

國立清華大學 電機工程學系

實作專題研究成果摘要

The impact of modulation depth
in terahertz spatial light modulators

太赫茲空間光調製器調製深度的影響

指導教授：國立清華大學 電機工程學系 楊尚樺老師

組員姓名：國立清華大學 工學院學士班 王奕程

國立清華大學 工學院學士班 張育嘉

研究期間：113年2月19日至113年11月25日止，共9個月

Abstract

Terahertz radiation is well-suited for imaging applications due to its ability to penetrate most materials without causing damage. However, terahertz transmitters and receivers are extremely expensive and difficult to miniaturize, which significantly limits their application scope.

Compressed sensing imaging will be a key technology to solve the problems of high cost and slow speed in terahertz imaging. By making reasonable assumptions about the signal to reconstruct the signal source and using a substrate capable of generating random patterns to create samples, the final image can be reconstructed using algorithms.

A good imaging system is primarily determined by **modulation depth**, **modulation speed**, and **spatial resolution**. We use **digital light processing (DLP)** to create a spatial light modulator. By utilizing the photoelectric effect to generate conductive patterns on a semiconductor substrate, we can control the transmission of terahertz waves, achieving better modulation speed. After comparing three common intrinsic semiconductor materials—**silicon (Si)**, **germanium (Ge)**, and **gallium arsenide (GaAs)**—we found that **germanium** offers the best modulation depth and the widest applicable wavelength range, which is why we chose germanium as the substrate material.

However, germanium still has limitations in terms of spatial resolution and modulation speed. Therefore, we decided to modify the fabrication method of germanium, using a special process to create nano-like structures on its surface. We then used different systems to measure its modulation speed and modulation depth, and finally analyzed and compared the results using Python.

摘要

太赫茲光因為有著能穿透大部分物質且不會對物質造成破壞的特性，因此很適合拿來進行成像方面的應用。但是太赫茲發射器及接收器十分昂貴且無法縮小，導致應用領域十分受限。

壓縮感知成像將是解決太赫茲成像成本過高及速度過慢的一大關鍵技術。藉由對訊號的合理假設來重建訊號源，搭配上能產生隨機圖案的基板製造一個個樣本，最後運用演算法重建影像。

一個好的成像系統主要是由調變深度、調變速度以及空間解析度來決定。我們使用數位光處理來製作空間光調變器，運用光電效應在半導體基板上生成導電圖案來操控太赫茲光傳輸，便可以得到較好的調變速度。同時對比矽、鍺、砷化鎵三種常見的本質半導體材料，鍺有著最好的調變深度以及最大的波長應用範圍，因此我們選擇鍺作為基板材料。

但是鍺仍然有空間分辨率和調變速度的限制，因此我們決定改變鍺的生成方法，運用特殊的製程方法使其產生表面產生類奈米結構的沉積，並運用不同的系統來測量其調變速度及調變深度，最後使用 Python 進行分析及比較。

目錄

1. 背景
 - 1.1 太赫茲光
 - 1.2 太赫茲成像
 - 1.3 數位光處理
 - 1.4 奈米結構表面
 - 1.5 製程方法選擇
2. 實驗裝置
 - 2.1 調變深度測量
3. 實驗結果
 - 3.1 本質半導體與奈米結構之比較
 - 3.2 不同製程之比較
4. 結論
5. 參考文獻
6. 心得與未來規劃

