

一、 報告摘要

氣體廣泛的在我們生活周遭流動，也對人類的生存扮演極其重要的角色，如何確保身邊的氣體無害是重要的課題。氣體檢測在不同領域皆有其應用的需求，市面上也存在許多針對不同需求的氣體檢測商品。包含工業安全檢測、環境檢測、醫學診斷、食品安全等領域，可以偵測有毒或易燃氣體、做呼吸道及消化道疾病檢測或確保無腐敗等等。

隨著太赫茲技術日漸成熟，也發展出氣體檢測的應用。太赫茲電子鼻有非接觸性、非破壞性以及不產生游離輻射的優勢，因此具有獨特的應用前景。這種氣體檢測技術使用光學的方式，利用太赫茲頻譜學 (Terahertz spectroscopy)量測氣體吸收，近一步分析可以得到成分或濃度等物理性質。此外，由於氣體在太赫茲頻段具有特定的「指紋」，有機會進一步分辨混合氣體的組成成分。但氣體的訊號較薄弱，氣體樣品的製備也較為困難，同時還須克服水氣對太赫茲波強烈的吸收，都是太赫茲電子鼻氣體檢測的一大阻力。

這份專題報告將說明我如何解決上述問題，介紹我所設計的太赫茲氣體感測系統，如何處理測量到的原始數據，成為可以辨別氣體的吸收譜線。同時將展示使用 Terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS)系統、Terahertz frequency-domain spectroscopy (THz-FDS)系統做氣體感測的優缺點及訊號的差異，並試圖提高訊雜比。另外，也展示了我檢測出屬於丙酮的「指紋」。

二、 報告內容

(1) 研究背景

在現今的社會中，氣體的危險往往是難以發現且影響相當大的。在日常生活中如果吸進的空氣中參雜了毒氣，幾乎沒有工具或方式可以避免受到傷害。此時氣體感測系統的應用就極為重要，能在發生危險時即時發出警告，甚至可以防患未然。除此之外，環境檢測方面，大氣污染也是一個重要問題，氣體檢測技術可以幫助監測空氣中的有害氣體濃度，以及溫室氣體的排放情況。可以見得氣體檢測技術的開發及應用，可以對人類生活的安全及未來發展提供保障。

目前氣體檢測的技術主要使用化學檢測，讓氣體樣品與相應的化學檢測試劑發生反應來辨別樣品的種類。不僅會消耗樣品，因為化學檢測試劑可檢測的樣品通常具有特定性，無法同時檢測樣品的多種可能，檢測靈敏度和選擇性有限，對於一些複雜的氣體混合物難以進行定量分析。另外，微流控 (Microfluidics) 氣體感測技術，利用微米級通道和微流體控制技術進行檢測。也有樣品需經過前後處理的問題，而且微流控芯片通常是一次性使用的，需要不斷更換，同樣無法達成對樣品非接觸、非侵入、非破壞性的需求。

隨著太赫茲技術的發展日益成熟，曾經被稱為 Terahertz gap 的太赫茲 (Terahertz) 頻段也發展至許多不同領域的應用，包括材料分析、成像、通信和氣體檢測等。太赫茲技術是一種介於微波和紅外線之間的電磁輻射，其頻率範圍為0.1至10太赫茲。由於太赫茲輻射能夠穿透許多物質，因此太赫茲電子鼻能夠快速而準確地識別物質中的化學成分，還具有非接觸、高靈敏度、高選擇性等優勢。大部分的氣體在太赫茲頻段有其獨特的「吸收光譜」，也就是氣體分子可以吸收特定頻率的太赫茲波。這是因為氣體分子的震動、轉動及自由電子共振等因素引起能量的吸收，這些躍遷能量恰巧位於太赫茲等級[1]，讓氣體在太赫茲頻段皆有其特定的「指紋」，可以作為氣體辨識的依據。讓太赫茲波通過氣體樣品，測量並分析其吸收光譜，只要該氣體的吸收譜線曾經被歸類進氣體太赫茲指紋資料庫中，我們就能辨別該氣體樣品的種類。這樣的測量方式檢測速度快、不需接觸樣品、對生物組織無害。而且許多包裝材料對太赫茲波而言是透明的，也就是說太赫茲波擁有高穿透力可以直接檢測樣品，而這樣的特性也適合用於檢測生活中可能的危機。

