

A Transparent Conductive Layer with an Interdigitated Electrode and Its Effect on Heat Generation

Po-Han Chou, Zhi-Hong Yu*, Shih-Chang Shei, Nan-Ming Lin
Department of Electrical Engineering, National university of Tainan

*E-mail : shyu251999@gmail.com

Abstract

In this paper, based on the existing ITO heating device, the effect is not as good as expected. Therefore, we use different types of metal masks to evaporate the electrode on a single layer of indium tin oxide (ITO). Do in-depth research, and this experiment is mainly divided into two parts.

In the first part, we will use a thermal evaporator, and use aluminum as the electrode to evaporate on the ITO glass, and use a non-proportional interdigitated mask to evaporate the aluminum on the ITO system. The proportion of the interdigitated electrode is They are 1:1 (sample2), 2:1 (sample3), 3:2 (sample4), and non-digital electrodes (sample1). In this experiment, the only parameter we changed was the fingers. The ratio of the shaped electrodes and other parameters have not changed. The number of aluminum circles is fixed four circles, the evaporation environment is also a fixed vacuum value, and the evaporation current is fixed at 70A to explore the influence of different electrodes.

After the evaporation, we measured the electrical characteristics and temperature rise of samples with different ratios of interdigitated electrodes. The results showed that the 1:1 resistance value is about 68Ω , and the temperature rise rate is about 0.617°C/s . 2:1 resistance value is about 100Ω , temperature rise rate is about 0.335°C/s , 3:2 resistance value is about 100Ω , temperature rise rate is about 0.314°C/s , 1:1 resistance value is the smallest Yes, the temperature rise rate is the fastest, which is the highest compared to other proportions of samples. When evaporating different interdigitated electrodes, it is not that the more electrodes are better, but the effective heating area and other factor.

Keywords: interdigitated electrodes, temperature rise rate

* Corresponding author: shyu251999@gmail.com
DOI : 10.53106/222344892023041301005

指叉狀電極應用於透明導電膜之溫升研究

周柏漢, 余志鴻, 許世昌, 林男明

國立臺南大學電機工程系

摘要

在這篇論文中，基於銦錫氧化物(ITO)加熱裝置依然存在許多問題，為了解決問題，本論文使用不同比例的指叉狀電極遮罩來蒸鍍電極在 ITO 上，並對其做深入研究。

在我們會使用到熱蒸鍍機，並以鋁作為電極，蒸鍍在 ITO 玻璃上，使用不比例的指叉狀遮罩來蒸鍍鋁於 ITO 的系統，其中指叉狀電極的比例分別為為 1:1(sample02)，2:1(sample03)，3:2(sample04)，以及無指叉狀的電極(sample01)，而在這次的實驗中，我們所改變的參數只有指叉狀電極的比例，其他的參數則沒有改變，鋁圈數量是固定四圈，蒸鍍環境也都是固定的真空值，蒸鍍電流則是固定在 70A，以便探討不同電極的影響。

在蒸鍍結束後，我們分別對不同比例指叉狀電極的樣品進行電學特性以及溫升的量測，結果表明 1:1 的電阻值約為 68Ω ，溫升速率約為 0.617°C/s ，2:1 的電阻值約為 100Ω ，溫升速率約為 0.335°C/s ，3:2 的電阻值約為 100Ω ，溫升速率約為 0.314°C/s ，1:1 的電阻值是最小的，溫升速率是最快的，相較於其它比例的樣品是最高的，在蒸鍍不同指叉狀電極的時候，並不是電極數越多越好，而要考慮有效發熱面積與其他因素。

關鍵詞：指叉狀電極、溫升速率

1. 緒論

1.1 前言

近年來，隨著科學技術的快速發展，生活水平不斷提高，高解析度、太陽能電池、大尺寸平面顯示器等廣泛應用，使得對於透明導電薄膜材料的需求愈來愈大。而透明導電材料因為具有較高的電導率以及良好的透光性等特性，因此被廣泛應用於氣體敏感元件、平面顯示元件、反射熱鏡、太陽能光伏電池、加熱元件等領域。

