

以釐米級金屬結構探討 兆赫茲時域頻譜訊號之波形重整

Study on Reshaping Waveforms of THz Time-Domain Spectroscopy with Millimeter Metal Devices

張鮮文、王太伸、翁俊仁、白世璽

Shian-Wen Chang, Tai-Shen Wang, Chun-Jen Weng, Shyh-Shii Pai

本實驗於兆赫茲時域頻譜量測系統上，以釐米級之金屬元件重整兆赫茲電磁輻射波形。本研究利用不同直徑的金屬圓孔與圓擋板、金屬刀片以及細銅線，分別將各金屬元件置放於大孔徑光導天線後方進行實驗量測，觀察兆赫茲電磁輻射波形變化之現象。從不同直徑的金屬圓孔實驗結果得知，當圓孔直徑為 2 mm 時強度比值約為 1，但圓孔直徑大於 2 mm 時低頻與高頻的強度比值會大於 1，而直徑越大的圓擋板則會增加低頻與高頻的強度比值。金屬刀片實驗結果顯示當發射器的遮蔽面積越大時高頻訊號會有明顯的衰弱，因此由以上實驗結果得知超快雷射照射於大孔徑光導天線時，其中央處分布為較高頻的兆赫茲輻射波。依據以上的實驗結果，我們嘗試以實驗方式作出一個能波形重整且有兆赫茲輻射波高穿透率之細銅線元件結構，並針對細銅線元件的排列方向，作 0° 與 90° 之量測， 90° 的實驗結果與原參考波形相似，但在 0° 時元件結構對於 0.8 THz 以下的兆赫茲輻射波有衰弱之現象，頻率越低衰減越大，而高於 0.8 THz 時就有著近似於 1 的穿透率，其類似於高通濾波器之特性。此金屬結構元件具有高頻兆赫茲輻射波的高穿透率，並相對於原參考波形有較寬的半高寬，因此將此元件應用於兆赫茲時域頻譜技術上，可增加量測系統的應用性與獲得更多的資訊。

This study employs the technique of terahertz (THz) time-domain spectroscopy (TDS) and the emitter is a large-aperture photoconductive antenna. We use millimeter dimensional metal devices to realize the spatial distribution of radiation frequency from THz wave emitter and the transmittance of THz wave depended on the orientation of the polarizing device. The amplitude ratio of 0.2 THz to 0.8 THz increases with the diameter of metal hole and the blocking area with the circular metal plate. In the knife-edge experiment, the high frequency (0.6 THz) peak drop rapidly as covering the center area. Thus the low frequency component is dominant for the emitter and the intensity of high frequency component substantially reduces with the divergence angle. The polarizing device is composed of several commercial copper wires to collocate above a metal hole. THz wave propagates through the polarizing device without significant power loss when the orientation of wires perpendicular to the polarization of THz wave. For the parallel case, the polarizing device exhibits the characteristic of a high-pass filter. The transmittance increases with frequency below 0.8 THz and closes to 1 over 0.8 THz. Therefore, the polarizing devices can reshape the THz waveform and provide a convenient means to manipulate the resonance features of THz wave.

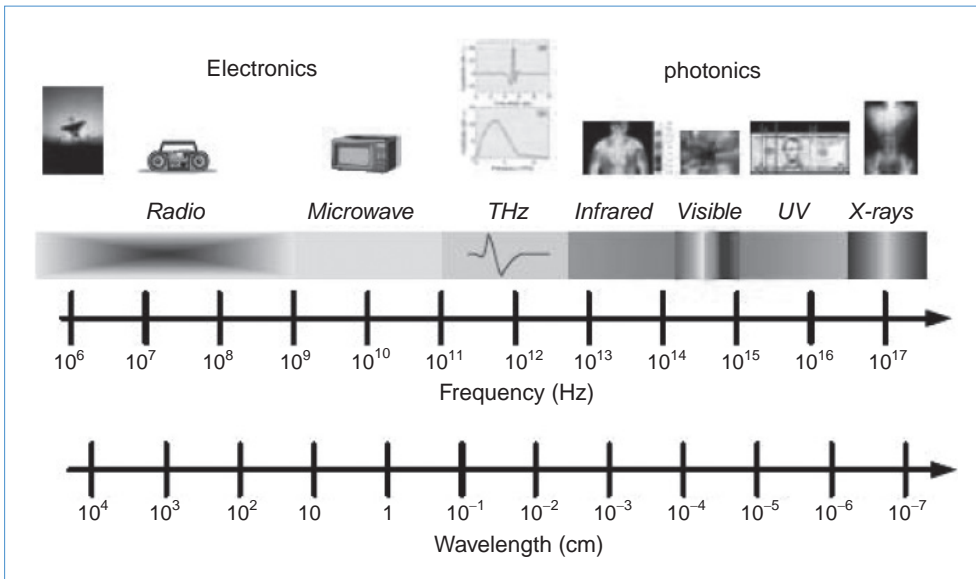


圖 1. 兆赫茲波段示意圖。

一、前言

兆赫茲 (terahertz) 簡寫為 THz ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$)，兆赫茲技術乃由於近二十年來超快雷射技術的迅速發展而新興的一個研究領域，本領域涉及電磁學、光電子學、光學、半導體物理學、材料科學及微細加工等跨領域之整合科學，並在醫學、生物學、天文學、環境科學、資訊科學等方面具有重要的應用前景。兆赫茲頻率是介於紅外與微波之間的一個頻率波段，如圖 1 所示，其頻率分布範圍包含部分毫米波段 (~100 GHz) 到遠紅外波段 (~25 THz) 的一段電磁頻譜。從波長的角度來看，因為其波長較毫米短 (1 THz 換算為波長約 0.3 mm)，因此兆赫茲波又可稱為次毫米波 (sub-millimeter wave)⁽¹⁻³⁾。長期以來，由於缺乏有效的兆赫茲激發和檢測方法，人們對於該波段電磁輻射性質的瞭解非常有限，以致於該波段被稱為電磁頻譜中的兆赫茲空隙 (THz gap)。