1. 背景

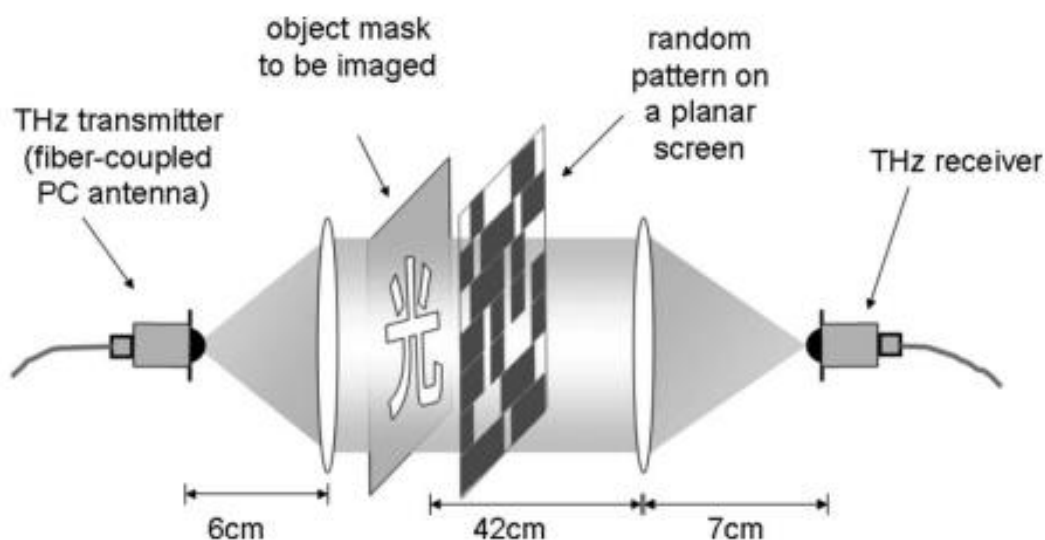
1.1 太赫茲光

太赫茲光(Terahertz)為頻率 0.1 到 10 THz 間的電磁波，波長約為 30 μm 至 3 mm，介於微波與紅外線之間且同時擁有兩者的特性。與紅外線相同的是能夠引發材料內的能量躍遷，並通過每個物質的獨特光譜來進行辨識。與微波相同的是其可以穿透許多非導電材料，來實現非破壞性成像，而且因為波長比微波短，可以得到更好的空間解析度。因此，太赫茲光可以做為材料分析以及成像處理的工具。此外太赫茲元件以及使用太赫茲頻段的 6G 通訊也是太赫茲光的重要應用。[1]

1.2 太赫茲成像

太赫茲獨特的穿透性質可以運用在成像上，但是其發射器(Transmitter)以及接收器(Receiver)製作成本極高，所以使用多組發射器及接收器組成陣列來操作是不切實際的。但如果改成使用一組發射器及接收器來進行機械掃描成像，雖然可以成功保留檢測靈敏度高的優點，但同時會造成操作速度大幅降低，應用價值大打折扣。

為了增加操作速度便出現了一種成像方法稱為壓縮感知成像(Compress Sensing) [2]，這種方法只需運用一組發射器及接收器，主要是藉由對訊號的合理假設來重建訊號源。中間需要使用特殊圖形的光罩搭配隨機的圖案的平面螢幕，光罩如同基底向量，藉由訊號對於基底向量的投影，搭配不同隨機圖案製造一個個樣本，最後運用演算法進行疊加，便可以完成成像。



圖(一) 壓縮感知成像裝置圖[2]

因為先進行了合理的假設，代表最後所需的樣本數遠少於機械掃描等其他成像方法，因此可以大幅增加偵測速度。然而實際上速度的變化量十分有限，因為消耗了過多的時間在切換不同隨機圖案，導致整體效率不如預期。

1.3 數位光處理

壓縮感知成像中，空間光調變器為決定其性能的關鍵，除了上述提到的調變速度(modulation speed)外，調變深度(modulation depth)及空間解析度(spatial resolution)也是判斷性能的重要參數。調變速度越快表示成像速度越快，調變深度越深則表示開與關有越大的區別，空間解析度越好則表示像素之間的區隔越明顯，後兩者能使成像出來越接近實際情況。[3]

我們使用數位光處理(digital light processing)來製作空間光調變器，這個方法是運用光電效應在半導體基板上生成導電圖案來操控太赫茲光的傳輸，只要入射光能克服半導體基板的能隙，便可以產生自由電子，進而運用自由電子對入射光進行破壞性干涉，達到吸收太赫茲光的目的，而調製深度會隨著照明波長增加而增加的特性更能凸顯太赫茲光的優勢。[3]