1.2 透明導電薄膜

薄膜材料在可見光範圍內（波長 380-780 nm）具有 80%以上的透光率，電阻值低於 $1 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$ ，則可稱為透明導電薄膜(Transparent Conducting Oxide; TCO)。透明導電膜可分為兩類，第一類是薄金屬膜，另一類則是金屬氧化物薄膜。

(一) 薄金屬膜

早期透明導電薄膜材料是使用金屬薄膜，包含金、銀、鉑、銅、鋁、鉻、鈮、銻等金屬，金屬材料本來就是良好的導體，也可反射紅外線以及可見光，當金屬只要夠薄就具有一定的透光性，要增加金屬薄膜的透光性，就要讓厚度低於 10nm，但絕大部份的金屬在製成厚度小於 10nm 的薄膜時，都會變成島狀 (Island-like) 不連續膜，使得薄膜的電阻值升高，如果要降低電阻值又必須增加薄膜厚度，而且當島狀結構變大時，會使入射光散射，而非穿透。目前有許多方法能夠克服島狀不連續薄膜的缺點，來沉積出電性較佳的透明導電膜，例如在基材表面與金屬之間鍍上一層結合層，或在基材的表面加上靜電場，以離子或電子來撞擊基材表面等。雖然可解決島狀不連續膜的缺點，但薄膜表面效應與雜質仍會影響薄膜電性的表現，因此要製作出透明的金屬導電膜是不容易的。

(二) 金屬氧化物薄膜

最早的金屬氧化物薄膜是在 1907 年 Badeker 發現金屬鎘 (Cd) 的薄膜在氧化後具有透明又導電的性質，為了獲得可見光區的透明性，所選用材料之能隙寬度必須大於可見光的能量，即須大於 3.0eV 以上。通常這些純材料在室溫下的導電性很差，因此必須摻入雜質來改善其電性，摻雜的方式通常有兩種：一種為摻雜比原化合物的陽離子多一價的金屬離子，或少一價的非金屬離子，例如 ITO ($\text{In}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2$)、ATO ($\text{Sb}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2$)、或是 FTO($\text{F}_2:\text{SnO}_2$)。

代表性的 TCO 材料有氧化銦 (In_2O_3)、氧化錫 (SnO_2)、氧化鋅 (ZnO)、氧化鎘 (CdO)、氧化銦鎘 (CdIn_2O_4)、氧化錫鎘 (Cd_2SnO_4)、氧化錫鋅 (Zn_2SnO_4) 和氧化銦摻雜氧化鋅 ($\text{In}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$) 等，這些氧化物半導體的能隙都在 3.0eV 以上，所以可見光（約 1.6-3.3eV）的能量不足以將價帶的電子激發到導帶，只有在波長 350-400nm（紫外線）以下的光才可以，電子在能帶間遷移所造成的光吸收不會發生，因此在可見光範圍內是透明的。最常應用的金屬半導體氧化物材料可分為 SnO_2 、 In_2O_3 與 ZnO 三大系列。

(三) ITO 透明導電膜

ITO 薄膜的基本性能 ITO ($\text{In}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2=9:1$) 的微觀結構， In_2O_3 裡摻入 Sn 後，Sn 元素可以代替 In_2O_3 晶格中的 In 元素而以 SnO_2 的形式存在，因為 In_2O_3 中的 In 元素是三價，形成 SnO_2 時將貢獻一個電子到導帶上，同時在一定的缺氧狀態下產生氧空穴，形成 10^{20} 至 10^{21}cm^{-3} 的載流子濃度和 10 至 $30 \text{cm}^2/\text{vs}$ 的遷移率。

ITO 是一種寬能帶薄膜材料，其帶隙為 3.5-4.3eV。紫外光區 ITO 薄膜的光穿透率極低。同時近紅外區由於載流子的等離子體振動現象而產生反射，所以近紅外區 ITO 薄膜的光透過率也是很低的，但可見光區 ITO 薄膜的透過率非常好，由於材料本身特

