

# 兆赫茲電磁輻射應用於單晶矽晶圓之 穿透研究

## Study on Silicon Wafer with Various Resistivities Utilizing THz Time-Domain Spectroscopy

張鮮文、陳柏荔、翁俊仁、楊智仲、白世璽

Shian-Wen Chang, Po-Li Chen, Chun-Jen Weng, Jr-Jung Yang, Shyh-Shii Pai

在本文中將會介紹以超短脈衝雷射激發兆赫茲電磁輻射之原理與實驗設置，並探討兆赫茲電磁輻射於單晶矽晶圓之穿透特性，研究兆赫茲電磁輻射於平行與聚焦處不同量測位置之差異，以及不同阻值 (0.008, 1, 11510  $\Omega\cdot\text{cm}$ ) 矽晶圓對於兆赫茲電磁輻射之穿透影響，由實驗結果得知較佳的量測位置為兆赫茲電磁輻射聚焦處，此處可得到較高的穿透率，此情形可能是由於兆赫茲電磁輻射平行處的非均勻截面電場分布所造成。而影響兆赫茲電磁輻射穿透的重要參數為矽晶圓之電阻係數，由實驗得知電阻係數為 0.008  $\Omega\cdot\text{cm}$  時，無任何兆赫茲電磁輻射的穿透現象，當電阻係數高於 1  $\Omega\cdot\text{cm}$ ，兆赫茲電磁輻射即有約 60% 之穿透。

In this study we investigated terahertz (THz) transmission characteristics on Si wafer samples with various resistivities (0.008, 1, 11510  $\Omega\cdot\text{cm}$ ) using a THz time-domain spectroscopy (THz-TDS) apparatus. For this THz-TDS system, there were two testing positions for THz transmission measurements, one provided parallel THz waves for sizable samples with a diameter of about 50 mm, and the other one then focused THz radiation onto a cross-section of about 2 mm diameter where applied to a small-size material. We obtained a higher THz transmission at the focused position for THz waves than the parallel testing position which might be due to a non-uniform cross-section field distribution in the parallel THz beam. Our study of the THz-TDS on Si wafers indicated that there was of about 60% transmission for resistivity larger than 1  $\Omega\cdot\text{cm}$ . The related analysis for the complex refractive index of Si samples in THz range will be discussed.

### 一、前言

矽 (silicon) 是目前應用最廣泛的半導體材料，從大家所熟知的電子產業、微機電技術到國防工業，甚至是近幾年非常熱門的太陽能電池，都會使用到矽材料，因此矽材料的特性是值得更深入的探

討。矽為一種半導體材料，普遍以二氧化矽的狀態存在於自然界中，藉由還原、純化的方法，可得到高純度的多晶矽，之後再將其熔融後拉晶成單晶矽。其可應用半導體製程製作出具有不同功能的積體電路元件，而這些元件或是在製程中的薄膜製鍍與蝕刻程序，可以使用兆赫茲電磁輻射作元件瑕疵

或薄膜材料的特性研究<sup>(1-2)</sup>，所以本實驗先針對單晶矽晶圓作一個先期的研究，了解其在兆赫茲電磁波之穿透特性，以利作為後續研究的基礎。

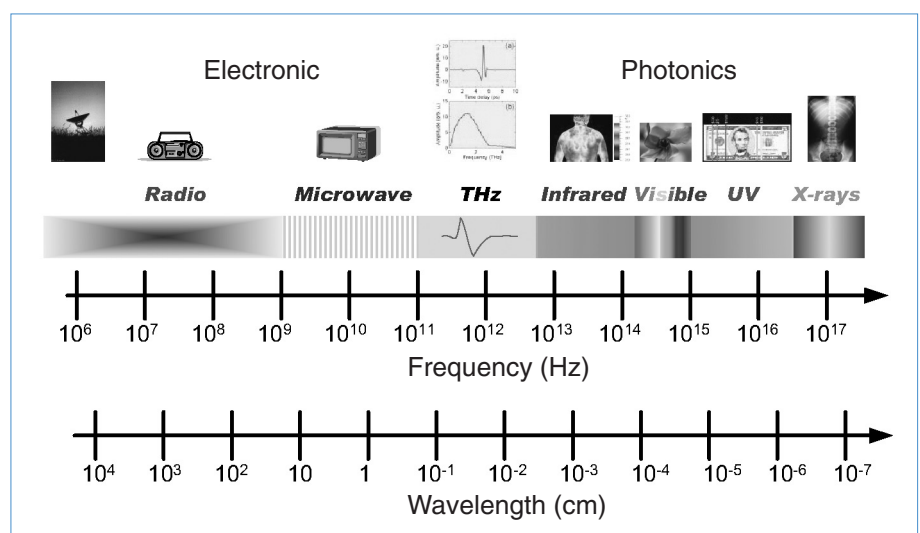
兆赫茲之英文為 *terahertz*，其簡寫為 THz ( $1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$ )。兆赫茲技術是由於近二十年來在超快雷射技術的迅速發展而新興的一個研究領域，該領域橫跨電磁學、光學、光電子學、半導體物理學、材料科學及微加工技術等，是一門整合型科學，且在資訊科學、生物學、醫學、天文學、環境科學等方面具有重要的應用前景。兆赫茲頻率係介於紅外與微波之間的一個頻率波段，如圖 1 所示。其頻率分布範圍包含部分毫米波段 (~100 GHz) 到遠紅外波段 (~25 THz) 的一段電磁頻譜。從波長的角度來看，兆赫茲波又可稱為次毫米波 (*sub-millimeter wave*)，因為其波長較毫米短，1 THz 換算為波長約  $0.33 \text{ mm}$ <sup>(3-5)</sup>。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。1980 年代後，由於短脈衝雷射光源之取得更加容易，促使超快雷射技術加速進步，再加上電子技術、光電元件與通信科技的進步，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光譜 (包括發射、反射和透射) 包含豐富的物理和化學資訊，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。因為在兆赫茲波段中，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<sup>(6)</sup>。在科學發展史上 Tinkham 等人使用傅立葉轉換紅外光譜 (*Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR*) 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<sup>(7)</sup>，足見此一波段在科學上的重要性。而且兆赫茲時域光譜技術 (*THz time-domain spectroscopy, THz-TDS*) 較 FTIR 於 3 THz 以下具有量測優勢，利用 THz-TDS 量測可同時獲得電場振幅與頻率相位，因此不需要求助於 Kramers-Kronig 關係求得，且 THz-TDS 對於熱雜訊不敏感，較 FTIR 具有較高的訊噪比。其他如電子-聲子散射等各種穿隧機制，在能量或時間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的轉動或振動能階，因此兆赫茲波在物體成像、環境監測、醫療診斷、醫學影像、無線電天文、寬頻移動通訊、遙測，尤其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<sup>(8-9)</sup>。而隨著高速資訊時代之來臨，元件操作頻率的增加，也使得元件在兆赫茲波段的研究益加重要。

兆赫茲電磁輻射可應用於兆赫茲時域光譜技術 (*THz-TDS*) 是近年來在國際上發展的研究技術。它

圖 1.  
兆赫茲波段示意圖。



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。通常有機分子內化學鍵的振動吸收頻率主要在普通紅外波段，但對於分子之間弱的相互作用（如氫鍵）及大分子的骨架振動（構型彎曲）、偶極子的旋轉和振動躍遷以及晶體中晶格的低頻振動吸收頻率，則對應於兆赫茲紅外波段範圍。這些振動所反映的分子結構及相關環境資訊，都在兆赫茲波段內不同吸收位置及吸收強度上有明顯的回應，有機分子的這些光譜特徵，使得利用兆赫茲時域光譜技術具有鑒別化合物結構、構型與環境狀態的能力。兆赫茲時域光譜可量測材料在兆赫茲頻段的各種物理、光學特性、介電常數和吸收常數等。