80 年代以後，短脈衝雷射光源取得容易，促使超快雷射技術加速發展，再加上電子技術、光電元件與通訊科技的進步，為兆赫茲脈衝的產生提供穩定、可靠的激發光源，使兆赫茲輻射的物理機制、檢測技術和應用研究得以蓬勃發展。兆赫茲技術之所以引起人們廣泛的關注，是由於物質的兆赫茲頻譜 (反射與穿透) 包含豐富的物理與化

學資訊，因此在凝態物理的研究中，兆赫茲波段是一個非常重要的頻譜。在兆赫茲波段中，包含許多決定材料特性的重要能階，如半導體中的受體 (acceptor)、施體 (donor) 及光激子 (exciton) 等之束縛能，光聲子 (optical phonon)、超導能隙及磁場作用下 Landau 能譜等，也都落在這一波段範圍中⁽⁴⁾。

在科學發展史上，Tinkham 等人使用 FTIR (Fourier transform infrared spectroscopy) 技術分析超導體在遠紅外波段的導電率，是直接證實 BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer) 理論的最重要實驗證據之一⁽⁵⁾，可見兆赫茲波段在科學應用上的重要性。其他如電子-聲子散射、各種穿隧機制，在能量尺度上，大都與兆赫茲波區域重疊。又由於兆赫茲波段中包含了大多數分子轉動 (molecular rotation) 或振動 (vibration) 能階，因此兆赫茲輻射波在物體成像、環境監測、醫學影像、無線電天文、寬頻移動通訊、遙測，甚至是在衛星通訊和軍用雷達上之用途等方面，具有重大的科學價值和廣闊的應用前景⁽⁶⁻⁷⁾。

兆赫茲輻射波可運用於兆赫茲時域頻譜技術 (THz time-domain spectroscopy, THz-TDS)，它是於 1980 年代中期由貝爾實驗室與 IBM 華生 (Watson) 實驗室所發展起來的研究技術⁽⁸⁻⁹⁾。它利用物質對兆赫茲頻譜的不同特徵吸收譜線，分析研究物質成分、結構及其相互作用關係。通常有機分子內

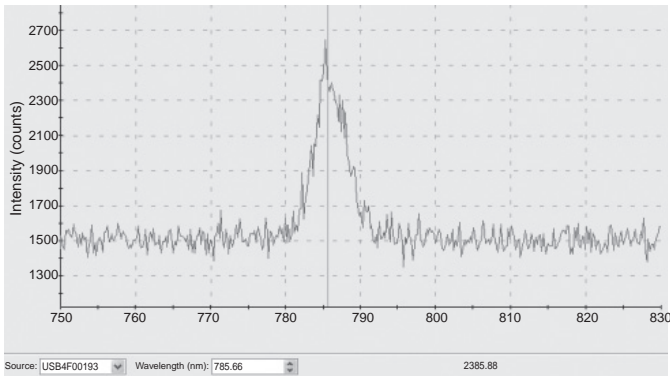


圖 2. 以 Ocean Optics 光譜儀觀察超快脈衝雷射波長之分布。

化學鍵的振動吸收頻率，主要在一般紅外波段，但對於分子之間弱的交互作用及大分子的骨架振動 (skeletal vibration)、偶極子的旋轉和振動躍遷 (vibrational transition) 以及晶體中晶格的低頻振動吸收頻率，則對應於兆赫茲遠紅外波段範圍。這些振動所反映的分子結構及相關環境資訊都在兆赫茲波段內，吸收頻率及吸收強度上有明顯的區別，形成特殊的有機分子光譜特徵，這使得兆赫茲時域頻譜技術具有鑒別化合物結構與環境狀態的能力。且兆赫茲時域頻譜技術可量測材料在兆赫茲頻段的各種物理、光學特性、介電係數和吸收係數等。

兆赫茲時域頻譜技術具有以下特點：

- (1) 兆赫茲時域電場波形，包含了兆赫茲脈衝的振幅、時間等豐富的資訊，利用傅立葉轉換後可同時得到量測樣品在兆赫茲波段的吸收頻譜和色散頻譜，進而得到分子間非共價鍵相互作用的資訊。
- (2) 以超快雷射所激發之兆赫茲波脈衝峰值功率很高，且由於超快雷射脈衝寬度屬飛秒 (femtosecond) 級，因此可探測飛秒數量級之躍遷變化，此外其訊雜比 (signal to noise ratio) 也遠優於利用熱輻射的遠紅外光譜儀 (FTIR)。
- (3) 兆赫茲時域頻譜具時間解析和頻譜連續性，使得它具有一些獨特的應用，如高溫材料處理過程的頻譜變化及非線性兆赫茲發射頻譜。
- (4) 兆赫茲時域頻譜技術是一種非接觸測量技術，同時兆赫茲輻射波亦具有較寬的頻譜特性，能夠對半導體、介電質薄膜及固態材料的物理特性進行準確的測量⁽¹⁰⁾。