定的物理化學性能，ITO 薄膜具有良好的導電性和可見光區較高的光透過率。影響 ITO 薄膜導電性能的幾個因素 ITO 薄膜的面電阻 (R)、膜厚 (d) 和電阻率 (ρ) 三者之間是相互關聯的，這三者之間的計算公式是： $R = \rho/d$ 。由公式可以看出，為了獲得不同電阻 (R) 的 ITO 薄膜，實際上就是要獲得不同的膜厚和電阻率。

(四) ITO 透明導電膜應用

近年來，對透明電子設備的關注程度的提高，對於透明導電氧化物進行了大量的研究。ITO 透明導電膜在可見光範圍內具備高透明特性且具有良好導電性之材料，普遍廣泛被應用於光電產業及研究方面上。已研究 ITO 膜的特性和製造方法以進行工業開發；製造方法包括電子束蒸發，濺射，脈衝激光沉積，氣溶膠工藝，化學氣相沉積和溶液。ITO 膜表現出出色的導電性和高光學透明性，使其可用於許多應用，例如智能窗戶，太陽能電池，顯示器和有機發光二極管(OLED)，而 ITO 也被用於各種光學鍍膜，最值得注意的有建築學中紅外線-反射鍍膜(熱鏡)、汽車、還有鈉蒸汽燈玻璃等。別的應用包括氣體傳感器、抗反射膜、和用於 VCSEL 雷射器的布拉格反射器。

ITO 導電膜玻璃作為面發熱體，可製作成多種功能的特種加工玻璃，如用於飛機、火車、汽車等風擋玻璃、宇航飛船的舷窗、坦克雷射測距儀、機載光學偵察儀、潛望鏡觀察窗等，不僅起隔熱降溫作用，而且通電後還可除冰霜。

1.2 研究動機

目前的 ITO 加熱裝置，都是把電極蒸鍍於 ITO 玻璃的兩側如下圖 1，而溫升效果並沒有預期的好，因此為了改善的單層 ITO 加熱裝置的溫升速率，我們使指叉狀電極來改變電流走向，使電流方向從原本的左右，變為從上下，電流變為從指叉狀電極間流過，由於電流路徑變短，因此電流比起一般電極會增加許多，而產生更多熱。



圖 1.1 一般電極示意圖



圖 1.2 指叉狀電極示意圖

2. 研究方法

2.1 使用方法

本論文是用物理氣相沉積(Physical Vapor Deposition)(PVD)法去沉積鋁作為電極，PVD 法是以物理機制來進行薄膜堆積而不牽涉到化學反應的製程技術，所謂的物理機制就是物質的相變化，如蒸鍍、濺鍍，此種方法由於不牽涉到化學反應，因此所堆積出來的的薄膜品質會更加穩定，純度也更佳。

蒸鍍原理(圖 2)是在高真空的腔體，放入要蒸鍍的材料，我們這邊是使用鋁，之後利用鎢絲通電流加熱以達到氣化溫度，使鋁蒸發，並到達且附著在基板表面。

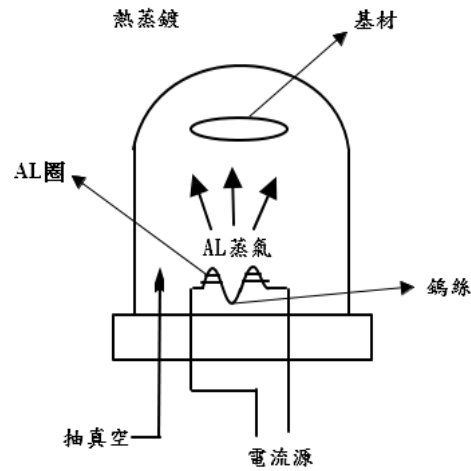


圖 2 熱蒸鍍示意圖

2.2 遮罩設計

本論文是用不同型態的電極來探討溫升率，而遮罩的設計就顯得重要，本實驗主要的目的是提升溫升率，當給固定電壓時，影響溫升率的因素是通過的電流大小，當電流越大，功率越大，溫升速率也就越快。