以下是兆赫茲時域頻譜技術的特點：

- (1) 兆赫茲時域電場波形包含兆赫茲脈衝的振幅、相位、時間等更完整的資訊，透過傅立葉轉換可同時得到吸收頻譜和色散頻譜，藉由測量樣品在兆赫茲波段的吸收頻譜和色散頻譜，可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，其訊噪比也遠優於利用熱輻射的遠紅外光譜儀。
- (3) 兆赫茲時域頻譜的時間分辨性和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及非線性兆赫茲發射頻譜。在兆赫茲時域頻譜出現前，傅立葉轉換頻譜法（Fourier transform spectroscopy, FTS）在遠紅外區是最受歡迎的技術。
- (4) 兆赫茲時域頻譜技術是一種非接觸測量技術，同時兆赫茲亦具有寬頻域特性，能夠對半導體和電介質薄膜及固體材料的物理特性進行準確的測量。

## 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（large-aperture photoconducting antenna）而產生兆赫茲波輻射，其為 Spectra-

Physics 公司之鈦：藍寶石鎖模雷射系統（型號為 Tsunami），由 5 W 二極體雷射 Milliennia 作為幫浦雷射（pump laser）。此一超快雷射系統之中心波長為 800 nm，脈衝寬度 150 fs，平均功率 700 mW，經換算瞬間峰值功率可達 88 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，因此架設了一組監控系統，包含一組 Ocean Optics 光譜儀及光柵，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，並由液晶螢幕即時顯現。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中心波長與半高頻寬（FWHM）各為 785 nm 與 7 nm。

### 1. 大孔徑光導天線

本實驗之兆赫茲電磁輻射發射器使用大孔徑光導天線（large-aperture photoconducting antenna）來產生兆赫茲電磁輻射，其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 的平行純金電極，中間的光導間隙為 500  $\mu\text{m}$ ，之後在兩個電極上使用錫焊上細銅線，示意圖如圖 3，再連接至電源供應器，使其可提供一個 120 V 直流電壓於大孔徑光導天線，進而可得到電場強度更強的兆赫茲波電磁輻射。為了增加大孔徑光導天線的散熱效果，所以將其用 N-grease 黏貼於銅塊上，並在銅塊上鑽一個 5 mm 的孔，可讓兆赫茲波通過。

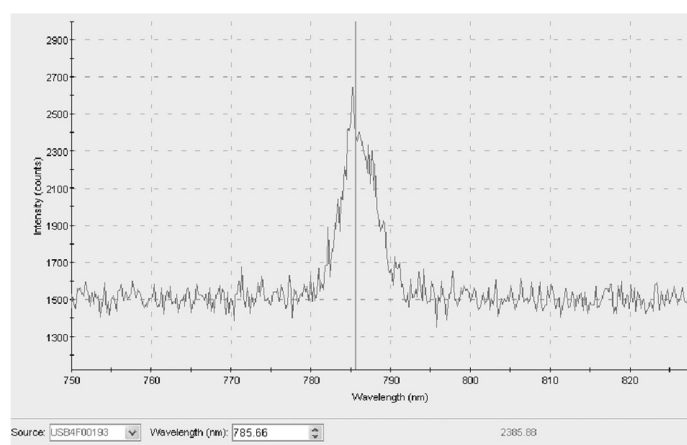


圖 2. 以 Ocean Optics 光譜儀觀察雷射波長之分布。

## 2. THz-TDS 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) 把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) 所驅動的單軸移動式平台上，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電磁輻射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  $2 \mu\text{m}$ ，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  $4 \mu\text{m}$ ，換算約為  $13.33 \text{ fs}$  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)，由光遮斷器週期性的遮斷激發光束，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

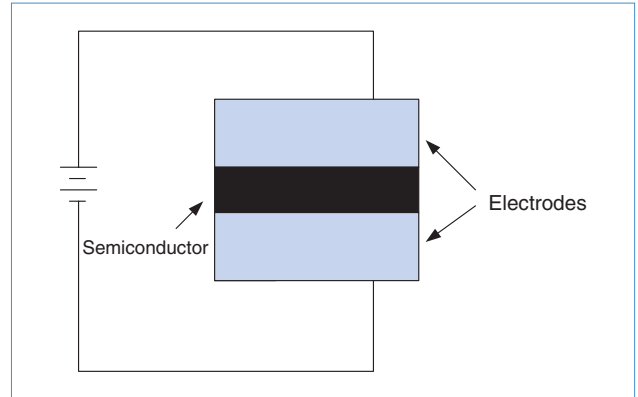


圖 3. 大孔徑光導天線之示意圖。

射器經由非線性效應而輻射出兆赫茲電磁輻射，透過一對離軸拋物面鏡組 (off-axis parabolic mirror, OAP mirror) 將兆赫茲電磁輻射聚焦於量測樣品上，通過樣品的兆赫茲電磁輻射透過另外一對拋物面鏡組聚焦在作為電光晶體 (EO-crystal) 用之碲化鋅的接收器 (receiver) 上，以便進行電光取樣 (E-O sampling) 的訊號量測。關於電光取樣量測部分將在下一節作詳細說明。