兆赫茲時域頻譜技術之時域電場波形，經由傅立葉轉換後可得到振幅、相位及兆赫茲頻段之資訊，而頻寬越寬的兆赫茲頻譜可得到較多的資訊，所以如何獲得更寬頻的兆赫茲頻譜，或是分段取得不同頻率下之頻譜資訊，為目前重要的研究課題。本實驗使用釐米級的金屬元件結構，應用於兆赫茲時域頻譜量測技術，以大孔徑光導天線 (large-aperture photoconducting antenna) 為發射器 (emitter)，透過本實驗之金屬元件結構後可得到不同的兆赫茲時域電場波形與兆赫茲頻譜範圍，增加樣品量測較多的資訊。本金屬元件結構為釐米級之尺寸，因此有著容易製造與方便操作之優點，且本金屬元件在訊號波形重整後有著高的訊號穿透率，因此在進行量測樣品之穿透或反射量測時還能保持高訊雜比。

二、實驗設備與系統架設

本研究使用超快雷射系統作為激發光源聚焦至大孔徑光導天線而產生兆赫茲輻射波，雷射光源為 Spectra-Physics 公司之鈦：藍寶石鎖模雷射系統 (型號為 Tsunami)，由 5 瓦的二極體雷射 Millennia 作為幫浦雷射 (pump laser)。此一超快雷射系統之中心波長為 785 nm，脈衝寬度 100 fs，平均功率 600 mW，經換算瞬間峰值功率可達 75 kW，重複頻率 (repetition rate) 則為 80 MHz。為了即時監控超快雷射光源的波長與頻寬，我們架設了一組監控系統，包含一組 Ocean Optics 光譜儀及光柵，並搭配 CCD 之取像裝置，分別觀察超快雷射光源的頻寬及光斑分布，並由螢幕即時顯示。透過光譜儀的量測其光譜分布如圖 2 所示，目前此一超快雷射系統半高頻寬 (FWHM) 為 7 nm。

1. 大孔徑光導天線

本實驗使用大孔徑光導天線來產生兆赫茲輻射波，基板為半導體材料砷化鎵 (GaAs)，利用半導體微影蝕刻技術 (lithographical technique) 在砷化鎵表面製作出兩道厚度約 500 nm 的平行金鍍電極，中間的光導間隙為 500 μm ，並在兩個電極上使用焊錫連接金屬導線，其結構如圖 3 所示，且連接至電源供應器，提供一個 120 V 直流電壓於大孔徑光

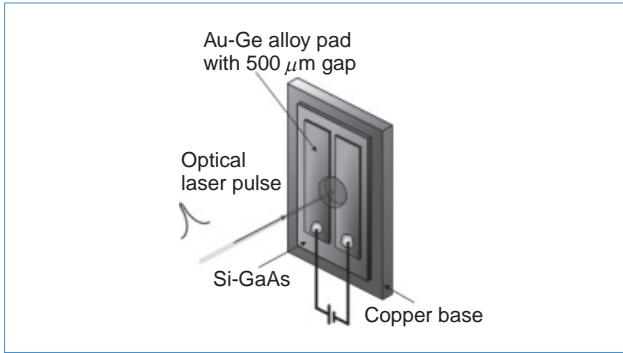


圖 3. 大孔徑光導天線之示意圖。

導天線上，可激發出兆赫茲輻射波。為了增加大孔徑光導天線的散熱效果，所以將大孔徑光導天線用 N-grease 黏貼固定於銅塊上，銅塊上鑽有一個 5 mm 的圓孔，讓兆赫茲電磁輻射波通過。

2. 兆赫茲時域頻譜技術量測系統

本研究之量測系統架設如圖 4 所示，超快雷射光源由 Tsunami 發出，經過一個薄膜分光鏡 (pellicle beamsplitter) 將超快雷射光源分為激發光束 (pump beam) 和探測光束 (probe beam) 兩道光束，激發光束會經過一對相互垂直的反射鏡組，此反射鏡組裝置於由步進馬達 (stepping motor) 所驅動的單軸移動平台上，步進馬達經由 GPIB 連線至電腦，利用電腦控制步進馬達的作動，進而控制產生兆赫茲輻

射波的激發光束和探測光束之光程差。

實驗時設定步進馬達每一步移動的距離為 2 μm ，但因為激發光束經過一對反射鏡組，因此步進馬達每作動一步激發光束的光程將會延遲 4 μm ，換算約為 13.33 fs 的延遲時間。激發光束經延遲反射鏡組之後透過焦長為 60 公分的透鏡聚焦，再經過光遮斷器 (optical chopper)，由光遮斷器週期性地遮斷激發光束並把此遮斷的頻率傳送給鎖相放大器 (lock-in amplifier) 作為參考信號 (reference signal)，以便後續訊號之擷取。通過光遮斷器後的激發光束將聚焦在大孔徑光導天線之發射器 (emitter) 上，發射器經由光電流瞬間變化而輻射出兆赫茲輻射波，透過兩對拋物面鏡組將兆赫茲輻射波聚焦在碲化鋅電光晶體 (EO crystal) 之接收器 (receiver) 上，以便進行電光取樣 (EO sampling) 的訊號量測。

3. 電光取樣

電光取樣所使用基本機制即為線性電光效應，又稱 Pockels effect。此效應可簡單地解釋為光學晶體的折射率與構成晶體原子、分子之晶格排列、電荷分布以及外加電場的相互作用性質有關。本實驗使用碲化鋅 (ZnTe) 作為偵測兆赫茲輻射波的光學晶體，而碲化鋅屬於高對稱性立方晶系的 (cubic) 的結構，利用其線性電光係數與電光調制架構下

