

國立清華大學

電機工程學系

專題報告摘要

應用 Tinkham Equation 進行太赫茲光譜學用於電性檢測分析

之適用範圍討論

**Discussion on Range of Validity on Applying Tinkham Equation for
Conductivity Analysis with THz Spectroscopy**

專題領域：電子領域

組 別：A503

指導教授：楊尚樺

組員姓名：趙子詮

研究期間：113 年 9 月 1 日至 113 年 4 月 24 日止，共 8 個月

摘要

本研究以 generalized equation 作為理論正確的基準模型，深入探討 Tinkham equation 在太赫茲光譜學中應用於薄膜電導率檢測的適用性。透過模擬不同薄膜厚度 (1–1000 nm)、載流子濃度與遷移率的參數組合，量化 Tinkham equation 的預測誤差，並以相對誤差低於 1% 作為可接受標準。結果顯示，Tinkham equation 僅在薄膜厚度遠小於電磁波波長與集膚深度，且電導率處於較低範圍時具備高度準確性。當厚度超過約 245 nm 或導電性提高時，誤差迅速增大，導致模型失去預測效能。

此外，模擬結果亦顯示，參數網格密度越高可有效減少誤差圖的鋸齒狀分佈，提升模擬的平滑性與可信度。以半導體產業中常見的多晶矽薄膜為例，其厚度約為 30–100 nm，電導率範圍為 10^2 – 10^4 S/m。本研究結果進一步指出，Tinkham equation 僅適用於其中低導電範圍 (10^2 – 10^3 S/m)，顯示其應用範圍受限。

總結而言，Tinkham equation 並非普適模型，應根據預期材料參數進行模擬驗證以確認其適用性。本研究明確界定其應用邊界，為未來使用太赫茲光譜法量測半導體薄膜電性提供了明確參考依據。

Abstract

This study investigates the applicability of the Tinkham equation in determining the electrical conductivity of thin films via terahertz spectroscopy, using the generalized equation as the theoretical benchmark. Simulations across a range of film thicknesses (1–1000 nm) and conductivities reveal that the Tinkham equation yields accurate results (error <1%) only when the film thickness is significantly less than the terahertz wavelength and skin depth, and the conductivity remains low. Beyond a thickness of approximately 245 nm or at higher conductivities, the error increases markedly, indicating the limitations of the Tinkham equation under these conditions. For instance, in semiconductor applications involving polycrystalline silicon films with typical thicknesses of 30–100 nm and conductivities ranging from 10^2 to 10^4 S/m, the Tinkham equation is applicable primarily within the lower conductivity spectrum (10^2 – 10^3 S/m). These findings underscore the necessity of pre-assessing material parameters to ensure the validity of the Tinkham equation in terahertz spectroscopic analyses of thin films.

背景與動機

半導體電性測量需求

在現代社會中，半導體產業無處不在，日常生活中的手機電腦、工廠中的生產線機器中的控制晶片，車用電子，電子看板，無論在哪個領域都可以看到半導體的蹤跡，近年來隨著人工智慧的發展，半導體晶片的需求不斷提高，對於品質管控的需求也隨之上升。

其中，半導體最受重視的是其電導率(electrical conductivity)：從學術界的觀點來看，電導率可以看出新型材料中載流子動力學和傳輸活動；而對於產業來說，要如何精準控制晶圓的電導率對於大規模生產是非常關鍵的部分。所以對於兩個方向來說，我們都需要一些方法對半導體材料進行非破壞性且精確的測量。

半導體薄膜的重要

半導體薄膜在現代電子與太陽能產業中扮演著關鍵角色，根據不同應用需求，薄膜必須具備不同的功能和電性特徵。薄膜的電導率是衡量其電性能的重要指標，它直接影響到半導體元件的性能和效率。在晶體管中，薄膜主要用作閘極氧化層，其厚度和質量對 MOSFET 的開關速度、漏電流及功耗有直接影響。隨著製程的進步，薄膜的厚度縮小至納米級別，這使得控制其電導率變得尤為重要，因為電導率的變化會顯著影響晶體管的開關特性及整體電路的效能。

在現代集成電路中，薄膜材料不僅用於連接電路，還負責在不同層之間提供隔離，防止信號干擾和電路短路，確保電路在高密度集成的情況下穩定運行。薄膜的電導率在這裡的作用主要體現在其對信號傳輸和穩定性的影響，選擇合適的薄膜材料可以大幅提高集成電路的效能。

在太陽能產業中，薄膜太陽能電池使用的材料能夠高效捕捉光線並轉換為電能。薄膜的電導率對光電轉換效率至關重要，因為較高的電導率有助於減少載流子的散射，提高電流的輸送效率，從而提升太陽能電池的性能。

薄膜電導率的控制對於半導體元件的性能具有直接影響，因此，能夠準確且大規模地測量薄膜電導率是確保這些元件高效運行的關鍵。在實際製程中，通過精確測量每一層薄膜的電導率，可以實時調整製程參數，確保元件的性能達到預期，並提高生產的良品率和穩定性。