目前太赫茲感測技術主要有兩種感測方法，分別是 Terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) 及 Terahertz frequency-domain spectroscopy (THz-FDs)，他們各有其優缺點。前前者發射皮秒等級的超快脈衝波，通過氣體樣品後接收訊號，轉換成頻譜進行分析，可以在一瞬間取得寬頻帶的資訊；後者發射連續頻率的太赫茲波，利用掃頻的方式讓不同頻率的訊號分別通過氣體樣品，耗時較長但能有較高的頻率解析度 (Frequency resolution)。

分別使用兩種太赫茲感測方式進行實驗，並嘗試克服氣體相態較不穩定及訊號較弱的問題，利用簡單的氣體容器進行測量，避免使用市面上昂貴的氣體檢測腔體。測量出丙酮及甲醇的吸收光譜，探討 THz-TDS 和 THz-FDS 訊號的差異及原因。

(2) 研究方法

太赫茲電子鼻的氣體感測系統，使用氣體在太赫茲頻段獨特的吸收光譜辨別氣體的種類。根據比爾-朗伯定律，使用透射的訊號強度帶入吸收係數公式：

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln \left(\frac{I_{sample}}{I_{reference}} \right)$$

計算得到氣體的吸收光譜；選擇使用的太赫茲感測儀器及完成氣體樣品製備，接著架設氣體感測系統；最後做數位訊號處理得到氣體吸收譜線，即可對氣體樣品的種類進行分辨。

1. 太赫茲氣體感測系統介紹

I. Terahertz time-domain spectroscopy (TDS)

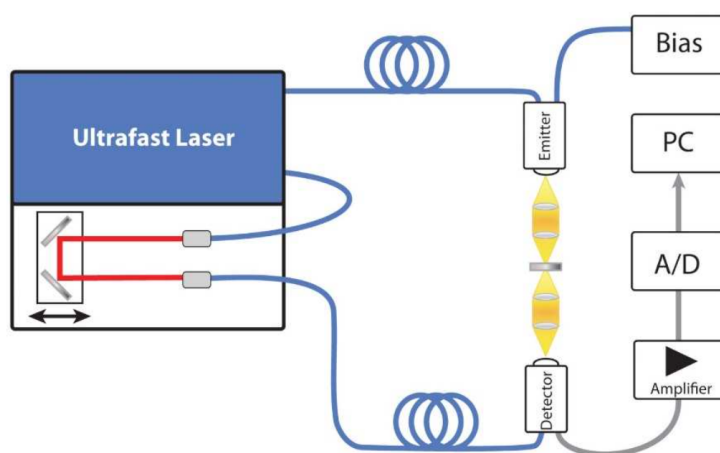


圖1 TDS 訊號產生系統示意圖

Terahertz time-domain spectroscopy 系統使用太赫茲脈衝波，測量太赫茲波通過待測物後的電場強度隨時間的振幅及相位變化。因為有其測量速度較快的特性，這份專題報告選擇 Menlo System 公司使用 ASOPS 的系統。

TDS 系統利用週期性的脈衝雷射來觸發發射器 (Emitter) 及接收器 (Detector)，透過改變脈衝雷射激發發射器及接收器的光程差來改變時間差，塑造出太赫茲波的脈衝形狀。使用 Asynchronous Optical Sampling System (ASOPS)，藉由兩個週期有微小差異的脈衝串產生脈衝間的相位差，與改變發射器及接收器的脈衝光程差有相同效果，而這樣的做法速度比使用馬達改變脈衝光程差快許多。