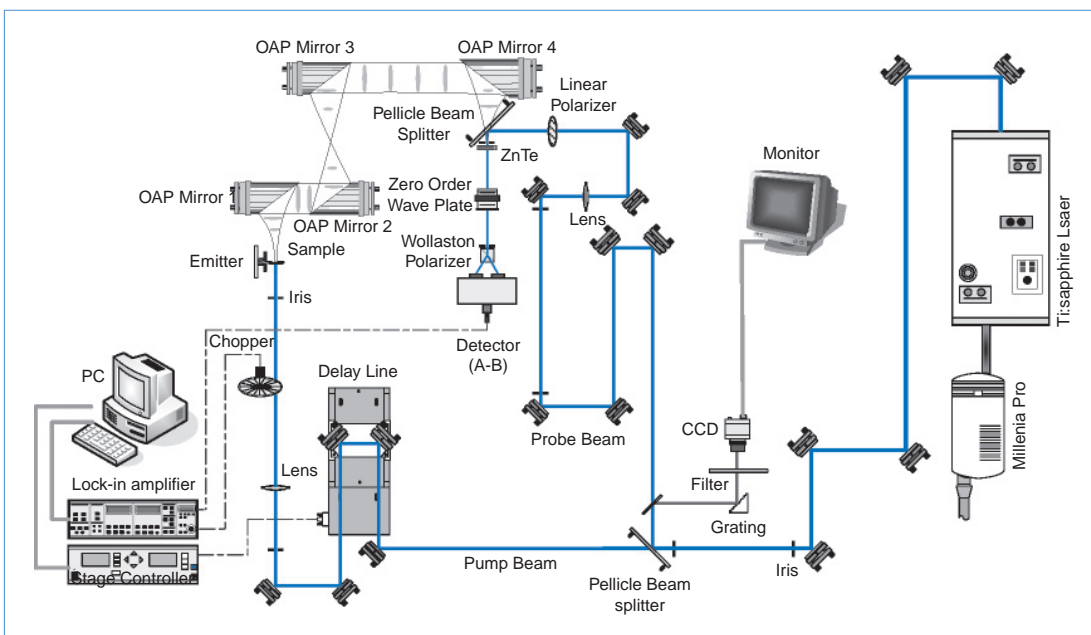


圖 4. 兆赫茲時域頻譜實驗系統架設圖。

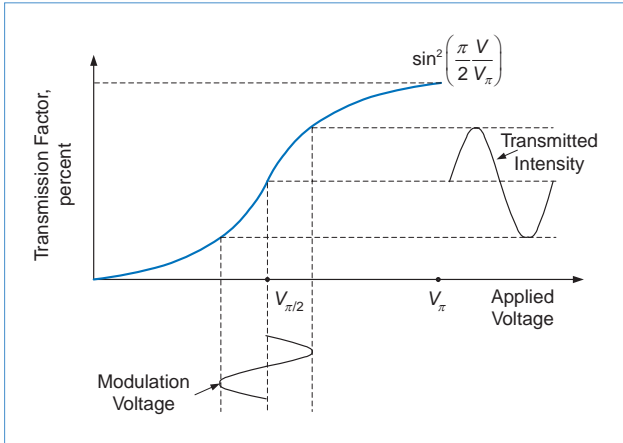


圖 5. 電光晶體之光穿透率與外加電壓關係。

Jones 矩陣可計算得到出射的光強度與相位延遲之關係如下：

$$I_{\text{out}} = |E_{\text{out}}|^2 = \sin^2 \frac{\Gamma}{2} = \sin^2 \left(\frac{\pi V}{2 V_{\pi}} \right)$$

I 為光強度、 E 為電場強度、 Γ 為相位延遲、 V 為外加電壓、 V_{π} 為半波電壓 (half-wave voltage)⁽¹¹⁾。

上式計算作圖，如圖 5 所示，可以得知光的穿透強度與外加電壓的關係，其穿透率與外加電壓的關係呈現非線性之關係，假如沒有選擇適當的工作點，就會使得調制光強度發生變化。由圖可發現在 $V_{\pi/2}$ 處附近的曲線近似直線，只要外加電壓幅度不大，相對應的透射光強度與外加電壓關係呈線性關係。並且在 $V_{\pi/2}$ 點上其斜率為圖形中最大處，表示訊號在此區段的敏感度最高。

為了得到 $\pi/2$ 的相位延遲所需的電壓稱為四分之一波電壓，加入的方法有兩種。一種為加上直流偏壓，使工作點直接移至 $V_{\pi/2}$ 處，這種方法的缺點是必須通上極高的電壓，且高壓產生的溫度影響，會使得工作點容易漂移，所以本實驗不採用此方法，而是使用另一種方法，見圖 4 之光路圖，就是在光路上加入一片補償器 (compensator)，此補償器為四分之一波板 (quarter-wave plate)，利用它可以產生固定的 $\pi/2$ 的相位延遲，達到靈敏度最高之目的⁽¹²⁾。

訊號的檢測為探測光束經過偏振片 (polarizer)

後再經由薄膜分光鏡的反射到達接收器，此時探測光束經過碲化鋅接收器感受到兆赫茲輻射波的電場對碲化鋅的改變，再經過上述作用之四分之一波板與一個極化分光鏡 (Wollaston polarization beamsplitter) 將探測光束分成兩道不同極化的光束，由一對光偵測器 (detector) 接收。由於薄膜分光鏡的厚度小於 0.2 mm，因此薄膜分光鏡是使探測光束可以反射到接收器又不致使兆赫茲輻射波經過分光鏡後而產生太大之衰減及色散⁽¹³⁾。

