

# Terahertz Compressed Sensing Camera

## Implementation and Material Optimization

### 太赫茲壓縮感知照相機原理實現與材料優化

專業領域：光電組

組別：A98

指導教授：楊尚樺

組員姓名：林蔭澤、林佑霖、王昱淳

## Abstract

太赫茲波由於其高穿透性與非侵入性的特性，在成像應用上有著非常高的展望，因此在機場安檢與藥物檢測上都能起到非常良好的作用，不過由於其發射器與接受器成本太高的限制，無法與普通相機一樣，使用多像素（多感測器）鏡頭，於是我們使用超壓縮感知技術，完成單像素太赫茲成像系統。

為了驗證這套系統的可行性，我們一開始先以「燙金列印」進行太赫茲成像的實驗，運用太赫茲波不會穿透金屬的特性，在紙面燙上不同形狀的金箔，作為空間光調變器，得到各種不同的光圖形，配合鎖相放大器降低雜訊的影響，得到約 50 分貝的信噪比，接收器接收不同光圖形穿透樣品後的光強度，透過演算法，將樣本的圖形還原出來，實驗中，圖形的規格為 32mm × 32mm，每個像素的大小為一平方毫米。在這個系統中，成功解出清晰的圖形，解析度來到一毫米等級，理論得到驗證。

因為太赫茲成像仍有許多改善空間，我們希望從材料方面著手，透過實際測量樣品的調制深度與載子生命週期，尋求新穎材料當作空間光調變器，取代大多數使用的矽、鍺、砷化鎵。最後得到的實驗結果為聚合物的調制深度大勝傳統半導體材料，在光強度大於 12 毫瓦每平方毫米時甚至能比砷化鎵多 10% 的調制深度，並讓我們團隊以共同作者的身分在 IRMMW-THz 上發表一篇論文，對於未來空間光調變器的發展提供了全新的可能性。

## Introduction

### （一）前言

太赫茲的波長約在 400 微米左右，由於波長太長容易發生繞射，使得太赫茲在成像上的應用有其限制，因為解析度不夠，成像的樣品僅限大型結構（例如：器官）。為了突破解析度的限制，同時保有太赫茲波段良好特性，我們使用波長約為 100 微米的亞太赫茲波段開發成像系統。

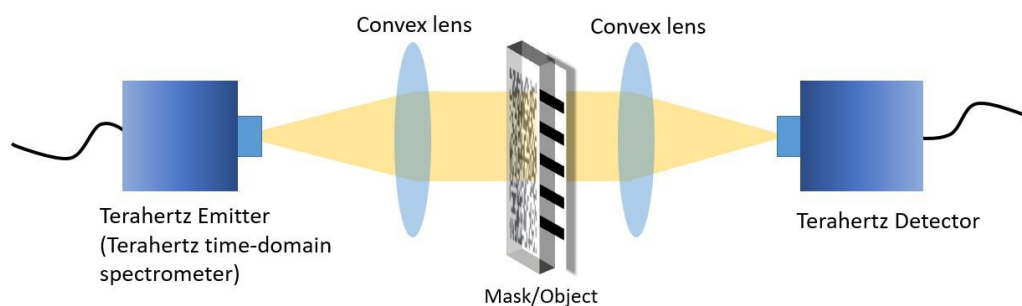
若按照傳統成像方法做成感測器陣列 (Sensor Array)，對於太赫茲波來說會使相機造價非常昂貴，因此使用感測器陣列並不夠實際。取而代之，我們「僅使用一個太赫茲感測器」取代感測器陣列。為了降低單個太赫茲感測器採樣的時間，我們使用壓縮感知的技術 (Compressed Sensing)，透過降低採樣率，減少採樣的次數，並透過演算法加以輔助使最後成像品質能夠在容許範圍內

太赫茲壓縮感知相機的實際架設主要可以分成四個部分，分別是太赫茲發射器、待測物體、結構圖案模片、太赫茲接受器。在實際進行實驗的過程中，需要更換多組結構模片並利用太赫茲接收器取值，而理論上最理想的採樣次數需要與待測物體的像素點數相同，然而，受惠於壓縮感知的原理，實際上我們只需要進行不到 50% 的採樣次數便能將待測物體的圖片還原。

## (二) 系統分析

在我們的實驗中，待測物體在設計上總像素點為  $32 \times 32 = 1024$ ，而每個像素點的大小為  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$  因為太赫茲的波長大概在  $0.1\text{mm}$  至  $1\text{mm}$  之間，所以我們的實驗目標是希望能接近太赫茲成像的極限，也就是做到  $1\text{mm}$  左右的解析度。並且，在結構模片的設計上我們採用的是隨機伯努力矩陣，也就是每格以 50% 的機率隨機生成 0 或 1 的二元矩陣。