太赫茲波的發射及接收都是使用光導天線 (Photoconductive antenna, PCA)，這是一個低載子壽命的偏壓半導體結構。半導體材料被高速雷射激發出載子，載子經由直流偏壓驅動形成光電流；再因為材料低載流子壽命的特性，光電流會迅速消失。在這樣皮秒尺度的電性變化的情況下，便輻射出了太赫茲波。接收端的部分，接收天線具有偶極子 (Dipole) 形狀，其間隙屬微米等級。當接收天線被飛秒等級的脈衝激發時，可以作為二極體工作並進行採樣，檢測太赫茲脈衝波照近來引起的微小電流。獲得檢測樣品的在時域上的訊號後，利用傅立葉轉換來提取頻譜結果，因此 THz-TDS 系統的頻率解析度與取樣時間有關。

THz-TDS 系統為目前太赫茲感測的主流，具有高訊噪比的優勢，可測量頻率範圍也較

寬，約為0.1~2THz。此外 Menlo Systems 公司的這個產品因為使用 ASOPS，大幅提升檢測速度，但頻率解析度不高。

II. Terahertz frequency-domain spectroscopy (FDS)

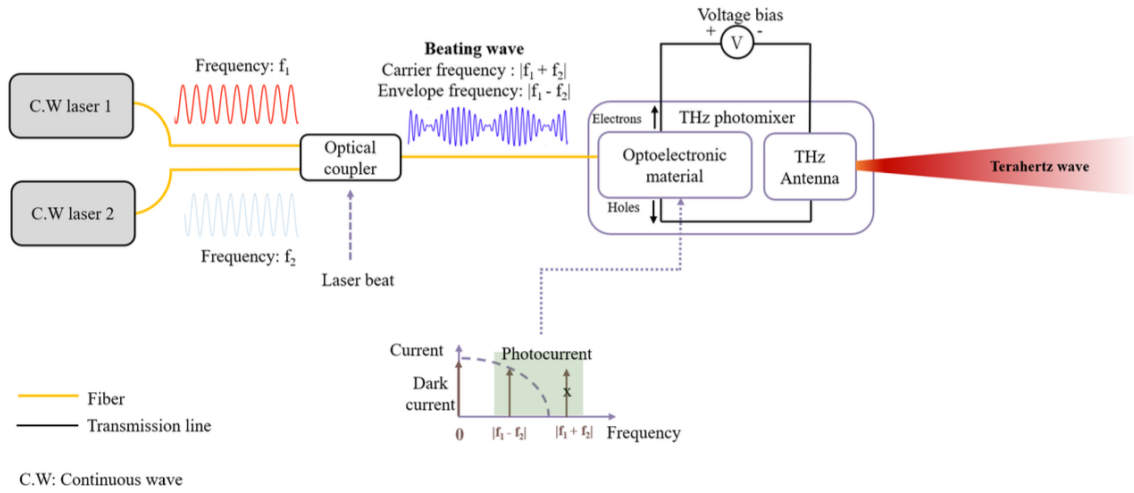


圖2 基於光混合器訊號產生系統示意圖

Terahertz frequency-domain spectroscopy 又稱作窄頻太赫茲系統，利用連續頻率的太赫茲波進行測量。為了可以得到較高的頻率解析度，這份專題使用 TOPTICA Photonics 公司的系統。

此系統利用拍頻 (Beating) 的方式產生太赫茲波，兩管激光雷射產生頻率分別為 f_1 、 f_2 的兩道光，利用光學耦合器 (Optical coupler) 將兩道雷射光耦合在一起，並將其聚焦在光導天線 (Photoconductive antenna, PCA) 上，電場公式如下：

$$\cos(2\pi f_1 t) + \cos(2\pi f_2 t) = 2 \cos\left(2\pi \frac{f_1 + f_2}{2} t\right) \cos\left(2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} t\right)$$

將 Laser 1 的波長定義在 1550nm、Laser 2 的波長定義在 1551nm，根據 $f = \frac{c}{\lambda}$ ，可以得到 $f_1 = 193.4145 \text{ THz}$ 、 $f_2 = 193.2898 \text{ THz}$ 。