在接收器還沒受兆赫茲輻射波電場影響時，探測光束通過接收器其偏振方向將不會受到改變，若經過四分之一波板，會使得探測光束的偏振由線性偏振轉為圓形偏振；而若兆赫茲輻射波的電場對接收器作用時，由於接收器在不同軸向的折射率產生了變化，造成探測光束偏振受到了改變，經過四分之一波板後，此時的探測光束變成了橢圓偏振。透過極化分光鏡將探測光束的偏振分成水平與垂直方向，此兩種方向的信號分別被光二極體擷取，利用減法電路將兩個訊號相減後送至鎖相放大器。若是沒有受到兆赫茲輻射波變化的電光晶體，探測光束通過後四分之一波板後，垂直與水平的電場分量是相同的，所以訊號相減為零。反之，若訊號相減非零，表示此時電光晶體受到兆赫茲輻射波電場之影響，此即為兆赫茲輻射波之訊號⁽¹⁴⁾。

4. 量測實驗之元件與裝置

本研究主要分為三組實驗，分別將三種不同之金屬元件安置於大孔徑光導天線發射器之後，探討兆赫茲輻射波經過元件後，相對於參考波形 (不經過金屬元件) 所得到之不同時域與頻域波形。第一組實驗使用厚度 2 mm 的金屬片，材質為金屬合金，在金屬片上加工各種不同直徑的圓孔以及金屬圓擋板，將其放置於發射器後方 4.5 mm 位置進行量測，如圖 4 中的 Sample 處。接著第二組使用金屬刀片，同樣放置於發射器後方 4.5 mm 處作刀口法之實驗，最後第三組實驗，利用直徑為 0.14 mm 的細銅線固定於鑽有直徑 4 mm 圓孔的銅塊上，每一條細銅線的間格為 0.21 mm，同樣放置於發射器後方 4.5 mm 處進行量測，如圖 6 所示。第三組實驗並針對細銅線元件方向作水平與垂直角度的實驗

量測。在放置金屬片或固定細銅線的圓孔銅塊時需注意圓孔中心與超快雷射的激發光束必須同心，方能進行量測實驗，因為我們要確保兆赫茲輻射波的傳播路徑通過量測樣品的中心。

三、實驗結果與討論

本實驗使用兆赫茲時域頻譜技術量測不同金屬元件之時域電場波形，相對於不經過金屬元件之參考波形作波形變化實驗，並探討由傅立葉轉換獲得的兩者頻譜波形之相對差異，以下各小節將作詳細討論。

1. 不同直徑之圓孔與圓擋板

第一組實驗使用厚度 2 mm 的金屬片，在金屬片上加工各種不同直徑的圓孔和圓擋板，圓孔直徑分別為 2 mm、4 mm、8 mm、10 mm，量測結果之時域與頻域圖如圖 7 所示。由圖 7(b) 頻域圖觀察得知，當圓孔直徑大於 2 mm 時低頻 (0.2 THz) 與高頻 (0.8 THz) 的強度比值會大於 1，但圓孔直徑為 2 mm 時低頻與高頻的強度比值就約為 1，所以較小的圓孔直徑會有減弱低頻峰值之現象。此現象亦說明了當脈衝雷射光照射於大孔徑光導天線時，越靠近大孔徑光導天線的中央部位是分布出高頻的兆赫茲輻射波，相對地遠離中央處則是分布出低頻的兆赫茲輻射波，因此當圓孔直徑越小時所能穿過的低頻兆赫茲輻射波也就相對減少，其隨著圓孔直徑變小而衰減。

為了驗證上述之現象，我們使用直徑為 2 mm、4 mm 之圓擋板進行同樣的量測實驗，量測結果

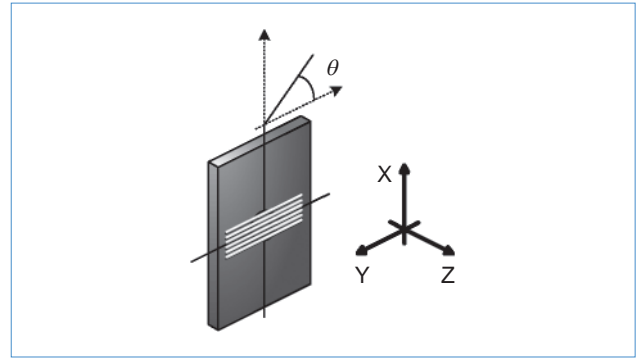


圖 6. 細銅線之設置示意圖。

如圖 8 所示。一樣比對低頻 (0.2 THz) 與高頻 (0.8 THz) 之強度比，2 mm 的圓擋片強度比約為 3，而直徑 4 mm 之圓擋板強度比約為 8，由此可知道高頻峰值有明顯的衰弱。此圓擋板實驗再次驗證了金屬圓孔的實驗結果，圓擋板會遮蔽了大孔徑光導天線中央部位的高頻兆赫茲輻射波，而讓外圍的低頻兆赫茲輻射波通過。

2. 刀口法之量測結果

前一小節金屬元件的實驗結果告訴我們超快雷射光照射在大孔徑光導天線發射器時，會因為發射器區域的不同而激發出不同頻率的兆赫茲輻射波，接下來我們使用刀口法的方式作第二組實驗。利用金屬刀片將大孔徑光導天線發射器後方直徑 5 mm 的圓孔遮住一半的圓孔面積，逐漸增加遮蔽的圓孔面積，直到完全遮住直徑 5 mm 的圓孔，其量測結果之頻域圖如圖 9 所示，由圖中可觀察到隨著遮蔽面積的增加，高頻的兆赫茲輻射波會有減弱的趨勢。我們再將量測結果作歸一化 (normalization)，