當我們在設計遮罩時，因為電流是走最小路徑，因此在設計指叉狀電極的時候就要留意 D 要小於 d ，如果 D 大於 d 的話，電流就會走最小路徑，因此電流就會從指叉狀電極的尖端流過，而不是從我們所預期的從中間流過。

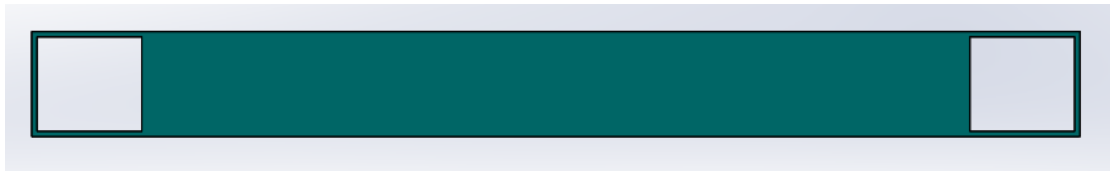


圖 3 sample01 遮罩示意圖



圖 4 sample03 遮罩示意圖



圖 5 sample04 遮罩示意圖

2.3 實驗架構

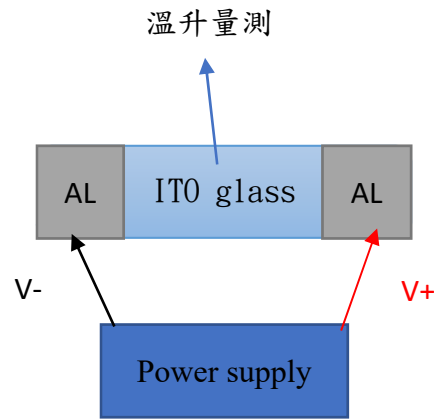


圖 6 溫升量測示意圖

本論文中使用熱法蒸鍍去蒸鍍鋁在 ITO 玻璃上，我們使用不同的金屬遮罩去鍍不同比例的指叉狀電極在 ITO 玻璃上，蒸鍍出來的電極分別有 1:1,2:1,3:2 以及一般電極，之後使用電源供應器接在兩端給予固定電壓，使 ITO 玻璃發熱，並在樣品中間接上 Thermalmeter 來量測溫升(如圖 6)，探討哪個比例是最好的。