半導體電性的接觸性測量

目前最常見用來測量半導體電性的方法是應用霍爾效應(Hall effect)的接觸性測量方法。霍爾效應是藉由外部磁場作用在載流子上的勞倫茲力(Lorentz force)產生的霍爾電壓有關。雖然使用霍爾效應進行測量已經是相當成熟且能廣泛適用的測量方法，能夠提供半導體材料內的載流子濃度(concentration)和電子遷移率(mobility)，但是其依賴歐姆接觸測量霍爾電壓，使得此測量方法的侷限性很大：其一是尋找新型材料的歐姆接觸極具挑戰性，現在也還並未找到萬用的接觸；其二是在材料檢測時，需要再表面製造「接觸」，而這種破壞性的檢測方法註定無法進行全面檢測；另外，在進行多層結構的電導率量測分析時，因為層間耦合、界面效應、電流分佈、以及材料異質性等因素，使得霍爾效應測量每一層的電導率變得十分困難。

半導體電性的非接觸性測量

因為霍爾效應的許多限制都來至於其接觸測量的性質，所以發展其他非接觸性測量的方法突破其限制。其中，渦流法(Eddy current method)和時間依賴性電荷測量(Time-dependent charge measurement)是非接觸性量的兩種主流方法。前者是利用交變磁場在導電材料中引發渦電流，利用這些渦電流的分布得知樣品的電導率；後者則是透過施加一個脈衝電壓，在樣品中注入特定電荷，隨後測量在一定時間範圍內，這些電荷的流失或衰減，依據這些數據推算出電導率。雖然這兩種都是非接觸式測量電導率的方法，渦流法對於導電度較低的材料效果較差，而時間依賴性測荷測量則是所需時間較長。

太赫茲光譜學的電性分析

在此背景下，使用頻率 1THz($1\text{THz} = 10^{12}\text{ Hz}$)電磁波的太赫茲光譜學進行測量，在過去 30 年，已經成為測量半導體電導率中，很有前途的工具。其在測量電導率的方面有以下幾個優勢：

- 1. 非接觸測量：**太赫茲光譜學是一種遠端且非破壞性的感測技術，能夠進行非接觸式量測。而且，由於太赫茲輻射的光子能量極低(1THz 時約 4meV)，遠遠低於大多數半導體的帶隙能量(bandgap energy)，因此太赫茲測量對於樣品平衡狀態造成的影響可以忽略，幾乎不會損壞樣品。
- 2. 高定量分析準確度：**太赫茲波的頻率範圍許多種類半導體的等離子體頻率(plasma frequency)重疊，使得太赫茲波在半導體材料中傳播時產生和緩的衰減，因此可以直接從太赫茲輻射的衰弱反推出半導體的電導率。
- 3. 具有通用性與多功能性：**從微觀的角度來說，各種半導體的電導性都是相同的，都是由電子和電洞的流動組成。而太赫茲波能夠測量這兩者在材料中的動態行

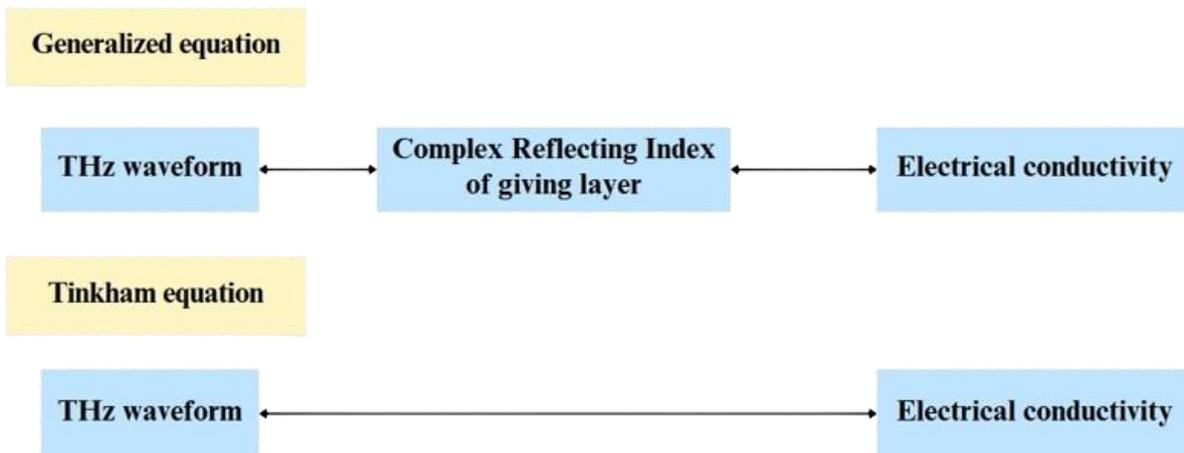
為，這些數據對於測量電導率有很重要的作用。

4. **分層訊號分析**：太赫茲波可以以較小的損耗穿透外延層(epilayers)和高電子遷移率晶體(HEMT)中的多層介電質結構。這特性使得太赫茲光譜學能夠進行非侵入式的測量到各分層的半導體電導率並取得其電導率分布曲線。