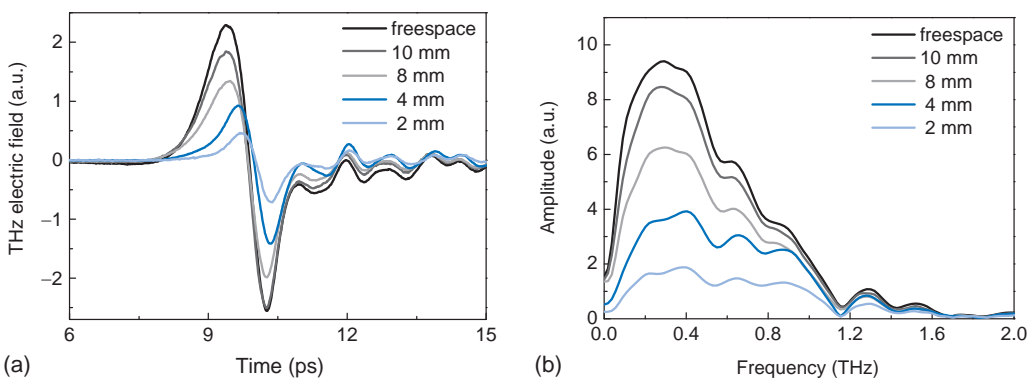
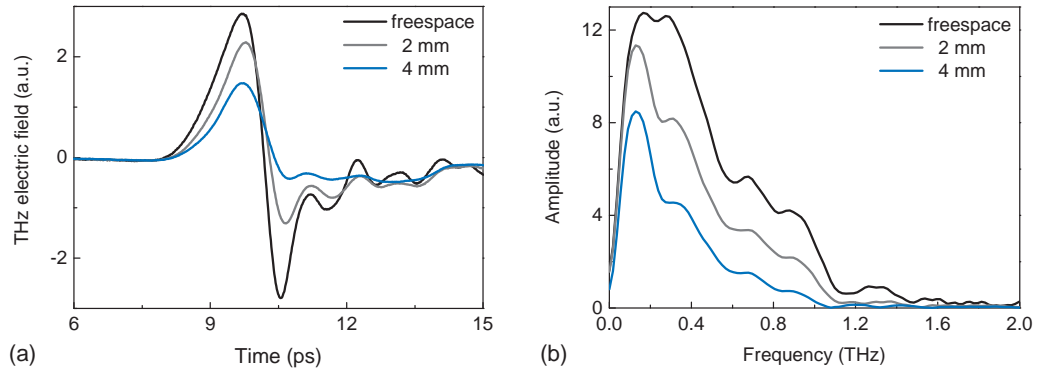


圖 7. (a) 不同圓孔直徑之兆赫茲時域圖，(b) 不同圓孔直徑之兆赫茲頻域圖。

圖 8.

(a) 不同直徑之圓擋板兆赫茲時域圖，(b) 不同直徑之圓擋板兆赫茲頻域圖。



如圖 10 所示，在圖中標示出三個峰值位置，由峰值 1 (0.2 THz) 相對於峰值 3 (0.6 THz) 的結果可得知峰值 1 的高頻訊號減少趨勢較為明顯，此結果再次驗證大孔徑光導天線發射器外圍區域是激發出低頻的兆赫茲輻射波訊號。

經由以上的實驗得知激發兆赫茲輻射波大孔徑光導天線的輻射頻寬特性後，我們希望以實驗方式製作出一個元件結構能有效控制兆赫茲頻譜，並且具有高穿透率，而平行排列的細銅線元件結構能有如此的效果。細銅線元件結構，如圖 6 所示，實驗結果在下一節作討論。

3. 細銅線元件結構之實驗結果

細銅線元件結構的設計想法是依據先前的實驗結果，利用細銅線改變不同的高低頻兆赫茲輻射波，達到改變頻寬與波形重整的功能，此元件結構類似於金屬光柵偏振器 (wire-grid polarizer)⁽¹⁵⁾，所

以此組的實驗設計針對細銅線元件結構不同的排列方向 ($\theta = 0^\circ$ 與 $\theta = 90^\circ$) 作量測實驗，結果如圖 11 所示。此組的參考波形 (Ref) 為通過直徑 4 mm 圓孔的兆赫茲輻射波波波形，在圖 11(b) 頻譜圖中，細銅線元件結構 $\theta = 90^\circ$ 的振幅 (amplitude) 波形與參考波形很相似，無明顯的波形變化，此現象與金屬光柵偏振器有相同的特性，當電磁波偏振方向與金屬光柵偏振器垂直時即有電磁波的穿透現象，由此間接得知，大孔徑光導天線激發出的兆赫茲輻射波之偏振方向為平行於光學桌平面的方向，其亦與大孔徑光導天線外加電場方向相同。從細銅線元件結構 $\theta = 0^\circ$ 的實驗結果顯示，此元件結構對於低頻的兆赫茲輻射波有衰減的現象，由圖 11(b) 觀察得知原本參考波形的峰值為 0.31 THz，經過此元件波峰向後移位變成 0.57 THz，且頻率波形的頻寬 (半高寬) 大約比原本的參考波形增加了 0.31 THz 之頻寬。

