, Yaya Zhang, Kunlun Li, Jie Zhao, Yunxin Wang., “High-resolution terahertz ptychography using divergent illumination and extrapolation algorithm,” *Optics and Lasers in Engineering.*, vol. 147, pp. 106729, 2021, doi: 10.1016/j.optlaseng.2021.106729
- [5] A.P. (Sander) Konijnenberg, “Lecture notes: basic optics, Fourier optics, phase retrieval,” : <https://drive.google.com/drive/folders/1C19nI8QTyyVAysR-pDcoJ27p6VQyVcPM>
- [6] B.Ferguson and X.-C.Zhang, “Materials for terahertz science and technology,” *Nat. Mater.*, vol. 1, no. 1, pp. 26–33, Sep.2002, doi: 10.1038/nmat708.
- [7] Yu-Hsin Liao, “Hybrid Input Output and Ptychographic Reconstructions of Coherent Optical Diffraction Microscopy,” National Taiwan Normal University, Master's Thesis, July.2020, doi: <https://hdl.handle.net/11296/fnxjq2>.
- [8] Yuchen Zhao, Delphine Cerica, Mohamed Boutayamou, Jacques G. Verly and Marc P. Georges, “Terahertz ptychography with efficient FOV for breast cancer tissue imaging,” *SPIE Photonics Europe.*, vol. 12136, pp. 1213608, 2022, doi: 10.1117/12.2621191.

### 三、心得感想

這次參與跨國合作計畫是我寶貴的學習與成長經歷。我很榮幸能參與教育部新南向學海築夢計畫，並有機會與澳大利亞阿德萊德大學的太赫茲工程實驗室（THz-EL）合作，接受 Withawat Withayachumnankul 教授的指導。從研究初期的線上會議，到暑假親赴阿德萊德進行為期兩個月的實驗，整個過程不僅讓我對專題研究有更深刻的理解，也讓我充分體會到跨國合作的挑戰與價值。

在研究的籌備與執行階段，我學到了如何規劃和管理一個嚴謹的研究計畫。從研究方向的確定、成像系統的設計，到數據處理流程的優化，每一項任務都充滿挑戰，但也充實了我的專業知識。特別是與指導教授和實驗室成員的定期討論，讓我受益匪淺。他們的建議幫助我克服技術問題，提升了我解決問題的能力。

加入清華大學楊尚樺教授的實驗室後，參加 Journal Club 的經驗也讓我受益良多。這些與同學和老師的深入討論，讓我在文獻閱讀和專題討論中更加自信，並幫助我在研究中找到前進的方向。

這次跨國合作的過程中，我深刻體會到團隊合作與即時溝通的重要性。雖然這是我的個人研究專題，但當我遇到困難時，澳洲的 Withawat 教授和博士生，包括 Harry、Bryce、James、Xiao Long，還有楊尚樺實驗室的教授及學長們，包括麥家銘、吳劭軒等，都熱心提供指導和建議，讓我能找到解決方法。這種跨國、跨文化的合作模式，不僅提升了研究的效率，也讓我在國際溝通和研究管理上獲得了實踐經驗，為未來的工作打下了良好基礎。