因為 $\frac{f_1 + f_2}{2}$ 的頻率快至 PCA 上的電子動力 (Electron Dynamic) 無法跟隨，因此 PCA 僅能產生頻率為 $\frac{f_1 - f_2}{2} = 62.35 \text{ GHz}$ 的波，座落在太赫茲頻段 (0.1~1.2THz)。藉由分散式反饋雷射

(Distributed-feedback laser, DFB Laser) 的連續波雷射調整 f_2 的雷射頻率，就能調整由 PCA 及球面透鏡組成的發射器發射出的太赫茲波頻率。DFB 雷射由一系列互相連接的光柵結構組成，會在光場的作用下產生相應的光干涉效應，因此在輸出光的波長有高度選擇性，可以通過改變光柵結構的參數來調整輸出光波波長，進而調整 f_2 及發射器輸出的太赫茲光波頻率，其細膩度近乎為連續頻率。而太赫茲光發射後在介質中傳遞至接收器接收，而接收器同樣由 PCA 及球面透鏡組成。

TOPTICA Photonics 公司的 THz-FDS 系統因為使用 DFB 雷射而具有較高的頻率解析

度，但相對而言需要較長的檢測時間，檢測的頻率範圍也受限於 DFB 雷射的工作原理，約為 0.1~1.2THz。且因為有相位的影響，系統的訊噪比較低。

2. 有機氣體製備及氣體容器挑選

因為氣體訊號較弱的關係，目前大多使用增加路徑長以延長吸收時間來增加氣體訊號強度。例如增加路徑長度來增加揮發性氣體的訊號的光導管，或是使用多次反射來增加路徑長的環形或平行四邊形面鏡容器。這些方法除了系統複雜，對太赫茲光路的對齊要求也更高，氣體腔室的造價更是昂貴，如瑞士儀器公司 IRsweep©開發的 IRcell，便要價 30 萬台幣。

由於我使用的測量儀器具有高訊噪比的特性，且實驗目的旨在測量出吸收譜線圖形，並非定量的測量。因此在這份的專題中，使用單一路徑的方式來測量便已足夠，可以用非常簡單且便宜的裝置就能測量到氣體的吸收訊號。同時承裝樣品的容器材質也須經過挑選，必須在太赫茲頻段有高穿透性且無明顯吸收，盡可能降低容器對感測造成的影響，最終選擇聚丙烯 (PP) 材質的容器。

這份專題測量的氣體樣品為丙酮及甲醇，同時測量空氣作為對照。我也嘗試過乙醇氣體，但乙醇測量結果的太赫茲頻段幾乎無吸收，因此最後只針對丙醇及甲醇進行討論。丙酮及甲醇在常溫常壓下皆為液態，氣態的丙酮及甲醇取得困難且價格相當昂貴。因此我先購買液體的樣本，再想辦法呈現樣品的氣態形式，下方將簡述三種將樣品轉換成氣態的方式，及相應使用的容器。

I. 利用樣品本身的揮發性

將樣品放在密閉的方形保鮮盒中，靜置一段時間待其揮發。缺點為在將樣品液體倒入盒子時無法將盒子內原本的空氣排除，無法確保盒子內無其他氣體吸收，且封閉盒子內的樣品揮發情況有所疑慮。

II. 將樣品升溫提高蒸氣壓，以提升揮發率或使樣品蒸發

根據物體三相圖 (Triple phase diagram)，定壓加熱可以使樣品從液體汽化成為氣體。因為加熱會提高液體中分子的平均動能，使分子運動加劇，並且在液體表面形成蒸氣壓，當這個蒸氣壓超過了液體表面上的大氣壓時，液體就會蒸發成為氣體。同時加熱造成的蒸氣壓提高也會提高樣品揮發率，因此即便蒸氣壓沒有大於液體表面上的大氣壓，樣品汽化的情形也會增加。