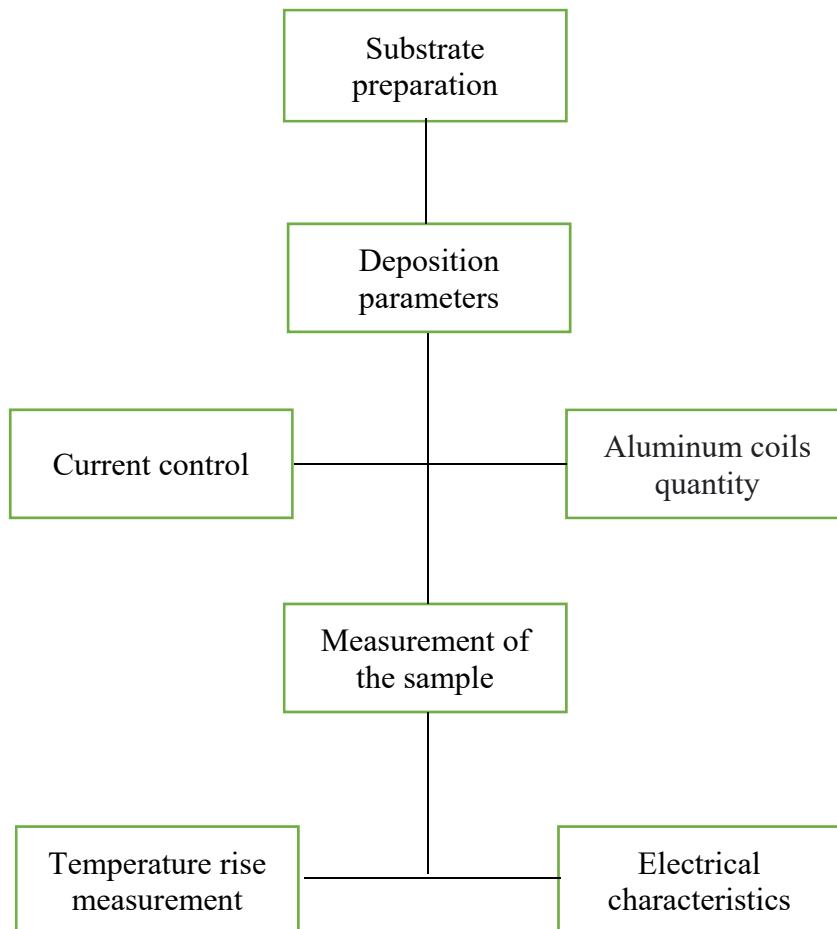


圖 7 實驗流程圖

2.4 實驗步驟

2.4.1 基板處理

基板的清潔度對於後面的所有的製程都有著高度的重要性，因為基板上的油汙,灰塵以及有機物會影響後續沉積薄膜或是電極品質，而導致較差的附著性以及均勻性。清洗步驟為下列(1)~(4):

- (1)將基板放置在裝有丙酮溶液的燒杯中，在於超音波震盪器中震盪五分鐘，以去除表面油質。
- (2)將基板放置在裝有甲醇溶液的燒杯中，在於超音波震盪器中震盪五分鐘，以去除殘留在基板上的丙酮液體。
- (3)將基板放置在裝有去離子水的燒杯中，在於超音波震盪器中震盪三分鐘，以去除表面離子以及殘留物。
- (4)使用氮氣槍將基板吹乾。