半導體材料的選擇也是一大關鍵。對比矽、鍺、砷化鎵三種常見的本質半導體材料，鍺有比矽更大的吸收係數、擴散係數，因此有著較好的調變深度，另外鍺的能隙為 0.66(eV)、矽的能隙為 1.11(eV)，由普朗克關係式(Planck relation): $E=h\nu$ 可知，鍺可以使用頻率較小的光來達成光電效應，也代表鍺比較適合用於太赫茲光的應用上。

砷化鎵雖然有著三者中最好的空間分辨率以及調變速度，但是因為其載流子壽命極短，因此上述的好性質皆需要高功率的光照才能達到效果，成本效益並不高。

1.4 奈米結構表面

然而鍺仍然有其限制，它的空間分辨率以及調製速度表現都不好，這是因為鍺的擴散長度太長，導致產生的光子由橫向擴散掉，實際累積到表面的光子比預期還要少導致沒有達到夠好的效果，因此便有了平臺陣列表面(mesa-array surface)的想法出現 [3]。運用製程去製造次微米孤立深溝結構的鍺，只要此結構比擴散長度來得更小，便能有效得抑制橫向擴散的能力，使原本就有調製深度優勢的鍺，進一步獲得調製速度及空間分辨率的優勢，換句話說，如果表面上的鍺能形成奈米級的結構，就能成為符合壓縮感知成像需求的基板，克服原先切換隨機圖案耗時的致命缺點。

因此，本專題的主要目的就是要尋找適合的半導體製程來製作奈米結構表面的鍺，以改良壓縮感知成像的各項能力。

1.5 製程方法選擇

在選擇製程方面我們參考了幾篇論文進行比較，並且運用吸收係數(Absorption Coefficient)與調變深度成正相關的特性，尋找最適合的方法。因此我們使用 WebPlotDigitizer 作為輔助來找出在論文中的測量資料圖在 1550 nm 的太赫茲光照射時，何種方法可以得到最好的吸收係數。

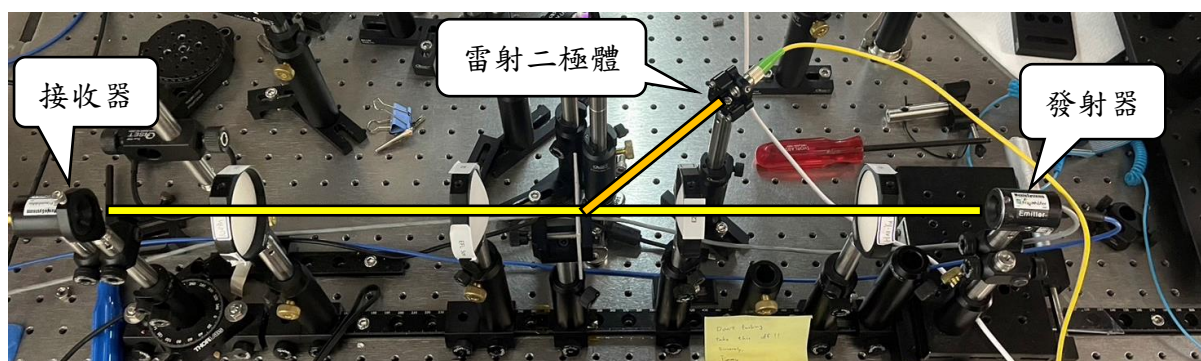
| | RIE[4] | RF-PECVD[5] | PVD[6] | TE[7] |
|------------------------------|----------------------|-------------|---------|---------|
| Absorption Coefficient(1/cm) | 367.9 | 13720 | 2800 | 3736 |
| Absorbance(%) | 99.08 | 61.72 | 19.84 | 7.20 |
| Length | 175(μm) | 700(nm) | 790(nm) | 200(nm) |