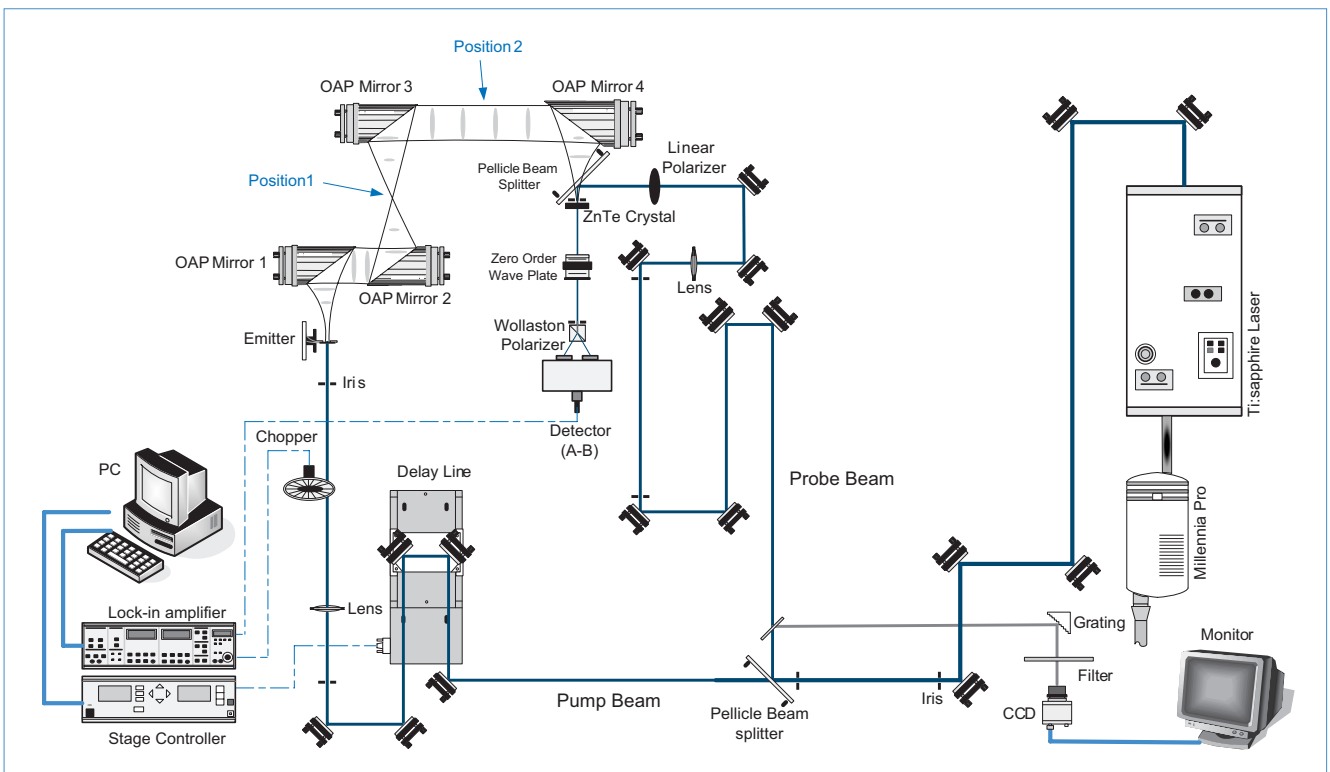


圖 4. 兆赫茲時域頻譜實驗系統架設圖。

### 3. 電光取樣

電光取樣 (E-O sampling) 所使用的基本機制即為線性電光效應，又稱為 Pockels effect，此效應可簡單的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、電荷分布以及它們之間的相互作用性質有關。本實驗使用碲化鋅 (ZnTe) 作為偵測兆赫茲電磁輻射的光學晶體，而碲化鋅屬於高對稱性立方晶系的 (cubic) 結構，利用其線性電光係數與電光調製架構下 Jones 矩陣可計算得到出光偏光鏡射出的光強度與相位延遲的關係如下：

$$I_{\text{out}} = |E_{\text{out}}|^2 = \sin^2 \frac{\Gamma}{2} = \sin^2 \left( \frac{\pi V}{2 V_{\pi}} \right) \quad (1)$$

將此關係計算作圖如圖 5 所示，可以得知上式中光的穿透與外加電壓的關係，其透射率與外加電壓的關係呈現非線性關係，假如沒有選擇適當的工作點，就會使得調制光強度發生畸變。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。但相對的在  $V_{\pi/2}$  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  $1/4$  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。請參見光路圖，就是在光路上加入一片補償器 (compensator)，此補償器就是  $1/4$  波板 (quarter-wave plate)，利用它可以產生固定的  $\pi/2$  相位延遲，達到靈敏度最高之目的<sup>(10)</sup>。

訊號檢測光路說明如下。經過偏振片 (polarizer) 的探測光束，也經由薄膜分光鏡 (pellicle beamsplitter) 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電磁輻射的電場對碲化鋅的改變，再經過一個  $1/4$  波板與一個 Wollaston 極化分光鏡 (Wollaston polarization beamsplitter) 將探測光束分成兩道不同極化的光束，分別由一個光偵測器 (detector) 接收，加入偏振片是為了確保探測光束是線性偏振。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

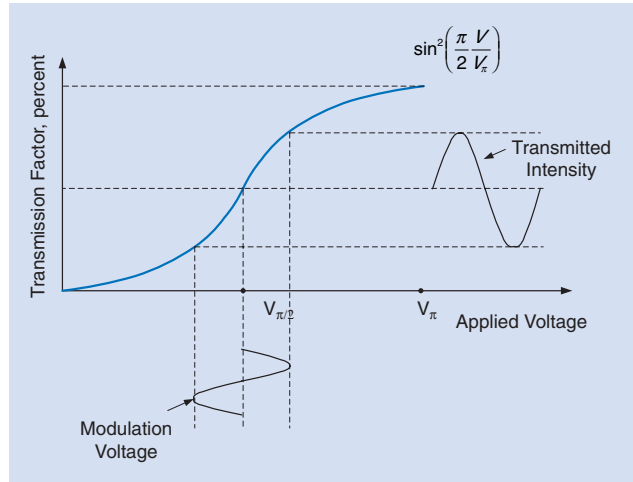


圖 5. 電光晶體之光穿透率與外加電壓關係。

收器，又不致使兆赫茲電磁輻射經過分光鏡後產生太大之衰減及色散<sup>(11)</sup>。

在接收器還沒受兆赫茲電磁輻射改變時，探測光束通過接收器，其偏極方向將不會改變，再經過  $1/4$  波板，會使得探測光束的偏極由線性偏極轉為圓形偏極。而兆赫茲電磁輻射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變化，造成探測光束偏極受到改變，經過  $1/4$  波板後，與未受兆赫茲電磁輻射改變時比較，此時的探測光束變成橢圓偏振，極化分光鏡再將探測光束的偏極分成水平和垂直方向，此兩種方向的信號分別被一個光二極體擷取，再利用減法電路將兩個訊號相減送至鎖相放大器 (lock-in amplifier)，若是沒有受到兆赫茲變化的電光晶體，探測光束通過後  $1/4$  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，表示此時電光晶體感受到兆赫茲電場之影響，故此即為兆赫茲電磁輻射之訊號。

### 4. 兆赫茲波電磁輻射訊號之最佳化

在實驗開始前必須作兆赫茲電磁輻射訊號的最佳化，方能進行樣品量測的動作。最佳化的步驟如下。

將雷射能量最佳化至  $600$  mW 左右，並確認雷射是在鎖模 (mode locking) 狀況下。接著將雷射光調整到通過光圈 (iris) 的中心位置，主要有四對光

圈：引光處、激發光束、探測光束和電光取樣處。而調整電光取樣處的光路是較繁瑣的，因為需要將分開的激發光束與探測光束重合成為同一光束，且必須移走大孔徑光導天線，並利用光衰減片將激發光束光源的功率衰減至 100 mW 以下，以避免傷害薄膜分光鏡。雷射光路調整完成後，接下來調整零階石英波板的角度的，本實驗室使用 Newport 公司的 1/4 波板，使用波長在 715–1000 nm 範圍內。首先，先將 1/4 波板粗調至 45 度角，然後用擋板遮住激發光束，並將光遮斷器置於探測光束的光路上，細微調整零階石英波板的角度的，使得鎖相放大器的讀值盡量接近於零的刻度，這是為了減少雜訊，進而提高訊噪比，通常希望雜訊控制在 10  $\mu\text{V}$  以下。之後就可以復位大孔徑光導天線於可手調式之三軸的移動平台上，並移走擋板和光衰減器，且將光遮斷器置放於激發光束上，接著給予大孔徑光導天線 120 V 的直流電壓，然後開始利用三軸的移動平台調整大孔徑光導天線的位置。主要有兩項重點，第一是必須把大孔徑光導天線的位置調整到第一個拋物面鏡 (OAP mirror 1) 的焦點上，如此就能確定兆赫波會在第一個拋物面鏡 (OAP mirror 1) 和第二個拋物面鏡 (OAP mirror 2) 間平行地傳播，然後聚焦再平行地傳播，而這兩個位置各是之後量測樣本位置 1 (position 1) 與量測位置 2 (position 2)，最後兆赫茲波會於電光晶體上聚焦，並與探測光束重合於此處。之後還要調整大孔徑光導天線的左右位置，調整方式是依據三用電表上電流的讀值，讓電流值越大越好，經最佳化調整，在本研究中 120 V 的直流電壓其電流的讀值約為 4.8 mA，此時發射出的兆赫茲波為最大的訊號強度。

接下來可利用電腦軟體進行步進移動平台的兆赫波訊號掃描量測，一開始作大範圍的訊號搜索掃描，當掃描到訊號時，再將移動平台移至訊號最大的位置上去調整碲化鋅的角度位置，讓訊號在鎖相