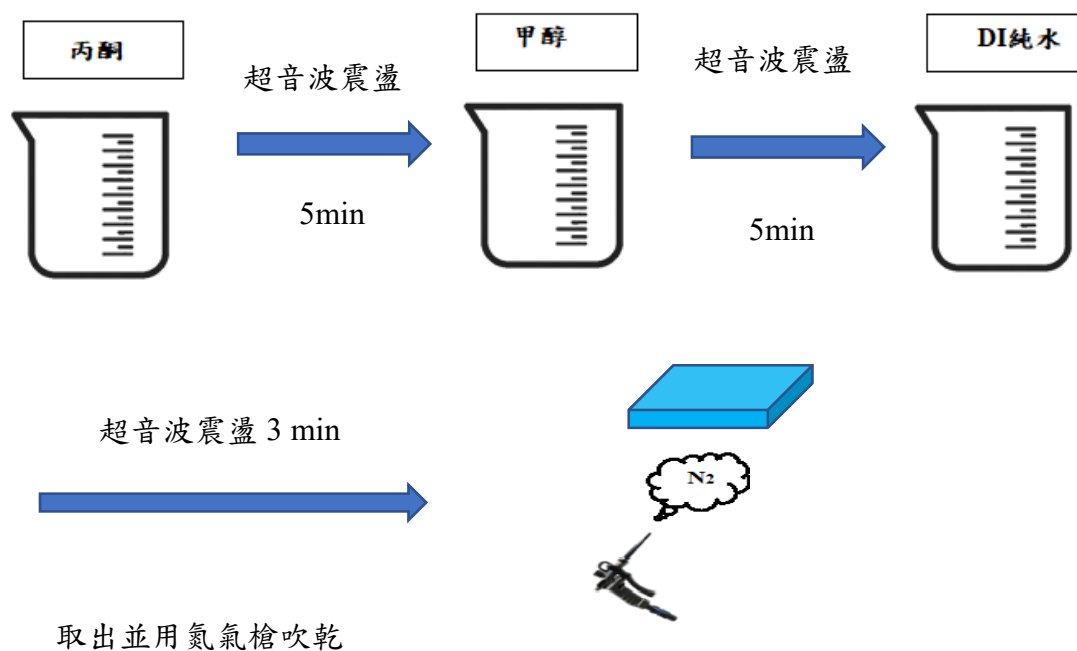


圖 8 基板清洗流程圖

2.4.2 蒸鍍流程

本實驗會使用到熱蒸鍍，原理在前面都有講述，而本小節主要是講述實驗流程，首先要先準備好適量的鋁圈(這邊是使用四圈)，以確保蒸發的質量，接著把準備好的鎢絲跟鋁圈拿去清洗，清洗的步驟與清洗機板類似，只需要再多兩項步驟，做完上述(1)(2)(3)步驟之後，再把鋁圈放入鹽酸與水比例為一比一的混和溶液中，置於超音波震盪器中震盪五分鐘，以去除表面之氧化鋁，之後將基板放置在裝有去離子水的燒杯中，在於超音波震盪器中震盪三分鐘，以去除表面離子以及殘留物，之後是詳細操作如下:

- (1) 在使用機台前，都要先打開空壓機以及冰水機，先確認空壓機是否正常運作，冰水機之冷卻水溫度是否在規定的溫度內。
- (2) 打開腔體前要先破真空，之後將腔體打開，放置試片，最後將旋鈕鎖上。
- (3) 用乙醇清潔反應室，並將鎢絲固定至電流源的電極上，隨後放置鋁圈至鎢絲上。

- (4) 關閉腔體，並檢查欲鍍的試片是否在鎢絲的正上方，進行抽氣，抽約 1 小時始腔體內的壓力達到實驗所需的真空值。
- (5) 當真空值達到 5×10^{-4} 以下時可開始蒸鍍，首先加大電流至約 70A，並且調整旋鈕使電流大小保持在 70A，等待鎢絲上的鋁蒸發氣化。
- (6) 鎢絲上的鋁蒸發完畢後，將電流調至 0A 然後關閉電流源，停止抽氣，並冷卻機台，即可破真空拿出試片。
- (7) 蒸鍍完後，腔體內部、擋板以及載台也會蒸鍍上鋁，所以要使用乙醇擦拭，維持腔體內乾淨。
- (8) 冷機完成後要進行粗抽，使腔體內保持真空狀態。
- (9) 最後關閉冰水機以及空壓機，並排出空壓機內的氣體，避免水分殘留在管線內部。