由於上述所提到的優勢，太赫茲光譜學程為了半導體電性測量分析中一種極具前景的候選技術，不管在學術研究還是工業應用方面都展現出巨大的潛力。

研究目的

在本研究中，我將基於 Fresnel equation 和多層薄膜干涉相關公式，探討 Tinkham equation 的適用範圍，並將前者稱為 generalized equation。由於 generalized equation 缺乏明確的解析解，其在實際應用中的使用相對不便。因此，需要通過太赫茲波的衰減來換算出每一層薄膜的折射率，然後使用 Drude model 進一步轉換為所需的電導率。然而，Tinkham 所提出的公式表明，當薄膜厚度遠小於電磁波的波長和集膚深度 (skin depth) 時，便可以直接從太赫茲波的衰減程度來估算出該材料的電導率。下圖是兩者求得電導率的方塊圖：



圖一：generalized equation 和 Tinkham equation 的取得電導率流程圖

本研究的重點在於薄膜電導率的分析，並將誤差控制在 1% 以內作為適用範圍的界線，進行相應的公式模擬與數據分析。

研究方法

本研究旨在探討 Tinkham equation (公式 1) 在薄膜電導率測量中的適用範圍，並通過與 generalized equation (公式 3) 進行比較來評估誤差。根據 Tinkham 方程的適用性說

明，薄膜的厚度需要遠小於電磁波波長和集膚深度。以太赫茲波波長約為 0.3 毫米為基準，本研究選定了 1nm 至 1000nm 範圍內的薄膜厚度進行測試。

Tinkham equation :

$$\frac{E_{sam}(\omega)}{E_{sub}(\omega)} = \frac{1 + n_{si}}{1 + n_{si} + Z_0 \sigma(\omega) d} \quad (1)$$

集膚深度 (δ) 的公式如下：

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu \sigma \omega}} \quad (2)$$

其中， μ 為磁導率， σ 為電導率， ω 為角頻率。可以推測，在薄膜的電導率 (σ) 越高時，集膚深度 (δ) 越小，因此，隨著電導率的增大，Tinkham 方程的誤差也會增大。本研究使用的對比公式為 generalized equation (公式 3)，該公式基於 Fresnel 方程和多層薄膜干涉理論，並可以描述多層薄膜結構的反射與透射特性。具體的公式為：

$$\frac{E_{sam}(\omega)}{E_{sub}(\omega)} = \frac{2n_3(n_1 + n_2)e^{j(n_3-1)kd_{tf}}}{(n_3 + n_2)(n_3 + n_1) - (n_3 - n_2)(n_3 - n_1)e^{j2n_3kd_{tf}}} \quad (3)$$

其中， n_1, n_2, n_3 分別為空氣，基板還有薄膜的複數折射率， k 為波數， d_{tf} 為薄膜厚度。

為了計算薄膜的電導率，本研究使用了 Drude model (公式 4)，該模型描述了載流子在材料中的運動：

$$\sigma(\omega) = \frac{qNe\mu}{1 - i\omega\tau} \quad (4)$$

其中， q 是電子的電荷量， Ne 是載流子濃度， μ 是載流子遷移率， τ 是散射時間。進一步地，薄膜的複數折射率 (n) 由以下公式計算 (公式 5)：

$$n = \sqrt{\varepsilon_\infty + \frac{jqNe\mu}{(1 - j\omega\tau)\varepsilon_0\omega}} \quad (5)$$

其中， ε_∞ 是材料的高頻介電常數， ε_0 是真空介電常數。

散射時間 (τ) 由以下公式計算 (公式 6)：

$$\tau = \frac{m_{eff} \times \mu}{q} \quad (6)$$

其中， m_{eff} 是載流子的有效質量。

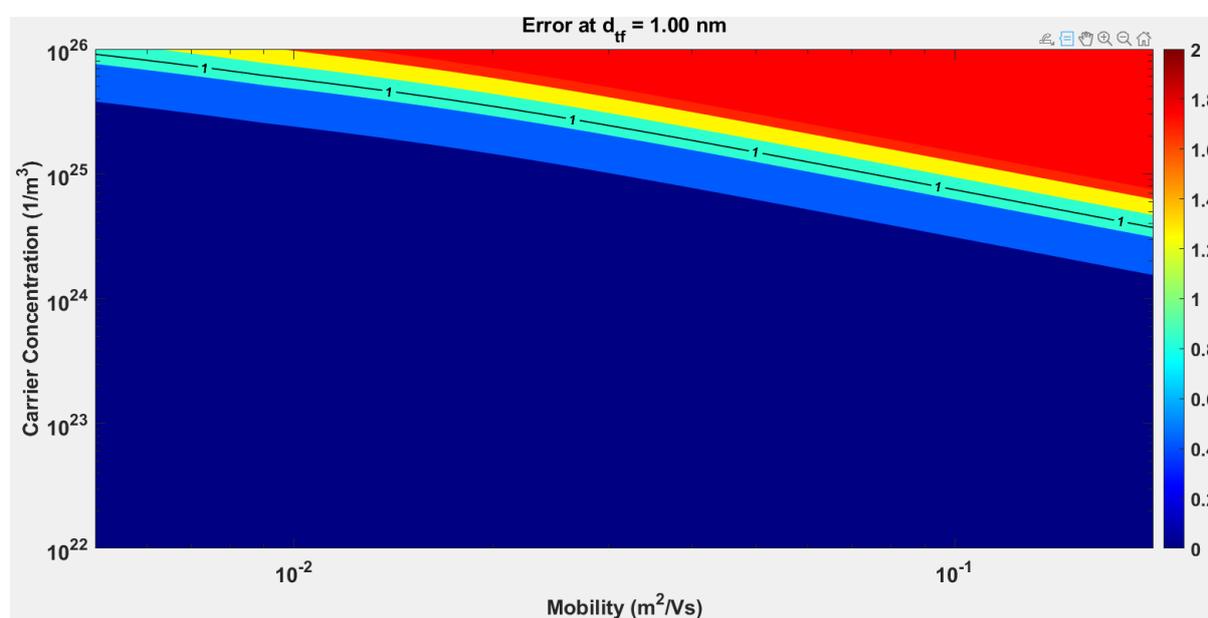
本研究預計當薄膜厚度和電導率增加時，太赫茲波的穿透強度會降低，這一趨勢會在 generalized equation 和 Tinkham 方程中都表現出來。因此，對比兩者的誤差，有助於確定 Tinkham 方程的適用範圍。