表(一) 各種製程方法鍍鍍在矽基板上的吸收度比較

由上表可以發現電漿輔助化學氣相沈積(RF-PECVD)以及熱蒸鍍(TE)在吸收係數的表現較好，因此便選擇這兩種製程方法將鍍鍍在矽基板上。

2. 實驗裝置

2.1 調變深度測量

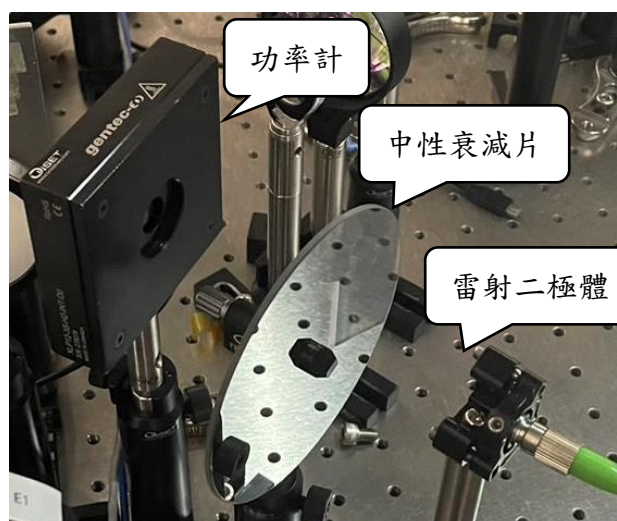


圖(二) 太赫茲時域光譜系統
(橘色線與黃色線分別為種子光與太赫茲脈衝的路徑)

本研究進行調變深度量測所使用的裝置為太赫茲時域光譜系統(Terahertz time-domain spectroscopy system, THz-TDS system)，由太赫茲發射器(Photoconductive Antenna, PCA)射出太赫茲脈衝(Terahertz pulse)，通過兩個透鏡、中間有孔洞的鐵片、兩個透鏡後，由太赫茲接收器(另一個 PCA)接收，只要將我們要測量的半導體基板對齊洞口黏在鐵片上，此裝置就可以用於量測太赫茲光的時域訊號強度。接收器所接收到的數據會進入 Menlo 系統，我們將接受到的訊號抓取 1000 次計算其平均值與標準差來進行數據處理。

此外為了使我們的半導體基板受光照，以光電效應產生光電子，因此須搭配中心波長 1550 nm 的雷射二極體做為種子光(對應我們尋找吸收度的標準)，運用電源供應器調整功率(200~2350 mW)，測量受各個功率照射下半導體基板之太赫茲光時域訊號強度。

因為實驗室的電源供應器有最小只能提供 200mW 的限制，因此我們將電源供應器控制在提供 200mW 的狀態，運用中性衰減片(ND filter)製造小於 200mW 的功率。為了更精確地知道雷射光強度，在中間放置功率計(Power Meter)以量測功率。



圖(三) 低功率量測之太赫茲時域光譜系統

而當我們得到 Menlo 系統整理完的太赫茲光強度-時間的數據後，用其來計算調製深度，公式如下：

$$MD_{TD}(I) = 1 - \left(\frac{\text{Peak-to-Peak Electric Field Signal, at Intensity } I}{\text{Peak-to-Peak Electric Field Signal, at Dark State}} \right)^2 \quad [8]$$