放大器的讀值約為 300  $\mu\text{V}$  左右。當分別對雜訊及訊號最佳化後，即可獲得最大之訊噪比，然後便可作樣品的量測。

## 5. 實驗量測樣品

本實驗所量測的樣品為單晶之矽晶圓，其晶片直徑為 100 mm，厚度約為 500  $\mu\text{m}$ ，晶格方向  $\langle 100 \rangle$ ，樣品 A 的電阻值為 0.008–0.018  $\Omega \cdot \text{cm}$ ，樣品 B 的電阻值為 1–10  $\Omega \cdot \text{cm}$ ，樣品 C 的電阻值為 11510–11540  $\Omega \cdot \text{cm}$ ，其規格如表 1 所示。

矽晶圓之量測樣品的主要變因為阻抗值 (resistivity)，而樣品的量測位置有兩個地方，第一個位置為兆赫茲波聚焦處，第二個位置為兆赫茲波平行傳播處，如圖 4 中 Position 1 與 Position 2。

## 三、實驗結果與討論

本實驗主要探討不同阻值之矽晶圓與不同量測點下之兆赫茲電磁輻射對於矽晶圓之穿透與吸收特性之研究，以下各節將作詳細的討論。

### 1. 自由空間兆赫茲電磁輻射

如圖 3 所示，本實驗之發射器採用砷化鎵 (GaAs) 製成之大孔徑光導天線，而接收器 (receiver) 使用厚度 2 mm 的碲化鋅晶體的電光取樣法，以偵測兆赫茲電磁輻射訊號。

由圖 6 可知於自由空間下時域的兆赫茲電磁脈衝的分布，由於實驗在大氣環境中進行，水氣分布約為 40%，因此可觀察到主訊號後的震盪情形十分明顯，而處於圖 6 中位置 1 的訊號震盪情形，經判斷是由水氣所造成。此外，圖 6 中 2 號數字所對應的位置則是接收器本身的二次反射，其時間延遲約為主訊號後之 20 ps。

將圖 6 所得到的時域訊號進行快速傅立葉轉

表 1.  
矽晶圓主要規格。

樣品	電阻係數 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	直徑 (mm)	類型	晶格方向	厚度 ( $\mu\text{m}$ )
A	0.008–0.018	100.0	N/A	$\langle 100 \rangle$	500
B	1–10	100.0	P/B	$\langle 100 \rangle$	525
C	11510–11540	100.0	P/B	$\langle 100 \rangle$	500

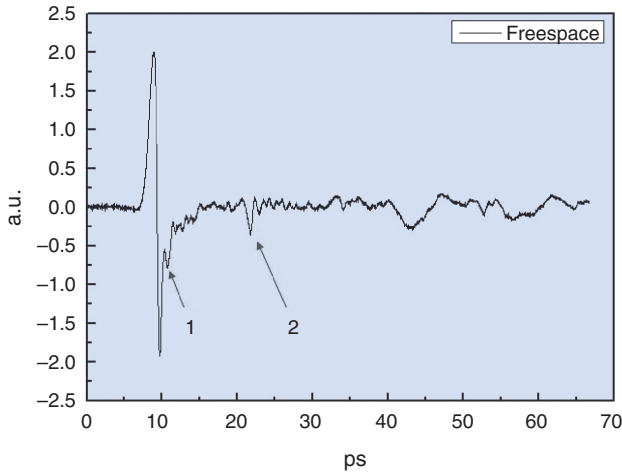


圖 6. 自由空間之時域兆赫茲波訊號。

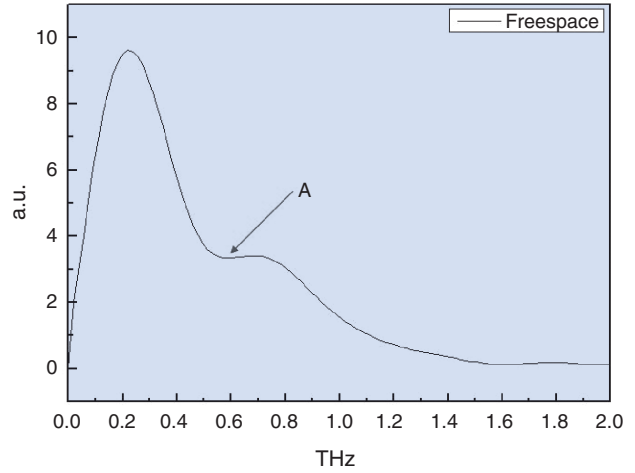


圖 7. 兆赫茲波之頻譜分布。

換，可獲得脈衝訊號於頻域上的分布 (如圖 7 所示)。處理數據時，由於發射器所產生的反射會造成頻譜上的震盪，也就是當二次反射的訊號連同主訊號同時進行快速傅立葉轉換時，在自由空間訊號的頻譜上會有明顯的震盪情形，因此分析之數據擷取至反射之前，又因時域數據數目必須為 2 的整數次方，故將數據數目補至 4096 點。而圖 7 中 A 處的部份，則為兆赫茲在時域訊號 (圖 6) 中 1 處水氣所引起的震盪造成的。

## 2. 矽晶圓基板光學穿透之計算

矽晶圓的折射率與吸收常數計算如下：

$$\Delta t = \frac{n-1}{c}d \quad (2)$$

其中  $\Delta t$  為時間延遲， $n$  為矽晶圓折射率實部， $d$  為矽晶圓厚度， $c$  為光速。

利用上式可以估計出  $n$ ，但因此種計算方式是先假設  $n$  在此頻率範圍幾乎為定值，若要精確的求出矽晶圓折射率與頻率的關係，則必須考慮其在各頻率不同的延遲相位。以下為矽晶圓基板的計算：

$$\frac{E_t(\omega)}{E_0(\omega)} = T \frac{e^{i\tilde{n}\omega d/c}}{e^{i\omega d/c}} \quad (3)$$

其中  $E_t(\omega)$  為經過矽晶圓的電場強度， $E_0(\omega)$  為自

由空間的電場強度， $T$  為經過矽晶圓的穿透率， $\tilde{n}$  為矽晶圓在各頻率下的複數折射率， $\omega = 2\pi f$  為角頻率 ( $f$  為頻率)， $d$  為矽晶圓的厚度， $c$  為光速。對於在介質 1 與介質 2 之間介面垂直入射的電磁波，其反射係數  $r_{12}$  與穿透係數  $t_{12}$  分別為：

$$r_{12} \equiv \frac{E_{or}}{E_{oi}} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (4)$$

$$t_{12} \equiv \frac{E_{ot}}{E_{oi}} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} \quad (5)$$

其中  $E_{oi}$ 、 $E_{or}$ 、 $E_{ot}$  分別為介面上的入射、反射、穿透之初始電場強度， $n_1$ 、 $n_2$  表示介質 1 與介質 2 之折射率，並可知介質 2 與介質 3 之間介面的穿透係數  $t_{23}$  為：

$$t_{23} = \frac{2n_2}{n_2 + n_3} \quad (6)$$

其中  $n_3$  表示介質 3 之折射率，並由於介質 1 與介質 3 皆為空氣，所以  $n_1 = n_3 = 1$ ，因此電磁波經過介質 2，即單晶矽晶圓之穿透率  $T$  為

$$T = t_{12}t_{23} = \frac{4n_2}{(1+n_2)^2} = \frac{4\tilde{n}}{(1+n)^2} \quad (7)$$

代入 (3) 式可得：

$$\frac{E_t(\omega)}{E_0(\omega)} = \frac{4\tilde{n}}{(\tilde{n}+1)^2} e^{i(\tilde{n}-1)\omega d/c} \quad (8)$$

假設  $\rho e^{i\Delta} = \frac{E_i(\omega)}{E_0(\omega)}$ ，可得：

$$\rho e^{i\Delta} = \frac{4\tilde{n}}{(\tilde{n}+1)^2} e^{i(\tilde{n}-1)\omega d/c} \quad (9)$$