將以上公式轉成 matlab code 進行比較模擬，模擬範圍設定為：

- 載流子濃度 N_e 在 10^{22} m^{-3} 到 10^{26} m^{-3} 之間；
- 載流子遷移率 μ 在 $0.005 \text{ m}^2/\text{Vs}$ 到 $0.2 \text{ m}^2/\text{Vs}$ 之間；
- 空氣的折射率設為 1，基板的折射率設為 $3.418+10^{-5}j$ ，基板厚度為 0.5mm。

誤差的比較基於兩個模型計算出的波型中最大值之間的差異。當誤差小於 1% 時，將該範圍視為 Tinkham 方程的適用範圍。

研究結果

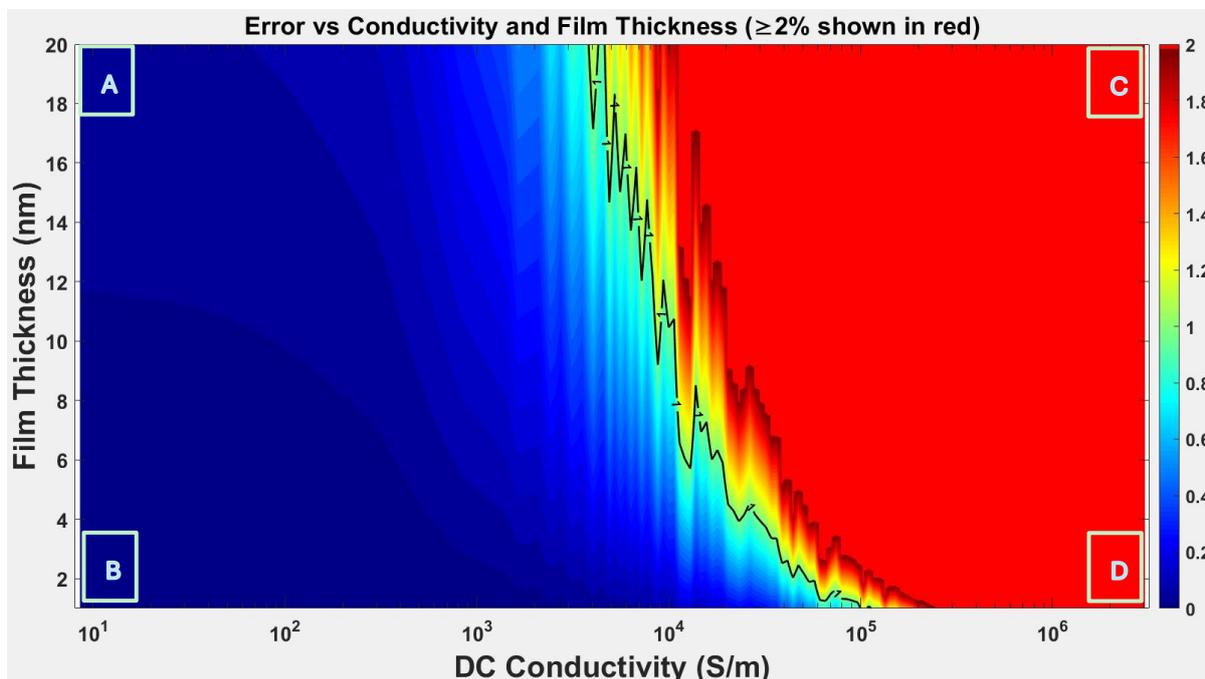


圖二：薄膜厚度=1nm 時， N_e - μ 的誤差分佈圖

以模擬薄膜厚度 $d_{\text{tf}}=1 \text{ nm}$ 為例，我們觀察到誤差分佈符合 Tinkham 方程的假設。在圖中的左下角，當載流子濃度 (N_e) 和載流子遷移率 (mobility) 都很小時，電導率也會非常低，因此這一區域的誤差會保持在我們預期的適用範圍內 ($<1\%$)。隨著圖形向右上方移動，載流子濃度和遷移率逐漸增大，電導率提高，導致誤差逐漸超出適用範圍，誤差隨之增大。