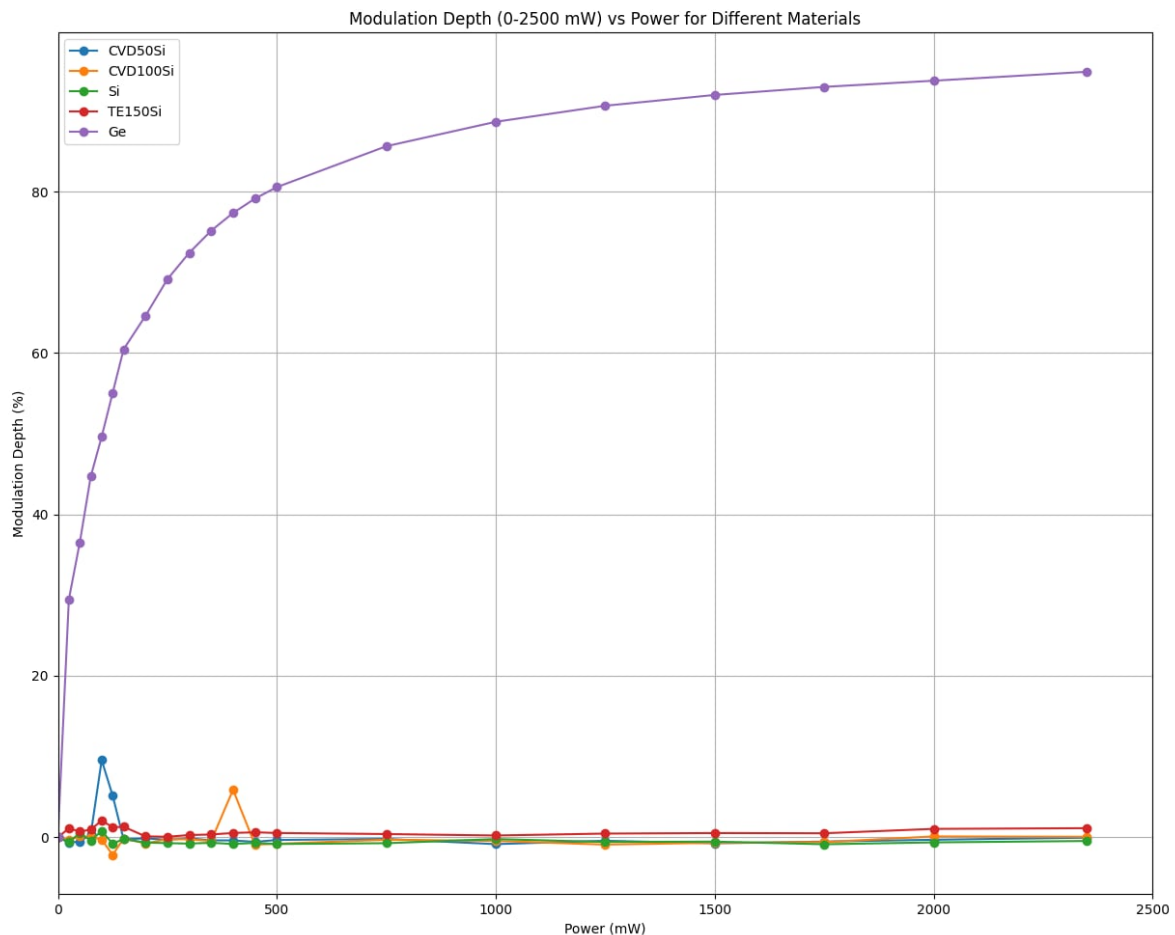
$MD_{TD}(I)$ 為時域(Time Domain)下的調製深度(Modulation Depth)，只需使用半導體基板激發後與激發前的電場強度相除且平方後便可得到能通過基板的強度比例，拿一減掉強度比例便可得到調製深度。

3. 實驗結果

以表(一)來說，RF-PECVD 擁有最好的吸收係數，因此只要能鍍出緻密的鍍薄膜於矽基板上，當薄膜的厚度越厚時便會有越好的調製深度。我們選擇到國立中山大學貴重暨共用儀器中心租借高密度電漿化學氣相沉積系統(HDPCVD)，是我們找到最接近 RF-PECVD 且能提供鍍進入製程的儀器。不幸的是當製程至厚度 120 nm 左右時，會發生鍍薄膜與矽基板剝離的現象，使我們最終只能做出 50 nm 以及 100 nm 兩片試片，無法達到 700 nm 的厚度[5]。