其中  $\tilde{n} = n + ik$ ， $n$  為折射率實部， $k$  為折射率虛部； $\rho$  為頻譜上穿過矽晶圓與自由空間電場強度的比值； $\Delta$  為矽晶圓與自由空間電場的相位差。進一步假設  $n \gg k$ ，由 (9) 式則可推導出矽晶圓之折射率實部  $n$  與虛部  $k$ ：

$$n \approx 1 + \frac{c}{\omega d} (\Delta) \quad (10)$$

$$k \approx -\frac{c}{\omega d} \ln \left[ \rho \frac{(1+n)^2}{4n} \right] \quad (11)$$

求出  $k$  後，可進一步獲得功率吸收係數  $\alpha = 2\omega k/c$ <sup>(12)</sup>。

### 3. 兆赫茲平行傳播處之矽晶圓量測結果

由表 1 可知，在三個量測樣品中樣品 A 的阻值為最低，為  $0.008 - 0.018 \Omega \cdot \text{cm}$ 。由圖 8 觀察樣品 A 在時域下的訊號，可知兆赫茲無法穿透樣品 A，因此樣品 A 於後文將不作進一步的討論。

本節將討論不同阻值之矽晶圓於兆赫茲電磁輻射平行傳播處的量測結果，由圖 9 可知樣品 B 與樣品 C 的時間延遲分別為 4.1 ps 及 4.3 ps，且矽晶圓

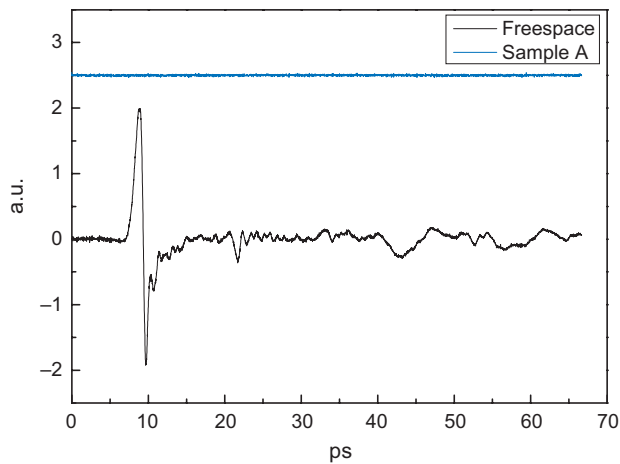


圖 8. 樣品 A 於時域兆赫茲波的量測結果。

之厚度為  $500 \mu\text{m}$ ，由 (2) 式可計算出樣品 B 與樣品 C 的折射率各為 3.4 與 3.5，與圖 11 中在各頻率下的折射率相比較，其結果為一致。另由圖 9、圖 10、圖 12 與圖 13 可明顯地觀察到樣品 B 對於兆赫茲電磁輻射的訊號吸收高於樣品 C，尤其是在圖 12 兆赫茲電磁輻射平行傳播位置量測之折射率虛部圖，在 0.2 THz 時的折射率虛部即高達 0.4 左右。此外，將各樣品之振幅變化、時間延遲與折射率實部之結果整理於表 3，可知阻值為  $1 - 10 \Omega \cdot \text{cm}$  的單晶矽晶圓 (樣品 B) 對於兆赫茲電磁輻射穿透程度少於阻值為  $11510 - 11540 \Omega \cdot \text{cm}$  的單晶矽晶圓 (樣品 C)，其振幅變化分別為原本訊號的 38.3% 及 53.4%。