我們建立的第一個系統是手換模片系統，利用手動更換的方式達到結構模片的變換，其架構如圖一所示。

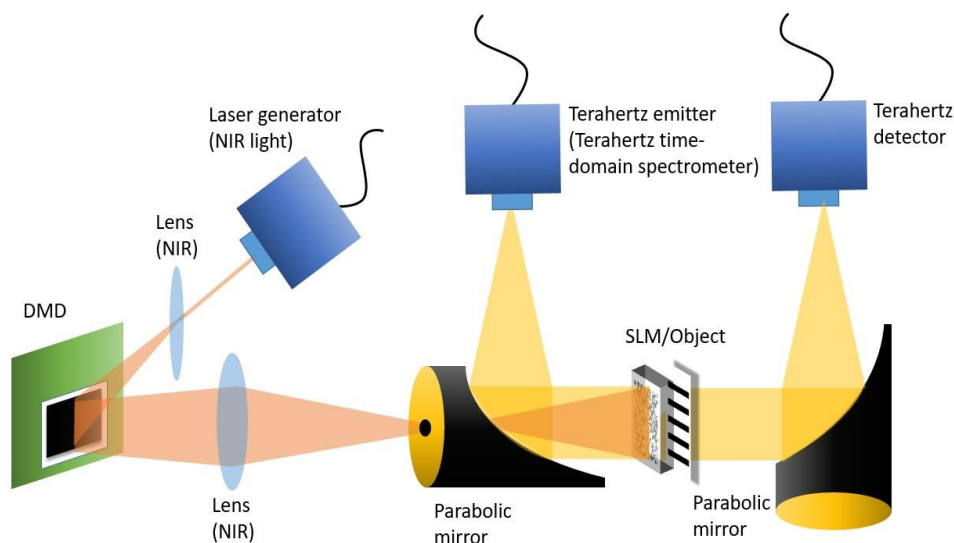


圖一 太赫茲壓縮感知照相機手換模片系統實際架設圖

此一系統的主要意義在於，我們驗證了壓縮感知在太赫茲波段上的可行性，並且以相當低金錢成本的方式進行了實現，然而此一系統存在時間過長與人為置換模片誤差的兩個缺點，因此我們對其進行優化，並架設了第二套系統。

第二套系統架設如圖二所示，這裡我們利用 DMD (Digital Micro-mirror Device) 及 SLM (Spatial Light Modulator) 實現了結構模片的變換，這個系統的優勢在於 DMD

擁有極快的變換圖案頻率（理想上為 32kfps），因此得以大大地縮短還原一張圖片所需的時間，同時也完全不會有任何人為進行實驗的誤差。



圖二 太赫茲壓縮感知照相機 DMD-SLM 系統實際架設圖（利用拋物面鏡優化）

另外，為了使得太赫茲相機擁有更好的解圖品質，我們也對 SLM 的材料選擇進行研究，有別於過往大部分利用半導體如 Ge、Si 為材質的空間光調變器（Spatial Light Modulator），我們對於聚合物進行了調制深度（Modulation Depth）及載子生命週期（Carrier Lifetime）的量測，這兩項參數為影響 SLM 品質的主要變因。

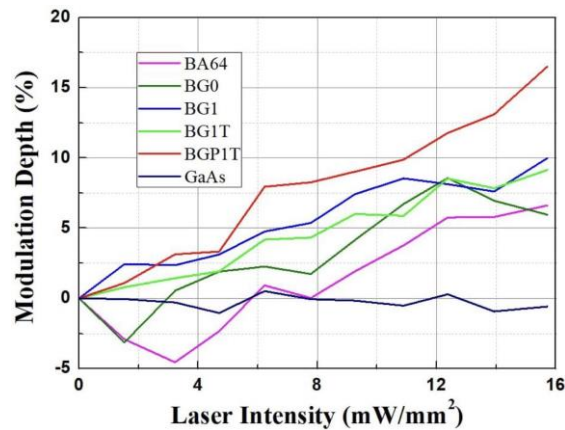
### （三）實驗結果

表一 OMP 演算法下不同稀疏性之重建圖形

稀疏性	原圖	5	10	20
SSIM	-	0.55	0.33	0.28

由表一的結果可以驗證我們成功以極低成本，完成太赫茲成像系統一維圖形的重建，在稀疏性為 20 的情況下，雖然圖片看起來有點模糊，不過還是可以辨別出直線，由此推測，若想重建較為複雜的圖形，提高稀疏性理應能還原出不錯的圖形，而且在這個系統中，我們是以人工手換模片，如果改以 DMD 控制並實際操作，就可以避免人為沒對準的誤差，使成像品質更好且更穩定。

圖三與表二分別為聚合物的調制深度及載子生命週期的量測結果，從結果來看聚合物在兩像參數的表現都相當不錯，很適合做為未來 SLM 進行優化的材料選擇之一。



圖三 調制深度量測實驗結果

表二 載子生命週期量測結果

樣品	載子生命週期 (ns)
BA64	4.996
BG0	5.046
BG1	5.139
BG1T	4.577
BGP1T	4.527

## 心得感想

從去年暑假開始，我們便在實驗室裡面花費了大量時間，同時也在暑假期間修習光電實驗來熟悉光路架設，這些努力不僅是為了熟悉自己專題的原理以及操作方式，同樣也是為了跟教授以及實驗室的學長姐學習更多做科學研究的經驗。對我們來說，在實驗室的生活與平常課業上的學習有著天壤之別，在每周進行的團體會議裡面，我們有時需要以英文的方式進行論文報告及分析，在理解論文及內化的過程中需要做到實事求是的精神，不像以前課業上有許多時候可能會囫圇吞棗地吸收知識，因為在實驗過程中所有的步驟必須是相當確定的才能扎實地繼續往前做。一路上碰到的許多問題，也不像平常請教同學或教授就能得到正確解答，而是必須自己去搜尋資料並進行驗證，更多的知識必須靠自己的努力才能得到回報。

在這一年中，也相當感謝所有人在這一年的幫忙包括學長姐以及教授，使得我們從剛進來時對所有事物都一知半解，到後來也能自己獨立操作實驗並且對其進行分析與問題解決。我們提前體驗了進入實驗室的日子，雖然不完全等同於研究所的生活，但確實讓我們更了解研究所的樣子並讓自己以後大學畢業後更清楚該如何選擇。

透過進行專題研究，有別於平時課業上知識的學習，我們學到更多的是做研究上的方法及技巧，還有對於在一個實驗上該如何處理問題及時間安排，使我們這一年的選修專題收穫良多。