進一步分析可知，即使在相同的電導率下，誤差的大小也可能有所不同。這一現象可以從公式中得到解釋：在 Tinkham 方程中，對於相同的電導率，計算結果會給出相同的薄膜透射率。然而，載流子濃度和遷移率對薄膜的折射率的影響是不對稱的。根據折射率公式(公式 5&公式 6)，載流子濃度對折射率的影響大於載流子遷移率的影響。

因此，即使兩者的電導率相同，不同的載流子濃度和遷移率組合會導致不同的折射率，進而影響薄膜的透射率，並造成誤差的變化。



圖三： $d_{tf}-\sigma$ 誤差分布圖($d_{tf}=1\text{nm}\sim 20\text{nm}$ ，mobility 取樣 50 個點)

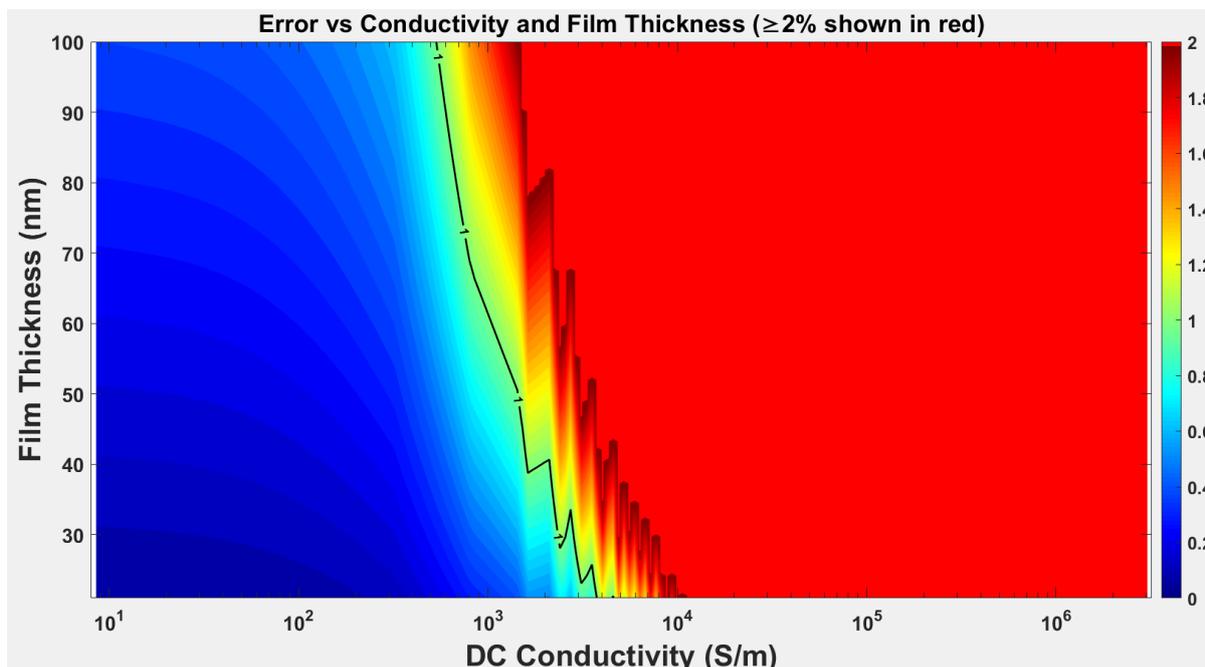
而後，在模擬不同薄膜厚度與電導率對誤差的影響時，我得到了如圖所示的結果(圖三)。從圖中可以看到，誤差的分布呈現出鋸齒狀，這是由於在相同的電導率下，可能會出現多個不同的誤差值。在模擬過程中，我們選取了誤差最大的值作為該電導率對應的誤差。所以這個鋸齒狀應該是來自於附近有多個誤差的電導率，造成物參呈現不連續的分布。

由於 **generalized equation** 缺乏解析解，因此在模擬過程中，我們只能選取離散的點進行誤差的計算，這可能導致部分電導率對應兩個不同的誤差值，而其他則只有一個。這種不平滑的誤差分布，也可能是由相鄰的電導率值之間誤差的急劇變化所引起。