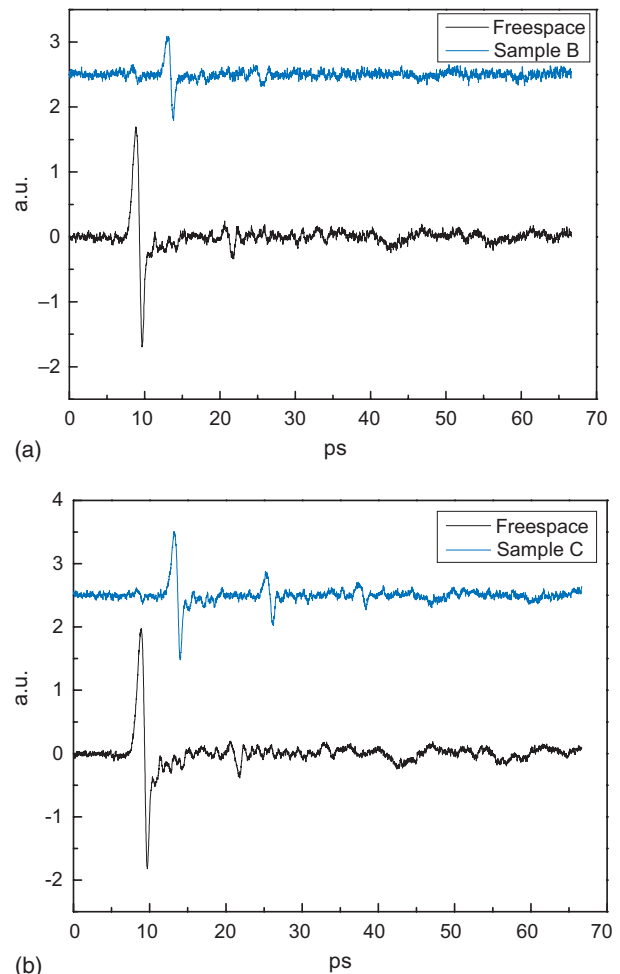


圖 9. 於兆赫茲平行傳播位置量測之兆赫茲時域圖。(a) 樣品 B 之兆赫茲時域圖，(b) 樣品 C 之兆赫茲時域圖。

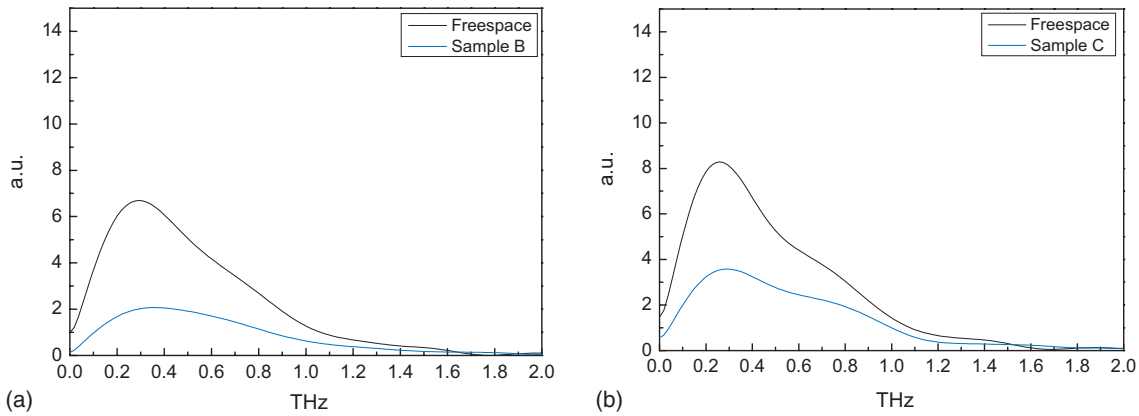


圖 10. 於兆赫茲平行傳播位置量測之兆赫茲頻譜圖。(a) 樣品 B 之兆赫茲頻譜圖，(b) 樣品 C 之兆赫茲頻譜圖。

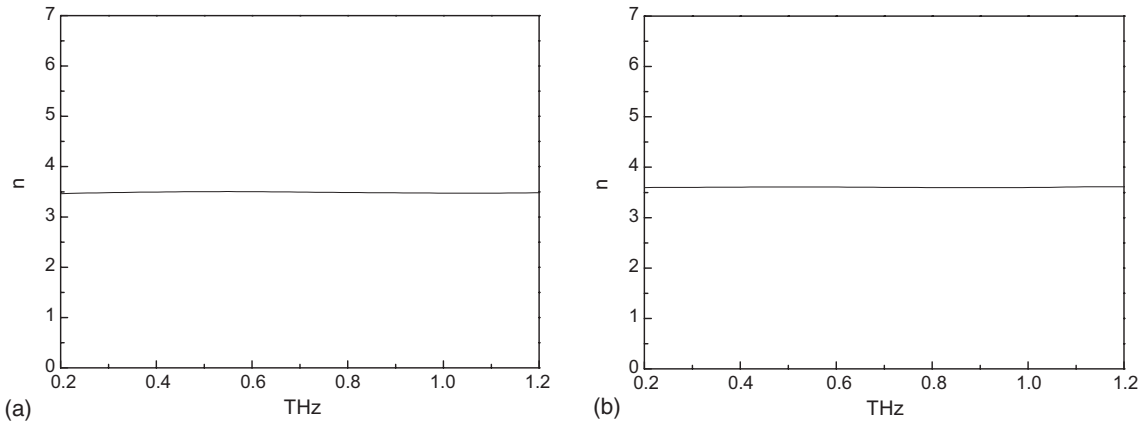


圖 11. 於兆赫茲平行傳播位置量測之折射率實部。(a) 樣品 B 之折射率實部，(b) 樣品 C 之折射率實部。

#### 4. 兆赫茲聚焦處之單晶矽晶圓量測結果

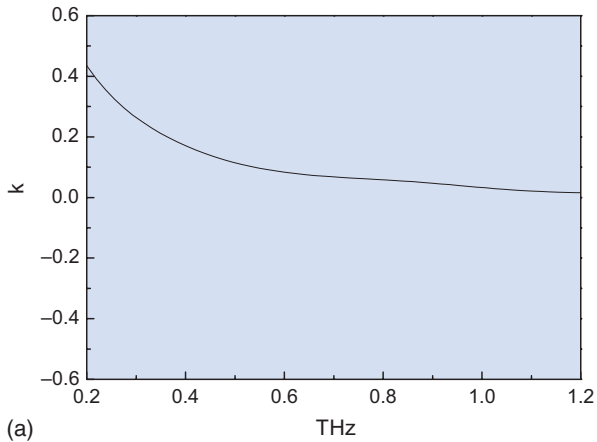
接著討論不同阻值矽晶圓樣品 B 與樣品 C 於兆赫茲電磁輻射聚焦處 (圖 3 中 position 1 處) 的量測結果。由圖 14 可知樣品 B 與樣品 C 的時間延遲分別為 4.1 ps 及 4.2 ps，由 (2) 式可計算出樣品 B 與樣品 C 的折射率各為 3.6 與 3.5，與圖 16 中在各頻率下的折射率以及平行傳播處的量測結果 (圖 9) 相比較，其結果為一致。由圖 14、圖 15、圖 17 與圖 18 可觀察樣品 B 與樣品 C 此兩種阻值不同的矽晶圓基板在兆赫茲時域、兆赫茲頻譜、折射率虛部以及功率吸收係數皆無明顯的差異。此外，訊號振幅變化、時間延遲與折射率比較如表 2 所示，可知阻值為  $1-10 \Omega \cdot \text{cm}$  的單晶矽晶圓 (樣品 B) 與阻值為  $11510-11540 \Omega \cdot \text{cm}$  的單晶矽晶圓 (樣品 C)，其

振幅變化分別為原本訊號的 62.8% 及 61.1%。

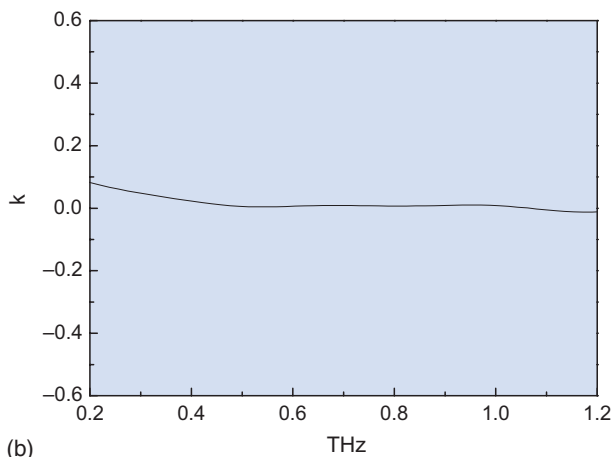
由 3.3 與 3.4 小節的結果得知，兆赫茲電磁輻射無法穿透電阻係數為  $0.008-0.018 \Omega \cdot \text{cm}$  的單晶矽晶圓，當電阻係數高於  $1 \Omega \cdot \text{cm}$  兆赫茲電磁輻射始有穿透的現象，由此可知若需進行量測薄膜材料實驗時，可以使用阻值高於  $1 \Omega \cdot \text{cm}$  以上之矽晶圓作為薄膜製鍍之基板。

表 2. 於聚焦位置量測之結果比較。

	樣品 A	樣品 B	樣品 C
振幅變化	—	62.8 %	61.1 %
時間延遲	—	4.1 ps	4.2 ps
折射率	—	3.4	3.5



(a)



(b)

圖 12. 於兆赫茲平行傳播位置量測之折射率虛部。  
(a) 樣品 B 之折射率虛部，(b) 樣品 C 之折射率虛部。

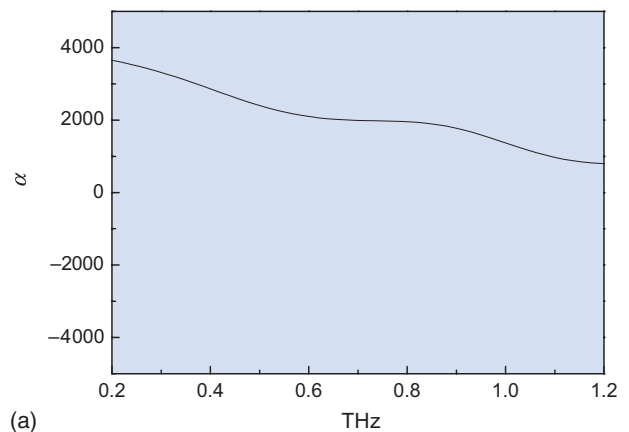
## 5. 相同阻值不同量測位置之比較

在此將討論相同阻值的量測樣品於兆赫茲電磁輻射聚焦處(圖 3 中 Position 1 處)與兆赫茲電磁輻射平行傳播處(圖 3 中 Position 2 處)之比較。由表 2 與表 3 的振幅變化顯示出於聚焦處所量測的值大於平行位置的值，假設聚焦及平行位置於量測截面上之兆赫茲波形皆為高斯分布，由圖 19 之示意圖可知，經矽晶圓之電場穿透強度須大於某臨界值(如圖 19 之虛線處)，方能有效測得，所以由圖 19 可容易觀察到聚焦處測得之兆赫茲總強度明顯高於平行處之總強度，也代表穿透率較高。此外，根據實驗顯示，平行位置之電磁波傳播容易在界面上產生多次反射現象，而造成波形失真的結果。基於以上兩點說明可知，在平行位置量測之波形比起聚焦處較易