由於丙酮及甲醇加熱有一定危險性，而且加熱完難以長時間維持溫度至測量完成，氣體可能變回液體，一邊加熱一邊測量也有一定難度，因此這份專題不考慮將樣品加熱成氣態的方式。

III. 將樣品減壓減少液體內部的壓力，以提升揮發率或使樣品蒸發

根據物體三相圖，定溫減壓使其低於飽和蒸氣壓可以使樣品從液體變為氣體。當液體內部的壓力降低到低於其飽和蒸氣壓時，液體中的分子就能夠脫離液體表面成為氣體。即便液體內部的壓力未低於飽和蒸氣壓，透過減壓降低液體內部的壓力也提高了揮發率，樣品汽化的情形仍因減壓而增加。考量容器的密閉性及可排除容器腔體內的大氣空氣的需求，選擇使用針筒作為減壓的樣品容器。根據理想氣體方程式：

$$PV = nRT$$

在密閉空間內，且溫度及氣體莫耳數固定的情況下，提升容器體積可以降低容器內的壓力。因此在針筒密封的情況下，將拉柄拉開增加容器體積，即可降低針筒內的壓力，提升樣品液體變為氣體的比例。

這份專題的作法是將針筒內空氣完全擠出後承裝5c.c.樣品，針筒開口使用矽膠手套的指頭處套住並用將皮筋綁緊，確保密閉性且容器中無其他氣體。拉開拉柄至50c.c.處並用卡榫固定拉柄位置，對針筒內進行減壓。為了將針筒減壓固定，設計卡榫並使用3D列印機印出，施力將拉柄拉開後將兩個卡榫分別由兩側卡入固定。這樣的作法可以確保容器內之氣體皆來自於樣品液體的相態改變，但缺點為針筒形狀皆為圓柱體，測量時太赫茲波並非垂直入射，導致樣品的吸收係數取得有瑕疵。因為圓柱體的容器會發生較多折射而非透射，以及無法確保光路通過的是圓柱體直徑，造成的路徑長不一致。但為了確保樣品純度，這份專題報告在TDS及FDS訊號探討時，選擇以針筒作為氣體容器利用減壓製備樣品。

3. 氣體感測系統架設

在做氣體感測之前，需要做系統架設及光路對齊。利用透鏡改變太赫茲波的傳遞方向並調整位置及角度將其光路對齊，讓光斑能量可以聚集在樣品上，目的為讓接收器的接收訊號越高越好，以提高感測訊號的訊雜比。

I. THz-TDS 系統架設

在TDS中，使用四個透鏡來架設系統，在發射器及接收器之間放置焦距分別為10cm、5cm、5cm、10cm的透鏡，太赫茲波通過第一個透鏡後變為平行光，在第二及第三個透鏡中間為聚焦光，將能量集中在一個點，不易從旁邊通過，藉由第三個透鏡變成平回光，再用第四個透鏡將光聚焦至接收器接收。將光路對齊得到較高的接收訊號後，氣體樣品擺放在第二及第三個透鏡中間，讓聚焦光的光斑通過氣體樣品，並標記樣品擺放位置確保每次測量時擺放位置相同。