而要解決這一問題，可以增加模擬中所使用的參數點數量可以進一步減少鋸齒狀誤差分布，從而使圖形更加平滑，並提高模擬結果的精確度。

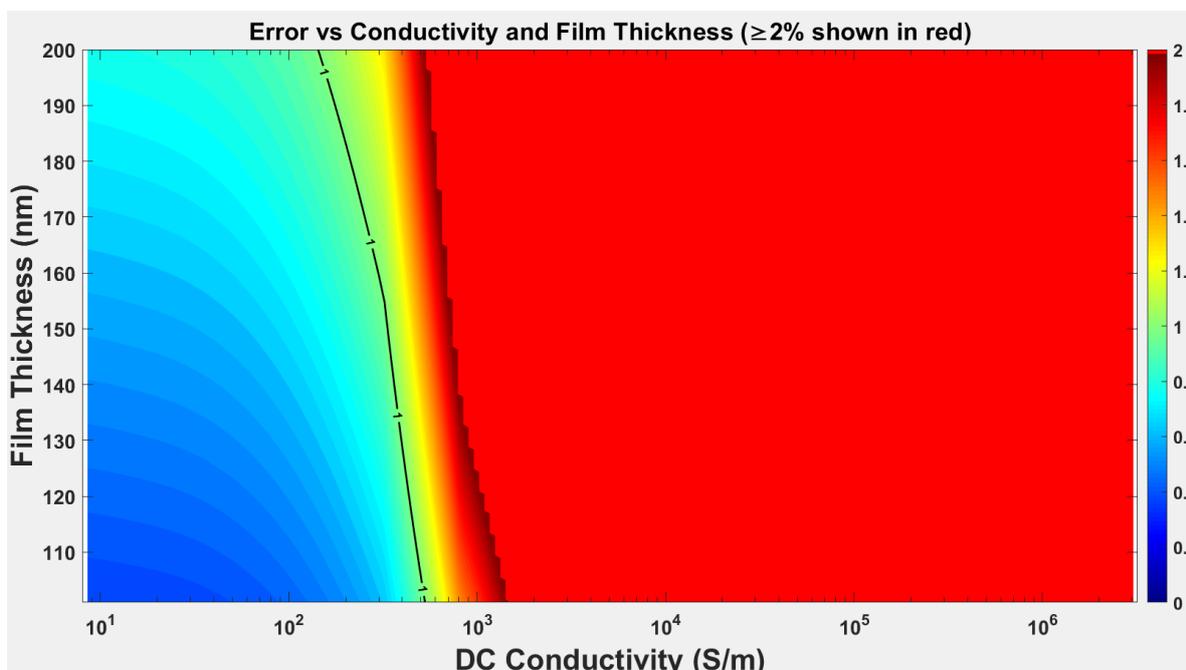
從圖三中可以看到一個趨勢：隨著薄膜厚度的增加，符合適用範圍的電導率變得越來越窄，這與 Tinkham 方程的預測一致。具體來說，當薄膜厚度增加時，電導率在符合 1% 誤差範圍內的區域變小，這表明在較厚的薄膜中，Tinkham 方程的適用範圍會縮小。

以下圖，Ne 取樣範圍中的 100 個點，mobility μ 取樣範圍中的 50 個點

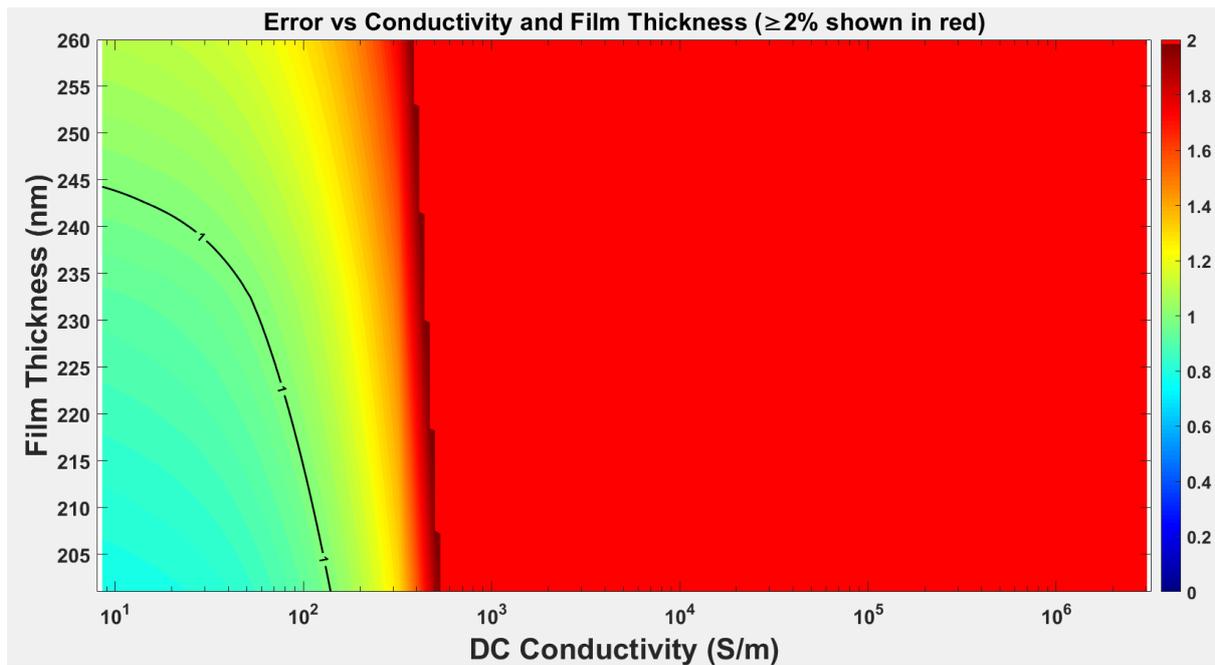


圖四： $d_{tf} - \sigma$ 誤差分布圖 ($d_{tf} = 21\text{nm} \sim 100\text{nm}$)