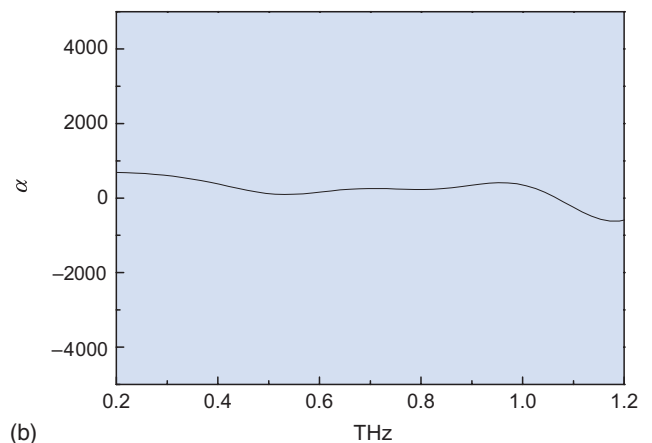
表 3. 於平行傳播位置量測之結果比較。

	樣品 A	樣品 B	樣品 C
振幅變化	—	38.3 %	53.4 %
時間延遲	—	4.1 ps	4.3 ps
折射率	—	3.6	3.5

產生衰減與失真的現象，因此在聚焦處時域的兆赫茲電磁輻射之穿透高於平行傳播處之穿透率。振幅變化量可同時反映樣品功率吸收的程度，由圖 13 與圖 18 所觀察到聚焦位置之功率吸收係數是低於平行傳播處，其與先前結果一致，尤其是在樣品 B 非常明顯，因此在進行兆赫茲電磁輻射實驗量測時，建議於兆赫茲電磁輻射聚焦位置進行量測，如此可以得到較高的兆赫茲電磁輻射穿透訊號。



(a)



(b)