3. 結果討論

3.1. 電學特性

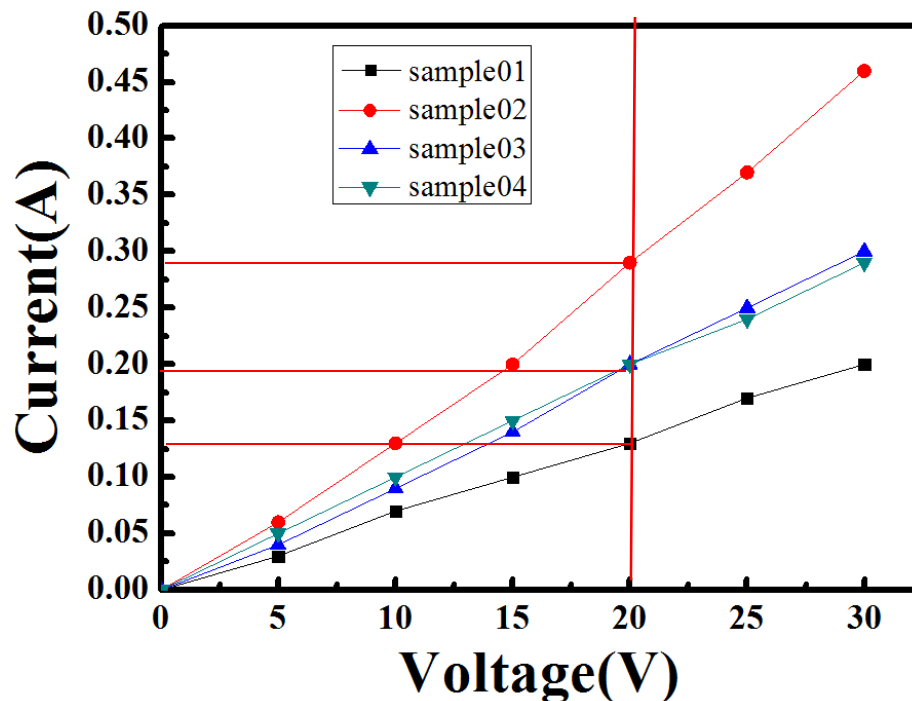


圖 9 不同比例電極 I-V 圖

本論文在蒸鍍完鋁的電極之後給 4 個不同比例的電極固定電壓，從 5V 開始到 30V，去量測電流值，最後得到電阻值，由圖 9 中可發現，sample02 的電阻值是最小的，在 20V 時約為 68.965 歐姆。

在本論文中，我們只有改變電極的型態，而無改變其他件，改變成指叉狀電極是為了改變電流走向如下圖，而電流大小跟電極間的距離成反比，距離越短電流越大，相較於原本的電極電流路徑縮短了許多，而電流理應增加，這次實驗中我們給定的電壓是固定的，電流越大，電壓就越小。