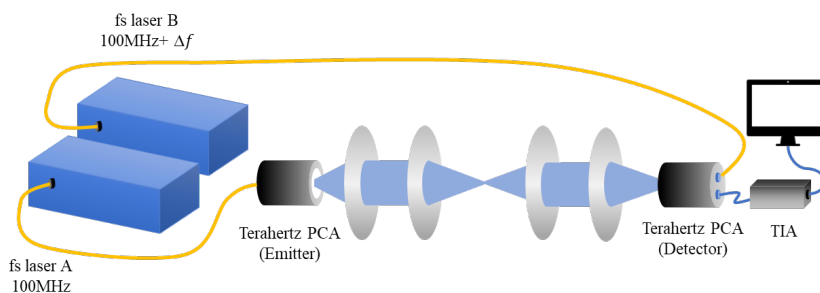


圖3 THz-TDS 系統配置圖

II. THz-FDS 系統架設

在FDS中，使用兩個透鏡來架設系統，在發射器及接收器之間放置兩個焦距為10cm的透鏡，讓太赫茲波在透鏡之間為平行光。這個系統的光斑大小比較小，因此沒有使用四個透鏡架設系統產生聚焦光，這樣可以大幅降低系統架設的難度，並提高訊號的強度。將光路對齊得到較高的接收訊號後，將氣體樣品擺放在兩個透鏡中間，讓太赫茲光通過氣體樣品進行反應，最後由接收器接收訊號。並標記樣品擺放位置，確保每次測量時樣品擺放位置相同。



圖4 THz- FDS 系統配置

4. 吸收係數計算原理及訊號處理方式

在這份專題報告中，測量目標是找到丙酮及甲醇在不同頻率時的吸收係數圖形，吸收係數描述物質在特定頻率對電磁波的吸收程度。根據比爾-朗伯定律 (Beer-Lambert law)，強度為 I 的電磁輻射經過介質後，發生吸收反應會產生強度為 I_0 的透射輻射，吸收係數的計算方式如下：

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln \left(\frac{I_{sample}}{I_{reference}} \right)$$

其中 I_{sample} 為待測樣品的透射訊號強度， $I_{reference}$ 為空的樣品容器透射訊號強度， d 則為樣品腔體的側向寬度，即為電磁波通過樣品的路徑長。需進行兩次測量，得到樣品的數據及真空容器的數據作為參照，才能經由處理得到樣品的吸收譜線。

THz-TDS 系統測量出的數據，使用 Menlo Systems 公司系統內建的數據處理程式處理得到吸收係數的資料。該程式做的就是將 THz-TDS 系統得到的時域數據利用傅立葉轉換得到頻域的數據，並將 Sample 及 Reference 的在頻域上的數據相除取對數，再除上腔體內徑，得到吸收頻譜。

THz-FDS 系統測量得到的原始數據會是劇烈震盪的弦波訊號，這是因為含有建設性干涉及破壞性干涉的訊號及相位的不同所造成。而吸收係數與相位並無關聯，因此用邊緣分析 (Fringe analysis) 的方式做包絡萃取 (Envelope extraction)，原理是做希爾伯特轉換 (Hilbert transform)，使用的窗函數寬度為 20，得到振幅的數據，再使用 MATLAB 進行吸收係數的計算。