圖 13. 於兆赫茲平行傳播位置量測之功率吸收係數。  
(a) 樣品 B 之功率吸收係數，(b) 樣品 C 之功率吸收係數。

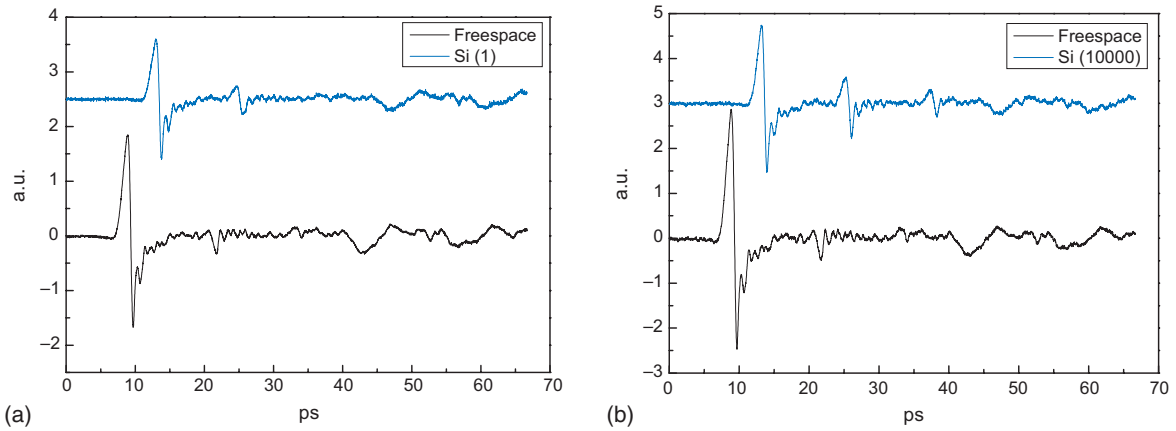


圖 14. 於聚焦位置量測之兆赫茲時域圖。(a) 樣品 B 之兆赫茲時域圖，(b) 樣品 C 之兆赫茲時域圖。

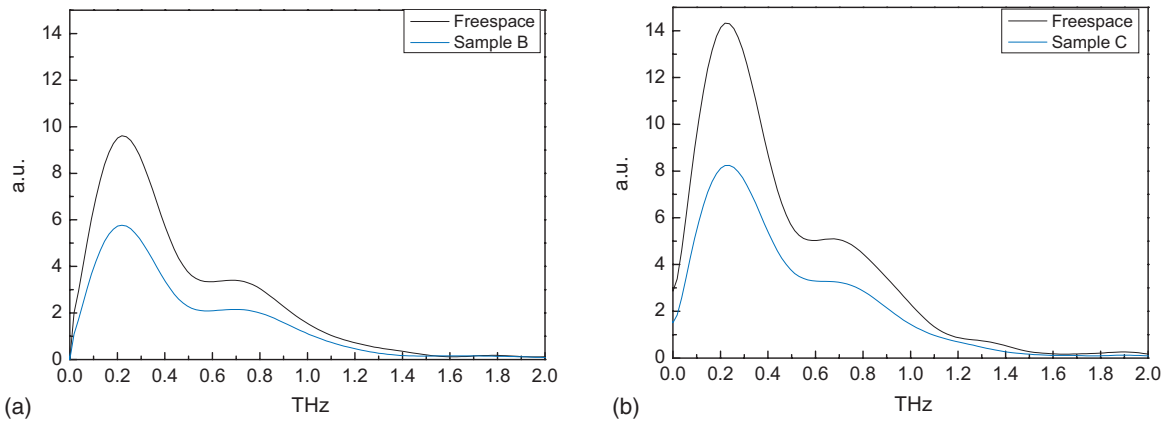


圖 15. 於聚焦位置量測之兆赫茲頻譜圖。(a) 樣品 B 之兆赫茲頻譜圖，(b) 樣品 C 之兆赫茲頻譜圖。

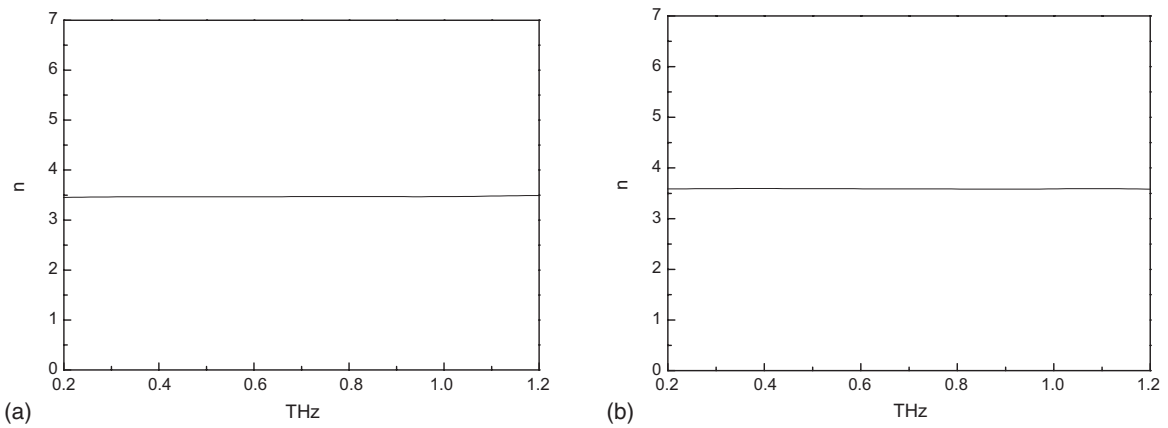


圖 16. 於兆赫茲聚焦傳播位置量測之折射率實部。(a) 樣品 B 之折射率實部，(b) 樣品 C 之折射率實部。

#### 四、結論

本研究透過已完成兆赫茲時域頻譜系統之架設，得到單晶矽晶圓在兆赫茲時域頻譜之穿透特

性。由於在平行位置量測之波形比起聚焦處較易產生衰減與失真的現象，並由實驗結果得知兆赫茲電磁輻射聚焦處相對於平行傳播處可得

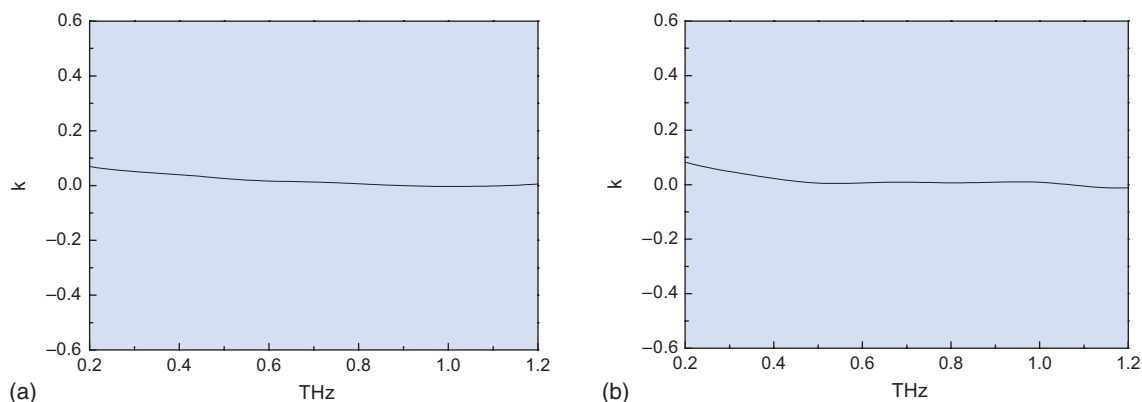


圖 17. 於聚焦位置量測之折射率虛部。(a) 樣品 B 之折射率虛部，(b) 樣品 C 之折射率虛部。

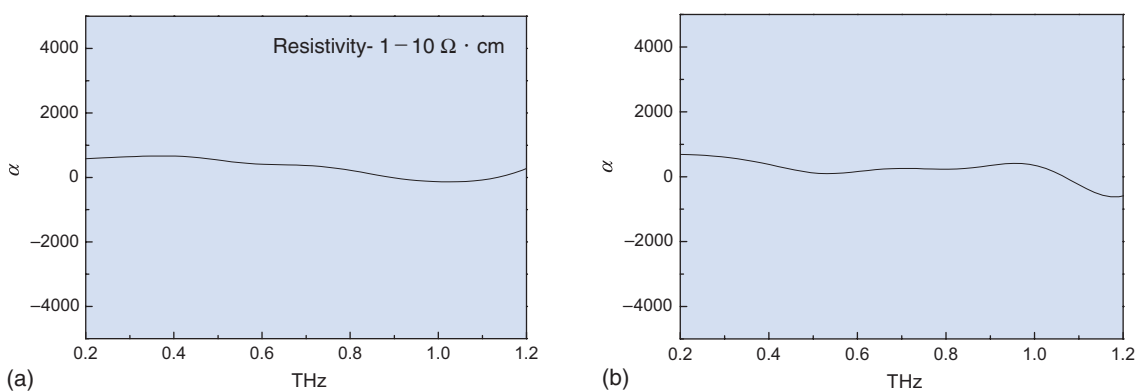


圖 18. 於聚焦位置量測之功率吸收係數。(a) 樣品 B 之功率吸收係數，(b) 樣品 C 之功率吸收係數。

到較高的穿透率，且在兆赫茲電磁輻射聚焦處作量測可以使用較小面積的量測樣品，可知較佳的量測位置為兆赫茲電磁輻射聚焦處。而影響兆赫茲電磁輻射穿透的重要參數為單晶矽晶圓之電阻係數，由實驗結果可知兆赫茲電磁輻射無法穿透電阻係數為  $0.008 - 0.018 \Omega \cdot \text{cm}$  的單晶矽晶圓，當電阻係數高於  $1 \Omega \cdot \text{cm}$  兆赫茲電磁輻射始有約 60% 之穿透現象。因此之後在作研究薄膜材料之特性時，可利用電阻係數高於  $1 \Omega \cdot \text{cm}$  的單晶矽晶圓作為薄膜製鍍之基板，將薄膜材料鍍於矽基板上再作兆赫茲時域頻譜之量測分析研究。此外，經由分析計算可得知單晶矽晶圓在兆赫茲的折射率約為 3.5。由於兆赫茲電磁輻射會被水氣吸收，所以在主訊號之後的波形震盪得很嚴重，建議改善的方式是降低量測環境溼度小於 5%，可以使用抽真空或是灌注氮氣之方法來降低兆赫茲電磁輻射被水氣吸收，以達到較佳的訊號品質。

## 參考文獻

1. G. M. Turner, M. C. Beard, and C. A. Schmuttenmaer, *J. Phys. Chem. B*, **106**, 11716 (2002).
2. M. C. Beard, G. M. Turner, and C. A. Schmuttenmaer, *Nano Lett.*, **2**, 983 (2001).
3. B. Ferguson and X. C. Zhang, *Nature Materials*, **26**, 1 (2002).
4. R. Hillenbrand and F. Kickramasinghe, *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 25 (2002).
5. T. Yuan, J. Z. Xu, and X. C. Zhang, *Infrared Physics and Technology*, **45**, 417 (2004).
6. 洪勝富, 齊正中, *物理雙月刊*, **23**, 2 (2001).
7. T. Mori, E. J. Nicol, S. Shiizuka, K. Kuniyasu, T. Nojima, N. Toyota, and J. P. Carbotte, *The American Physical Society*, **B 77**, 174515 (2008).
8. D. M. Mittleman, R. H. Jacobson, and M. C. Nuss, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **2** (3), 679 (1996).
9. D. Dragoman and M. Dragoman, *Progress in Quantum Electronics*, **28**, 1 (2004).
10. 曾祥仁, 國立清華大學物理所碩士論文 (1998).
11. T. Gong, L. X. Zhang, W. Xiaong, W. Kula, Y. Kostoulas, and P. M. Fauchet, *Phys. Rev. B*, **47**, 21, 14495 (1993).
12. 林人奇, 國立清華大學光電工程研究所碩士論文 (2006).

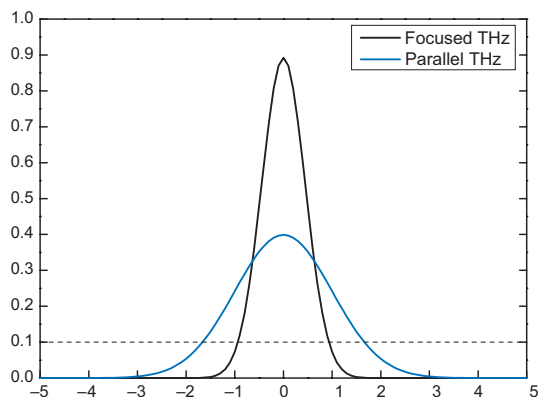


圖 19. 於聚焦與平行位置量測之兆赫茲波形示意圖。

- 張鮮文先生為國立台灣科技大學機械工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。
- 陳柏荔女士為國立清華大學動力機械工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。
- 翁俊仁先生為國立中山大學光電工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。
- 楊智仲先生為國立台灣師範大學機電科技碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。
- 白世璽先生為國立清華大學物理博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

- Shian-Wen Chang received his M.S. in mechanical engineering from National Taiwan University of Science and Technology. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
- Po-Li Chen received her Ph.D. in mechanical engineering from National Tsing Hua University. She is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
- Chun-Jen Weng received his M.S. in electro-optical engineering at National Sun Yat-Sen University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
- Jr-Jung Yang received his M.S. in mechatronic technology from National Taiwan Normal University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
- Shyh-Shii Pai received his Ph.D. in physics from National Tsing Hua University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.