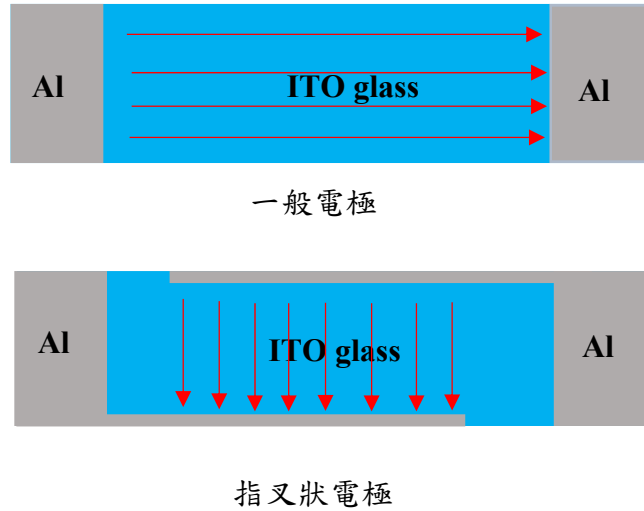


圖 10 不同型態電流走向圖

sample01	sample02	sample03	sample04
153.846 Ω	68.965 Ω	100 Ω	100 Ω

表 1 不同比例指叉狀電極在 20V 時的電阻值

3.2. 溫升速率

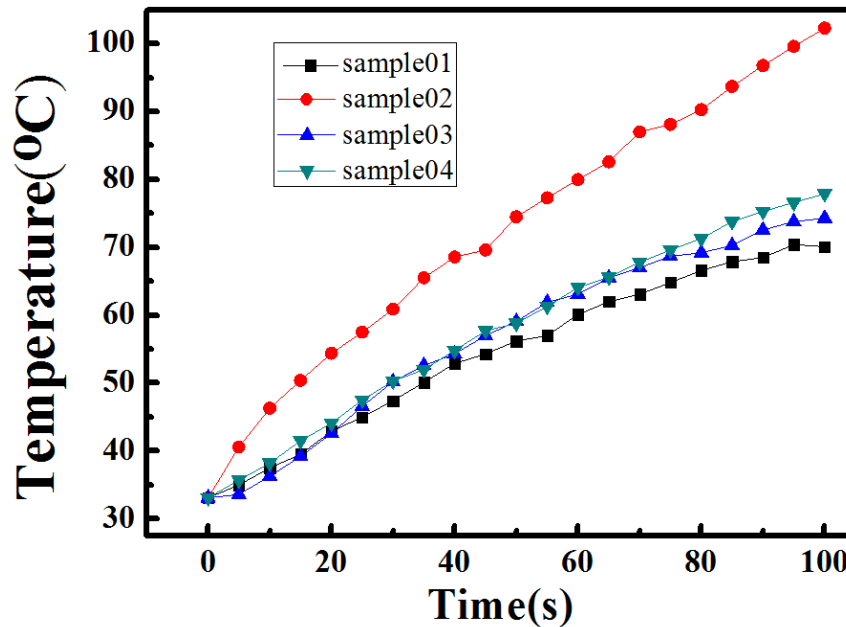


圖 10 溫升速率圖

本論文在蒸鍍完鋁的電極之後分別給 4 個不同比例的電極固定電壓 20V 使 ITO 玻璃發熱，去量測溫升速率，我們從上圖可以發現 sample02 的溫升速率是最快的，約在

95 秒就上升到 100 度，而其他到 100 秒時的溫度分別是 70.1°C(sample01)、74.3°C(sample03)、77.9°C(sample04)，並沒有達到我們所預設的溫度，而這個結果可以對應到圖 10，sample02 的電阻值最低，由公式：

$$p = \frac{V^2}{R}$$

p 為 ITO 所產生的功率(熱)，V 為施加在兩端電極的電壓，R 為樣品的薄膜電阻值，當施加電阻是固定 20V，R 越小 p 就越大，而根據圖 9 可得之 sample02 的電阻值是最小的，所以得到的熱越多，溫升速率最快。

sample01	sample02	sample03	sample04
0.277°C/s	0.617°C/s	0.335°C/s	0.314°C/s

表 2 不同比例指叉狀電極溫升速率

4. 結論

在本篇論文中，我們使用不同比例(1:1,2:1,3:2,一般電極)的金屬遮罩去蒸鍍鋁的電極在 ITO 玻璃上，去做特性與溫升速率的比較。在本實驗中，我們固定電壓，僅藉由改變電極的型態，來改變電流走向，來觀察電流的變化，由於電流大小與電流移動路徑成反比，當移動路徑越長，電流大小就越小，而我們應用指叉狀電極到加熱系統上，來縮減電流移動路徑，使電流增加，來提升功率，使溫升速率上升。

在經歷量測之後，從數據中能發現是 sample02 是最佳的結果，不論是電流大小，電阻值，跟溫升速率，都是四個樣本中最佳的，電阻值為 68.965Ω，溫升速率為 0.617°C/s，約是 sample01 的 3 倍，sample03、sample04 的 2 倍左右，而最終出來的結果也顯示，並非 3:2 的樣本是最佳的結果，由此可知，不是指叉狀電極的根數越多效果越好，而是要考慮有效發熱面積，3:2 的樣本來說，指叉狀電極的面積過大，有效發熱面積太小，溫升速率就不會如預期的高。

5. 參考文獻

- [1] Jaeyeon Kim, Seohan Kim, Seonghwan Yoon, and Pungkeun Song “Characteristics of ITO/Ag/ITO Hybrid Layers Prepared by Magnetron Sputtering for Transparent Film Heaters” Received October 28, 2016 : revised November 16, 2016 : accepted November 17, 2016
- [2] Zhong-Shan ZHANG,a, Liang TANG, Qing-Yun JU, Lei JI, Meng-Hui ZHI and Dong-Hai QIAO” Development of a Heater Structure Based on ITO Films Deposited by RF Magnetron Sputtering for Chip-scale Atomic Clock”
- [3] Chaewon Kim a, Jin-Woo Park a, 1, Jiyoung Kim b, Sung-Jei Hong c, *, Mi Jung Lee “A highly efficient indium tin oxide nanoparticles (ITO-NPs) transparent heater based on solution-process optimized with oxygen vacancy control”
- [4] Boda Zhenga,b, Qingsheng Zhua,b,*, Yang Zhaoa,b” Fabrication of high-quality silver nanowire conductive film and its application for transparent film heaters”
- [5] Vivekanandan Ramana, Yong-Hwan Choa, Jin-Hyeok Parka, Deviprasath Chinnaduraib, Han-Ki Kima,*” Impact of low temperature plasma annealing for flexible, transparent and conductive ITO/PEDOT:PSS composite electrode”