由圖四中的誤差圖變化可以發現，當我所取樣的薄膜厚度越來越高時，原本誤差的鋸齒狀分布也隨之減輕。這是因為 Tinkham equation 會隨著薄膜厚度越大，使太赫茲波的衰弱也就越嚴重，對於同樣電導率下的不同 Ne 與 μ 的組合，誤差也越來越接近，導致隨著薄膜厚度增加，適用範圍縮小的同時，鋸齒狀的誤差分布也跟著減輕。



圖五： $d_{tf} - \sigma$ 誤差分布圖 ($d_{tf} = 101\text{nm} \sim 200\text{nm}$)



圖六： $d_{tf} - \sigma$ 誤差分布圖 ($d_{tf} = 201\text{nm} \sim 260\text{nm}$)

隨著模擬中薄膜厚度的持續增加，從圖六中可觀察到，當厚度達到約 245 nm 時，Tinkham equation 所產生的誤差已全面超出本研究所設定的適用範圍 ($< 1\%$)，顯示其模型在此條件下已不具有有效預測能力。

然而，在實際半導體薄膜的產業應用中，除了厚度外，電導率亦有其實際上下限。因此，即使某些薄膜的厚度落在本研究所判定的適用區間內，若其電導率高於模擬設定，仍可能導致 Tinkham equation 預測誤差顯著上升，進一步限制了其應用的有效範圍。

總結

本研究以 generalized equation 作為理論上正確的基準模型，明確界定並量化 Tinkham equation 在太赫茲光譜學中進行薄膜電性檢測的適用範圍。模擬結果明確顯示，僅當薄膜厚度遠小於電磁波波長與集膚深度，且電導率維持在低值區間時，Tinkham equation 才能有效且準確地預測薄膜電導率，其誤差可控制在 1% 以內。隨著厚度或電導率增加，Tinkham equation 的誤差快速上升，顯示其在高導電與厚膜條件下不再適用。

根據本研究涵蓋的模擬範圍，我們明確指出：當薄膜厚度超過約 245 nm 時，Tinkham equation 無法滿足誤差低於 1% 的要求，即失去實用性。此外，電導率亦為關鍵影響因子，導電性越高，適用範圍越窄。

更進一步地，以多晶矽為例，其在半導體產業常用薄膜厚度為 30 至 100 nm，導電需求約為 10^2 至 10^4 S/m。綜合本研究結果可知，**Tinkham equation** 僅在其中低導電範圍（約 10^2 至 10^3 S/m）內具實際應用價值，對於高導電多晶矽應用並不適用。

總結而言，Tinkham equation 並非可普遍套用的模型，其適用性具明確界線，需依據實際材料條件進行事前評估與模擬驗證。本研究明確界定了其應用限制，為未來利用太赫茲光譜學進行薄膜電性檢測提供了可靠準則與依據。

心得感想

這次參與到太赫茲的研究中，最大的收穫就是了解到這個領域的未來。相比於 IC 設計與半導體產業，太赫茲波的研究算是台灣較少聽見，也是我之前接觸不到的研究項目。藉由這次的專題研究，也了解到如何將平時課本上的知識與公式轉換到實際研究進行分析，還有文獻的探討與研究，分析模擬產出的結果，都讓我對於學術的研究有更多的了解。像是我這個研究是分析 Tinkham equation 的適用範圍，但在原本提到的期刊中，只有提到在薄膜厚度與集膚深度遠遠小於電磁波波長時才可以進行估計，於是就要問：那這個公式在實務上的運用可以到甚麼程度？於是就假定一個可容許的誤差範圍進行模擬與分析，將整個所有公式轉變成 Matlab code 進行分析。

十分感謝實驗室學長的幫助，在這次專題中協助我架設模擬的程式架構，幫助我理解模擬的圖形物理實際上的含意，讓我能夠順利完成這次的專題研究。

參考文獻

- [1] G.Jaffé, “Theory of conductivity of semiconductors,” *Phys. Rev.*, vol. 85, no. 2, pp. 354–363, 1952, doi: 10.1103/PhysRev.85.354.
- [2] O.Lindberg, “Hall Effect,” *Proc. IRE*, vol. 40, no. 11, pp. 1414–1419, Nov.1952, doi: 10.1109/JRPROC.1952.273972.
- [3] D. H.Petersen, O.Hansen, R.Lin, and P. F.Nielsen, “Micro-four-point probe Hall effect measurement method,” *J. Appl. Phys.*, vol. 104, no. 1, 2008, doi: 10.1063/1.2949401.
- [4] R. H.Cox and H.Strack, “Ohmic contacts for GaAs devices,” *Solid State Electron.*, vol. 10, no. 12, pp. 1213–1218, 1967, doi: 10.1016/0038-1101(67)90063-9.
- [5] A.Sophian, G.Tian, and M.Fan, “Pulsed Eddy Current Non-destructive Testing and Evaluation: A Review,” *Chinese J. Mech. Eng. (English Ed.)*, vol. 30, no. 3, pp. 500–514, 2017, doi: 10.1007/s10033-017-0122-4.