3.1 本質半導體與奈米結構之比較

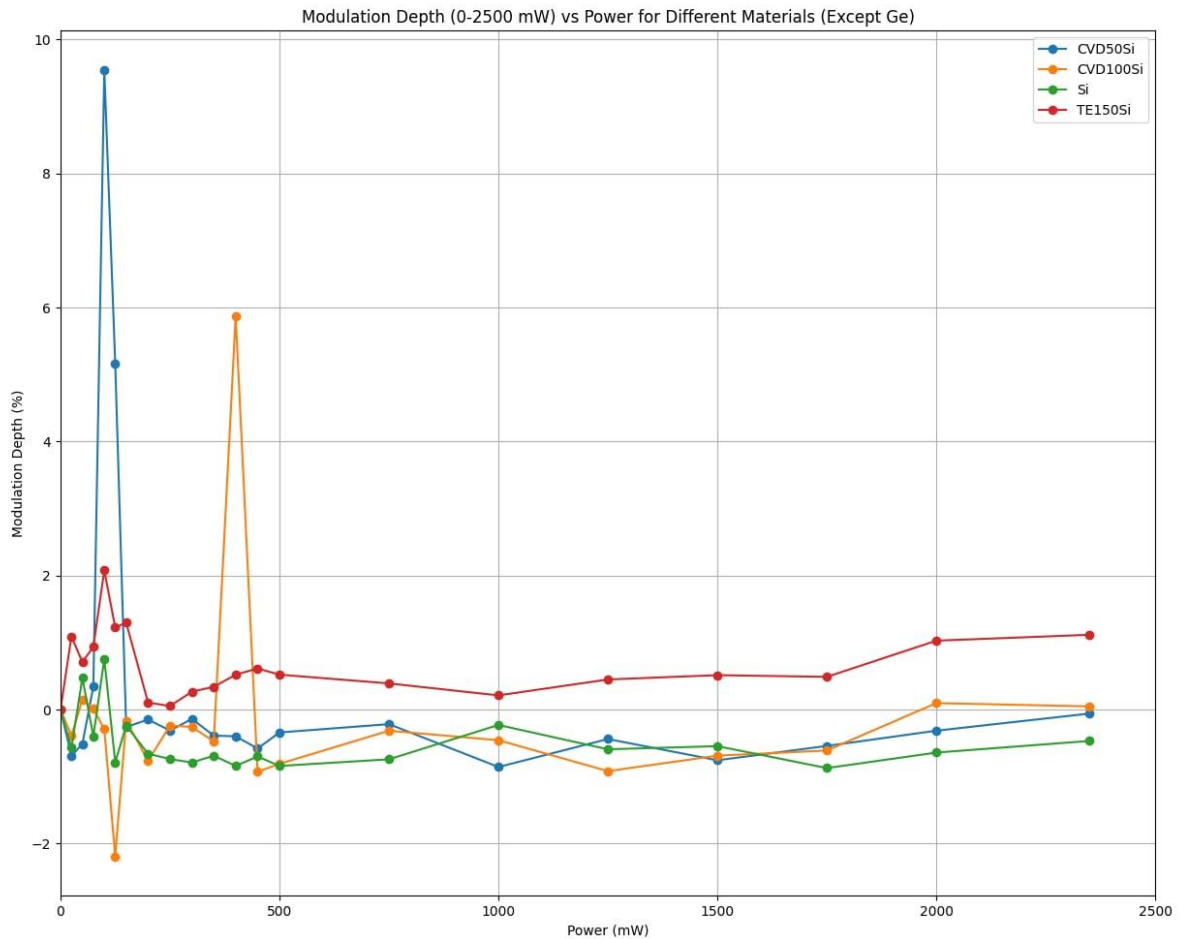
由圖(四)可以發現不論是使用 PECVD 的 50 nm、100 nm 或是 TE 的 150 nm，調製深度與本質矽相比提升的量非常有限，表示鍍在這樣的厚度下並不足以讓其展現出本質鍍的調製深度特性。



圖(四) 調製深度-雷射能量圖

3.2 不同製程之比較

由圖(五)可以發現，對比 PECVD 50 nm 與 100 nm 兩種厚度，調變深度有些微的提升，證明只要能鍍出更厚的鍍薄膜，便有機會得到更好的調變深度。同時對比 TE 150 nm，可以發現雖然此製程的所鍍出基板吸收度較差，但是只要 150 nm 的時候便有的比 PECVD 製程極限更好的調變深度，更有潛力在不剝離的情況下鍍出更厚的鍍薄膜，去追求更高的調變深度，盡可能接近本質鍍基板的特性。