(3) 研究結果

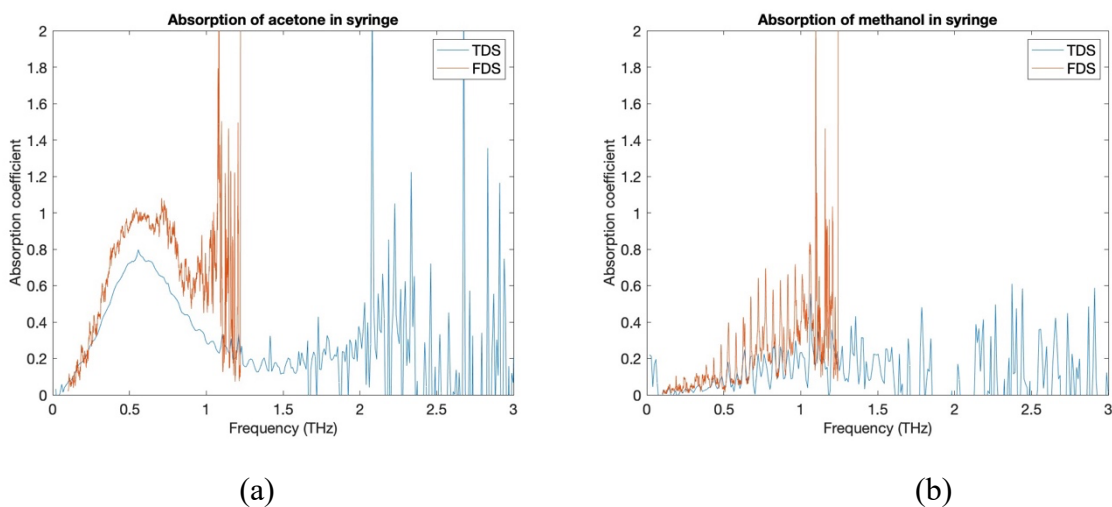


圖5 使用 THz-TDS 系統及 THz-FDS 系統的測量結果

(a)丙酮使用兩種系統的吸收係數比較圖 (b)甲醇使用兩種系統的吸收係數比較圖

測量結果發現丙酮的吸收係數圖形在0~1THz 之間有一個明顯的吸收峰 (Absorption peak)，與文獻資料相符；而甲醇則無明顯的吸收峰，且在0~0.5THz 之間幾乎無吸收。因為使用的 THz-TDS 及 THz-FDS 系統測量的頻率範圍限制約在0.1~2THz 及0.1~1.2THz，超出測量範圍的訊號容易隨不可控因素影響，參考價值較低，因此不討論其圖形變化差異。

比較兩種系統的測量結果，發現 THz-TDS 的訊號圖形較平滑，而 THz-FDS 的圖形儘管已經經過邊緣分析處理，仍有許多上下起伏的情況。這是因為 THz-FDS 系統測量的為使用連續頻率掃頻，不同次測量時取樣時間間隔雖為固定，卻無法確保每次測量取樣到的頻率點為相同。由於吸收係數的計算方式為在同頻率時的 Sample 與 Reference 訊號強度相除，因此些微的頻率偏移相除下來的結果可能會有小量誤差，造成數據出現上下震盪的情形。

進一步分析，使用的 THz-TDS 系統的頻率解析度為大約為0.01THz，而 THz-FDS 系統的頻率解析度為大約為0.0006THz。這部分在感測時就能發現，使用 THz-TDS 系統測量一個樣品時間約為秒等級，而使用 THz-FDS 系統測量一個樣品時間需要數分鐘。在耗時更長的情況下，THz-FDS 系統可以測量到更小的頻率解析度。因此若待測物的吸收峰較為密集，或對於吸收譜線頻率解析度要求較高，要觀察比較細微的吸收譜線，則使用 THz-FDS 系統測量較為合適。

此外，觀察甲醇使用 THz-FDS 測量的圖形可以發現，在400~1000GHz 的地方有週期約為50GHz 的週期性的峰值。這是法布立—佩羅現象 (Fabry-Perot Effect)造成的影響，太赫茲光在針筒腔體及塑膠管壁的介面發生不同次數的反射，最後穿透出被接收器所接收。計算造成這類重複波形的反射路徑長：
$$\Delta f = \frac{1}{\Delta t} = \frac{c}{2nL} \Rightarrow L = \frac{c}{2n\Delta f} = \frac{3 \times 10^8 (\frac{m}{s})}{2 \times 1.49 \times 50 \times 10^9 (s)} = 0.002013(m)$$
，與針筒塑膠管壁的厚度大致相同，n 為聚丙烯折射係數，驗證確實為法布立—佩羅現象。而丙酮的圖形並未出現此狀況是因為丙酮在這些頻段的吸收較強，而使得經過多次反射的訊號已經太弱至無法被觀測；甲醇的吸收較弱，法布立—佩羅現象影響的訊號仍有一定的強度，可以在吸收係數圖形上被清楚觀測。

接著，因為使用 THz-TDS 的系統測量丙酮的吸收係數圖形有較明顯的吸收峰，這份專題使用此系統測量丙酮使用不同的氣體製備方式及不同樣品腔體形狀的吸收係數。發現使用方形盒子承裝的丙酮仍能觀察到0~1THz 之間吸收峰，雖然訊號較不平滑，猜測可能是盒子內原本無法被移除之空氣影響，但還是能大致辨別丙酮吸收。而針筒承裝之丙酮雖在0~1THz 之間吸收峰訊號平滑，但在大於2THz 的訊號雜訊較高。這部分無需討論，因為 THz-TDS 的系統測量的頻率範圍限制約在0.1~2THz，也就是大於2THz 的訊號的參考價值較低。