透過傅立葉轉換之頻譜資訊，並相對於直徑 4

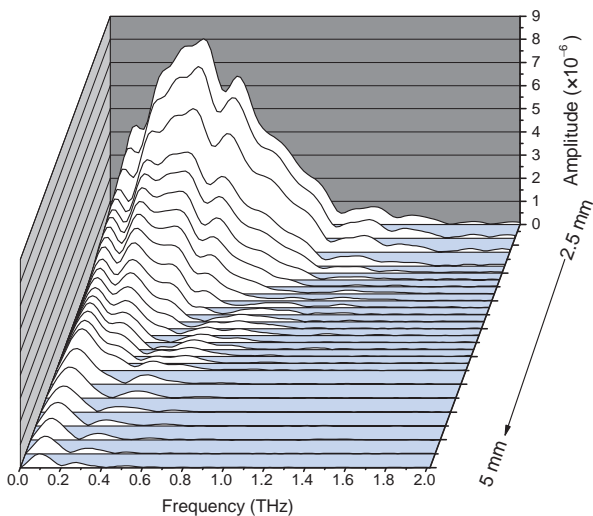


圖 9. 刀口法量測之頻域圖。

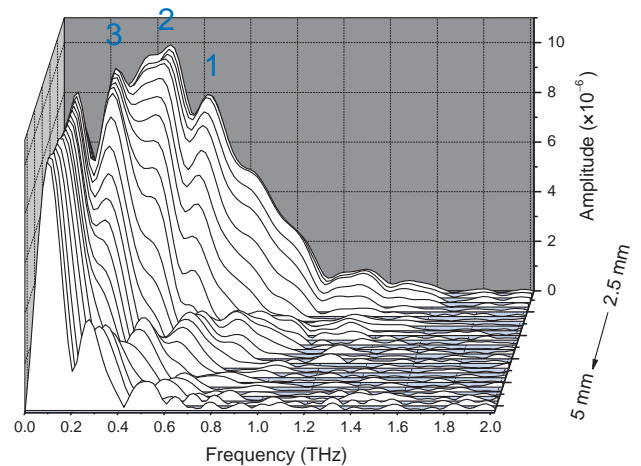


圖 10. 刀口法量測結果歸一化後之頻域圖。

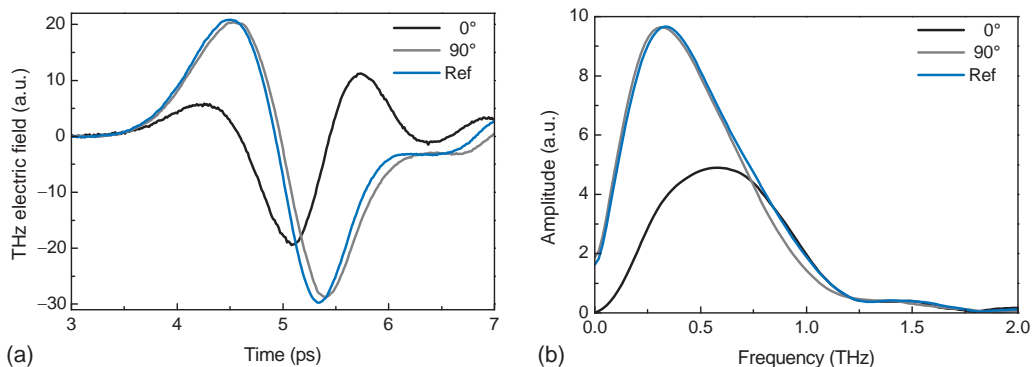


圖 11.
(a) 細銅線元件結構之兆赫茲時域圖，(b) 細銅線元件結構之兆赫茲頻域圖。

mm 之參考波形可計算出元件結構的穿透率，公式為⁽¹⁶⁾

$$T_M(\nu) = \frac{|E_{\text{THz}}(\nu)|}{|E_{\text{ref}}(\nu)|}$$

而其細銅線元件結構之穿透率計算公式為 $T_p(V) = |T_M(V)|^2$ ，計算結果如圖 12 所示，計算範圍是圖 11(b) 中的 0.1 至 1.2 THz 之頻譜範圍。由圖 12 中 $\theta = 0^\circ$ 的結果顯示當頻率高於 0.8 THz 時穿透率才有近似於 1 之結果，而 0.1 至 0.8 THz 的穿透率近似於線性的成長趨勢。 $\theta = 0^\circ$ 時，當小於 0.8 THz 穿透率近似於 1，顯示大部分的兆赫茲輻射波都穿過細銅線元件結構，但是在 0.8 至 1.17 THz 的穿透率卻明顯降低，穿透率最多降至 0.6 左右，此結果我們推測可能是數學計算上或是實驗上所造成的。在數學計算上，我們對時域作傅立葉轉換時所選取的範圍是一樣的，但是在圖 11(a) 中可以明顯觀察出， $\theta = 90^\circ$ 的時域訊號相對於參考波形有時間延遲的現象，所以作傅立葉轉換時會有差異，而這差異導致了穿透率在高頻處無法近似於 1。另一個原因推測可能是本實驗在固定細銅線時是使用人工的方式，所以在固定時可能因為細銅線的間距無法固定得很準確，因此造成了此結果，往後的研究會再驗證此推測是否正確。

細銅線元件結構於 $\theta = 0^\circ$ 時類似於一個高通濾波器 (high pass filter)，它讓高頻的兆赫茲輻射波通過，除了高穿透率外又有較寬的波形頻寬，這在兆赫茲時域頻譜技術量測系統上可提供樣品量測時更多的量測資訊，增加兆赫茲頻譜技術的應用性。

四、結論

本實驗在兆赫茲時域頻譜技術量測系統上，對於大孔徑光導天線進行兆赫茲輻射波之波形重整實驗，從第一組圓孔與圓擋板實驗結果得知當脈衝雷射光照射於大孔徑光導天線時，越靠近大孔徑光導天線的中央部位是分布出高頻的兆赫茲輻射波，相對的遠離中央部位則是分布出低頻兆赫茲輻射波。