- [6] R.Stibal, J.Windscheif, and W.Jantz, “Contactless evaluation of semi-insulating GaAs wafer resistivity using the time-dependent charge measurement,” *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 6, no. 10, pp. 995–1001, 1991, doi: 10.1088/0268-1242/6/10/008.
- [7] P. U.Jepsen, D. G.Cooke, and M.Koch, “Terahertz spectroscopy and imaging - Modern techniques and applications,” *Laser Photonics Rev.*, vol. 5, no. 1, pp. 124–166, 2011, doi: 10.1002/lpor.201000011.
- [8] Y.Ueno and K.Ajito, “Analytical terahertz spectroscopy,” *Anal. Sci.*, vol. 24, no. 2, pp. 185–192, 2008, doi: 10.2116/analsci.24.185.
- [9] J.Neu and C. A.Schmittenmaer, “Tutorial: An introduction to terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS),” *J. Appl. Phys.*, vol. 124, no. 23, 2018, doi: 10.1063/1.5047659.
- [10] M.Naftaly, N.Vieweg, and A.Deninger, “Industrial applications of terahertz sensing: State of play,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 19, 2019, doi: 10.3390/s19194203.
- [11] Z.Wang, M.Shaygan, M.Otto, D.Schall, and D.Neumaier, “Flexible Hall sensors based on graphene,” *Nanoscale*, vol. 8, no. 14, pp. 7683–7687, 2016, doi: 10.1039/c5nr08729e.
- [12] C.Li, R.Liu, S.Dai, N.Zhang, and X.Wang, “Vector-based eddy-current testing method,” *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 11, pp. 1–11, 2018, doi: 10.3390/app8112289.
- [13] T.Misaka, H.Ohoyama, and T.Matsumoto, “Time-dependent measurement of plasmon-induced charge separation on a gold nanoparticle/TiO₂ interface by electrostatic force microscopy,” *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–7, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-21111-9.
- [14] A.Tomasino *et al.*, “Wideband THz time domain spectroscopy based on optical rectification and electro-optic sampling,” *Sci. Rep.*, vol. 3, pp. 1–8, 2013, doi: 10.1038/srep03116.
- [15] K.Ahi, “A Method and System for Enhancing the Resolution of Terahertz Imaging,” *Measurement*, no. June, 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2018.06.044.
- [16] C. S.Yang *et al.*, “Non-drude behavior in indium-tin-oxide nanowhiskers and thin films investigated by transmission and reflection thz time-domain spectroscopy,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 49, no. 8, pp. 677–690, 2013, doi: 10.1109/JQE.2013.2270552.
- [17] S.Nashima, O.Morikawa, K.Takata, and M.Hangyo, “Measurement of optical properties of highly doped silicon by terahertz time domain reflection spectroscopy,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, no. 24, pp. 3923–3925, 2001, doi: 10.1063/1.1413498.

- [18] M.Beck *et al.*, “High-speed THz spectroscopic imaging at ten kilohertz pixel rate with amplitude and phase contrast,” *Opt. Express*, vol. 27, no. 8, p. 10866, 2019, doi: 10.1364/oe.27.010866.
- [19] C. M.Mai and S. H.Yang, “An Onsite Calibration Procedure for Accurate Electrical Constants Measurement with Terahertz Time-Domain Ellipsometry,” *Int. Conf. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves, IRMMW-THz*, pp. 1–2, 2024, doi: 10.1109/IRMMW-THz60956.2024.10697818.
- [20] H. G.Tompkins and E. A.Irene, *Handbook of Ellipsometry*. Elsevier Science, 2005. doi: 10.1515/arh-2005-0022.
- [21] K.Ohta and H.Ishida, “Matrix formalism for calculation of the light beam intensity in stratified multilayered films, and its use in the analysis of emission spectra,” *Appl. Opt.*, vol. 29, no. 16, p. 2466, 1990, doi: 10.1364/ao.29.002466.
- [22] J. S.Blakemore, *Solid state physics*. Cambridge university press, 1985.
- [23] D.Grischkowsky, S.Keiding, M.vanExter, and C.Fattinger, “Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors,” *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 7, no. 10, p. 2006, 1990, doi: 10.1364/josab.7.002006.
- [24] R. A.Afre, N.Sharma, M.Sharon, and M.Sharon, “Transparent conducting oxide films for various applications: A review,” *Rev. Adv. Mater. Sci.*, vol. 53, no. 1, pp. 79–89, 2018, doi: 10.1515/rams-2018-0006.
- [25] M. T.Hibberd *et al.*, “Dielectric response of wurtzite gallium nitride in the terahertz frequency range,” *Solid State Commun.*, vol. 247, no. August, pp. 68–71, Dec.2016, doi: 10.1016/j.ssc.2016.08.017.
- [26] A.Majkić *et al.*, “Optical properties of aluminum nitride single crystals in the THz region,” *Opt. Mater. Express*, vol. 5, no. 10, p. 2106, Oct.2015, doi: 10.1364/OME.5.002106.
- [27] A.Benninghoven, C. A. J.Evans, R. A.Powell, R.Shimizu, andH. A.Storms, *Secondary Ion Mass Spectrometry SIMS II: Proceedings of the Second International Conference on Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS II) Stanford University, Stanford, California, USA August 27--31, 1979*, vol. 9. Springer Science & Business Media, 2013.