三、 結論

歷經10個月的專題研究，我在實驗室的支持下架設出太赫茲電子鼻的氣體感測系統，並且測量出丙酮在太赫茲頻段的指紋：於0~1THz 處有一個明顯的吸收峰，與文獻資料相符，且不論使用何種系統、氣體製備方式、承裝氣體容器形狀，皆能得到相似的圖形輪廓。而

甲醇則無明顯的吸收峰，可對照得知丙酮的吸收峰確實來自丙酮，而非系統或外界因素影響。比較不同系統測量到的吸收譜線，實驗結果的特性與兩系統的基本原理造成的影響可以相互應證。THz-TDS 系統使用脈衝波，測量結果的圖形較平滑、可測量頻寬較寬，但頻率解析度較低，無法測量出吸收譜線的細節；THz-FDS 系統使用連續頻率的波進行掃頻，測量結果的圖形有較多起伏、可觀測頻寬有限，但頻率解析度較高，能觀察到較細微的吸收譜線圖形。

未來期望可以在太赫茲電子鼻的氣體感測領域繼續鑽研，除了拓展其他的氣體指紋，也希望可以尋找其他精進測量系統的方式，例如使用 Fiber stretcher 提升 THz-FDS 系統的訊雜比，或利用多重反射氣體槍室 (Multipath cell) 解決氣體訊號薄弱的問題進行定性測量，將太赫茲電子鼻的氣體感測系統做得更好更完善。

四、 心得感想

加入實驗室初期，我得以在實驗室各組別的領域進行探索，做文獻及學術期刊的研讀及討論，同時跟著上一屆專題生做研究，先找尋自己專題的方向。一段時間後，我與指導教授楊尚樺老師進行一次個人面談，討論並決定出我的專題題目。在專題研究的上半年我們兩週與老師進行一次小組討論回報進度，下半年我每週與 Spectroscopy team 的組長進行討論，組長與老師報告後會告訴我老師給的建議及回饋。同時參加實驗室一週一次的全體會議，每學期都有許多上台報告的機會訓練表達能力。楊尚樺老師指導學生的方式非常開明，不會要求我要做什麼，也不會直接告訴我要做什麼，而是讓我進行很多思考，也對自己的研究保持興趣及好奇，能夠全面了解問題樣貌。

這份專題是我一個人一組，並且實驗室除了我做過氣體感測的只有前面兩位專題生，在研究的道路上有許多需要自己開墾。但在實驗室我也受到很多學長們的幫助，一開始跟著上一屆做電子鼻的專題生謝明翰學長及蔡昀諺學長做多重路徑氣體腔室，苗軒維學長及高浚育學長教導及後續協助我架設太赫茲系統光路，吳哲旻學長及鄭嘉晉學長作為 Spectroscopy team 的組長，給我很多專業知識的幫助及實驗方向的引導。有 YRG 實驗室的支持，讓我站在太赫茲知識巨人的肩膀上，成功完成太赫茲電子鼻的系統架設。

在多次的手作實驗中，我學會架設並對齊太赫茲系統的光路，使用兩種太赫茲感測技術的儀器測量並比較結果，結合儀器的基本工作原理分析其中訊號差異及原因，也對太赫茲感測系統有更深刻及全面的了解。除了太赫茲系統的知識技術外，在專題研究的過程中我也收穫解決問題的能力，設計一個氣體感測系統，想辦法克服氣體訊號微弱及氣體樣品製備的困難，以及太赫茲波本身擁有較多的雜訊干擾。更體會到合作的重要，在楊尚樺老師的實驗室與學長們進行討論，吸取別人的經驗避免掉很多繁瑣歪路。