由第二組刀口法之實驗結果得知，隨著遮蔽面積的增加，可明顯觀察到高頻的兆赫茲輻射波之減少，此結果再次驗證第一組的實驗結果。

最後一組是細銅線元件結構之量測實驗，並改變細銅線不同的排列方向，於 $\theta = 90^\circ$ 時頻域圖中的波形與參考波形很相似，無明顯的波形變化，並有兆赫茲輻射波高穿透率。 $\theta = 0^\circ$ 的實驗結果顯示，細銅線元件結構對於低頻的兆赫茲輻射波有衰弱的現象，原本參考波形的頻率峰值為 0.31 THz，經過此元件波峰向後移位變成 0.57 THz，但是高頻

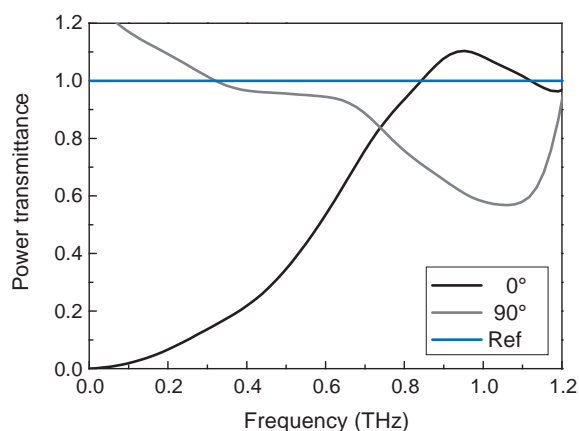


圖 12. 細銅線元件結構之穿透率圖。

部分依舊保持高穿透率，在穿透率的計算結果顯示當頻率高於 0.8 THz 時穿透率才會近似於 1。

本實驗的細銅線元件結構能有效改變兆赫茲輻射波之波形，在 $\theta = 0^\circ$ 時有高通濾波器的特性，以及具有高穿透率與較寬的頻寬；且此細銅線元件結構為釐米等級，因此在操作與製作上皆比微奈米等級的元件相對容易。未來目標將再改進細銅線元件結構之尺寸精密度，例如使用雷射加工製造此元件，並針對不同軸向的旋轉角度進行量測，希望能透過改變旋轉角度控制不同的兆赫茲頻譜之穿透訊號，或是利用其高頻空間分布之特性，設計一空間上非等距之金屬光柵結構，而更有效控制其濾波特性的，增加兆赫茲時域頻譜技術量測系統的量測資訊與應用性。

參考文獻

1. B. Ferguson and X. C. Zhang, *Nature Materials*, **26**, 1 (2002).
2. R. Hillenbrand and F. Kickramasinghe, *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 25 (2002).
3. T. Yuan, J. Z. Xu, X. C. Zhang, *Infrared Physics and Technology*, **45**, 417 (2004).
4. 洪勝富, 齊正中, 物理雙月刊, **23**, 2 (2001).
5. T. Mori, E. J. Nicol, S. Shiizuka, K. Kuniyasu, T. Nojima, N. Toyota, and J. P. Carbotte, *The American Physical Society*, **B77**, 174515 (2008).
6. D. M. Mittleman, R. H. Jacobson, and M. C. Nuss, *IEEE*, **2**(3), 679 (1996).
7. D. Dragoman and M. Dragoman, *Progress in Quantum Electronics*, **28**, 1 (2004).
8. D. Auston, K. Cheung, J. Valdmanis, and D. Kleinman, *Phys. Rev.Lett.*, **53**, 1555 (1984).
9. Ch. Fattinger and D. Grischkowsky, *Appl. Phys. Lett.*, **53**, 1480 (1988).
10. M. Hangyo, T. Nagashima, and S. Nashima, *Measurement Science Technology*, **13**, 1727 (2002).
11. J. Wilson and J. Hawkes, *Optoelectronics: An Introduction*, 3rd ed., Prentice Hall (1998).
12. 曾祥仁, 利用碲化鋅的電光效應研究次毫米電磁脈衝的時空分佈, 國立清華大學物理所碩士論文 (1998).
13. T. Gong, L. X. Zhang, W. Xiaong, W. Kula, Y. Kostoulas, and P. M. Fauchet, *Phys. Rev. B*, **47**, 14495 (1993).
14. 張鮮文, 陳柏荔, 翁俊仁, 楊智仲, 白世璽, 科儀新知, **30** (4), 69 (2009).
15. E. Hecht, *Optics*, Addison-Wesley Longman Inc., 327 (1998).
16. C. Winnewisser, F. Lewen, and H. Helm, *Appl. Phys. A*, **66**, 593 (1998).



張鮮文先生為國立台灣科技大學機械所碩士，現任國家實驗研究院儀科中心前瞻技術組助理研究員。

Shian-Wen Chang received his M.S. in mechanical engineering from National Taiwan University of Science and Technology. He is currently an assistant researcher in the Frontier Technology Division at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



王太伸博士為國立成功大學物理所碩士，曾任國家實驗研究院儀器科技研究中心前瞻技術組副研究員。

Tai-Shen Wang received his Ph.D in physics from National Cheng Kung University. He was an associate researcher in the Frontier Technology Division at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



翁俊仁先生為國立中山大學光電所碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心前瞻技術組副研究員。

Chun-Jen Weng received his M.S. in electro-optical engineering at National Sun Yat-Sen University. He is currently an associate researcher in the Frontier Technology Division at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



白世璽博士為國立清華大學物理所碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心前瞻技術組副研究員。

Shyh-Shii Pai received his Ph.D in physics from National Tsing Hua University. He is currently an associate researcher in the Frontier Technology Division at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.