圖(五) 調製深度-雷射能量圖(矽基板)

4. 結論

我們製作出來的空間光調變器(PECVD 50 nm、PECVD 100 nm、TE 150 nm)能證明鍍厚度越厚便可以得到越好的調製深度，但是受限於沒有辦法達到所設想的厚度，因此調製深度的表現欠佳，無法表現出本質鍍的優良調變深度，對比本質矽來說提升非常有限。可能的原因有:矽與鍍之間的晶格特性差異過大、製程過程太慢於表面累積過度氧化矽、矽基板沒有做完整 RCA clean 導致其他雜質累積抑或鍍厚度不足導致波長應用範圍過小。就算有機會克服上述問題，也會導致製作成本大幅上升，應用價值大減。

後續會在前往其他實驗室測量調變速度，預期可以得到比本質鍍更好的調變速度，但同時也會犧牲過多原先的優勢，並不是一個好的權衡。

5. 參考資料

- [1] Stuart Thomson “Terahertz Molecular Lasers - Introduction & Applications” Photonics, 2021
- [2] Wai Lam Chan, Kriti Charan, Dharmpal Takhar, Kevin F. Kelly, Richard G. Baraniuk, Daniel M. Mittleman “A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing” AIP, 2008
- [3] Akash Kannegulla, Md. Itrat Bin Shams, Lei Liu, Li-Jing Cheng “Photo-induced spatial modulation of THz waves: opportunities and limitations” Optica, 2015
- [4] Toni P. Pasanen, Joonas Isometsä, Moises Garin, Kexun Chen, Ville Vähänissi, Hele Savin “Nanostructured Germanium with >99% Absorption at 300–1600 nm Wavelengths” Wiley, 2020
- [5] Ghada Dushaq, Mahmoud Rasras, Ammar Nayfeh “Low temperature deposition of germanium on silicon using Radio Frequency Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition” Elsevier, 2017
- [6] A.A. Akl, H. Howari “Nanocrystalline formation and optical properties of germanium thin films prepared by physical vapor deposition” Elsevier, 2009
- [7] Vito Sorianello, Lorenzo Colace, Nicola Armani, Francesca Rossi, Claudio Ferrari, Laura Lazzarini, Gaetano Assanto “Low-temperature germanium thin films on silicon” Optica, 2011
- [8] Chia-Ming Mai, Mohamed Hammad Elsayed, Yu-Chun Wang, Yu-Lin Lin, Yin-Tze Lin, Ho-Hsiu Chou, Shang-Hua Yang “Organic Semiconductors as High-Speed Photoconductive Terahertz Spatial Light Modulators” IRMMW, 2021

6. 心得與未來規劃

這次專題學習到非常多在單純的課堂上學習不到的東西，像是在非常多的論文中努力尋找自己所需要的資訊並加以利用或延伸發想，或是學習如何架設光路，同時學習到非常多關於製程的知識。這次最大的挑戰便是在尋找製程機台，雖然尋找到不少符合我們要求的機台，但是大部分都受限於機台為了保持乾淨度，只提供鍍矽而沒有提供鍍鍍或是沒有 GeH_4 作為鍍膜原料，因此我們一路找到國立中山大學貴重暨共用儀器中心才找到最相似的機台。但此時又受限於我們知識量與經驗不足，導致最後無法鍍出我們預想的厚度，也讓我們決定去修習更多相關課程，使未來研究能夠有更多的主控權以利我們達到腦中所構想的結果。

儘管專題已經結束，我們仍會去別的實驗室租借儀器來測量基板的調變速度，證明我們所預期的調變速度真的有得到一定程度的改善。有機會的話也希望能架設壓縮感知影像的完整裝置並測量其空間解析度，從中學習自己的研究過程還有哪些部分可以多加改善，吸收成為我們未來做研究的養分。