

Controlling the flow of oxygen to explore the study of zinc tin oxide thin film transistors

Ku Fan, Shih Chang Shei

Department of Electrical Engineering, National University of Tainan,
Tainan, 70005, Taiwan

Abstract

This study discusses in the RF sputtering chamber, controlling the ratio of argon to oxygen (Ar:O₂), depositing zinc tin oxide (ZTO) film, and finding the best conditions through thickness and penetration. Then use hafnium dioxide (HfO₂) as an insulating layer to make zinc tin oxide (ZTO) transistors. By measuring the electrical properties for material analysis, it is found that the thin film made of ZTO film with a nitrogen-to-oxygen ratio of 45:5 is used. The crystal has a good saturation zone and the critical voltage is 1.26V. We found that the higher the oxygen content, the higher the penetration rate of the film, and the penetration rate between visible light wavelengths is 85%. Through the measurement of the Hall effect, it can be seen that the carrier concentration is 6.45×10^{11} under the condition of 45:5. The reason is that in the case of high oxygen concentration, many oxygen vacancies are filled, which improves the problem of excessive carrier concentration, and then achieves the function of saturation and cut-off.

Keywords: RF sputtering 、 Zinc tin oxide 、 Hafnium dioxide 、 Thin film transistors

控制氧氣流量探討氧化鋅錫薄膜電晶體之研究

古凡、許世昌

國立臺南大學電機工程學系

摘要

本研究討論在射頻濺鍍腔體內，控制氬氣氧氣比($\text{Ar}:\text{O}_2$)，沉積氧化鋅錫(ZTO)薄膜，透過厚度、穿透率找到最佳條件。接著使用二氧化鈦(HfO_2)作為絕緣層，製成氧化鋅錫(ZTO)電晶體，藉由測量電性進行材料分析，發現利用氬氧比為 45:5 的 ZTO 薄膜製作而成的薄膜電晶體，有很好的飽和區，臨界電壓為 1.26V。

我們發現氧氣含量越高時，薄膜的穿透率會越來越高，在可見光的波長間穿透率有 85%。再透過量測霍爾效應看出 45:5 的條件下有較好的載子濃度 6.45×10^{11} 。原因是在氧氣濃度高的情況下，許多的氧空缺被填滿，改善了載子濃度過高的問題，進而達到飽和且截止的功能。

關鍵詞：氧化鋅錫、ZTO、二氧化鈦、 HfO_2 、絕緣層、薄膜電晶體、射頻濺鍍、通道層。

1. 緒論

1.1 前言

近年來，隨著光電產業的快速成長，已經不斷發展了許多研究相關的新材料出來。一些主要的光電產品，傳統陰極射線管(Cathode ray tube – CRT)到液晶顯示器(Liquid-Crystal Display – LCD)，智慧型手機和可撓式面板顯示器圖 1.1，在生活中有著廣泛的應用。由於技術的發展，薄膜電晶體近年來受到了廣泛的關注，人們對於顯示器上的功能要求也越來越高，例如：期待有著高分辨率，大尺寸的，低成本和低耗能，為此勢必須要提高顯示器的技術用來促進薄膜電晶體技術的蓬勃發展。

2004 年以來，人們對離子型非晶氧化物半導體(Ionic amorphous oxide semiconductors – IAOS)製成的 TFT 產生了極大的興趣。透明導電多化合物氧化物薄膜適合於特殊應用，因為其本身光學，電學，物理和化學性質可以通過改變化學成分來控制。透明導電氧化物(Transparent Conductive Oxide – TCO)薄膜使用化學、物理沉積方式或以磁控濺射技術，以利研究與製作摻雜的 ZnO 薄膜作為 TCO 薄膜的新材料^[1]。另外由 ZnO 為基礎等已有報導的三元氧化物組成體系對於 TFT 活性層具有高的 μ_{EF} (3~12 cm²/Vs)和良好的均勻性相容性，顯示出優且滿意的電性能。例如：氧化鋅錫(ZTO)、氧化鎂銦(MIO)、氧化銦鋅(IZO)、和氧化銦錫(ITO)、氧化鋅鋁(AZO)包括銦鎵鋅氧化物(IGZO)，鋅銦錫氧化物(ZITO)^[2-9]。

儘管已廣泛研究了氫化非晶矽(a-Si:H)和有機半導體，氧化物半導體薄膜相對於矽為基底和有機半導體薄膜具有多個優勢，包括更高的場效應遷移率，及較為寬的能帶，能於低溫條件下加工的兼容性與在大面積上製作下有更高的均勻性^[10-12]。但 TCO 膜尚未得到廣泛應用，TCO 薄膜新材料開發的主要目的是在可見光範圍內實現較為低的電阻率和有較高度的透射率。另外，有機半導體由於其低的場效應遷移率和不穩定性而不適合應用於諸如高分辨率，高速 OLED 顯示器的應用。因此，氧化物半導體是有前途的為下一代 TFT 甚至柔性電子產品的替代材料。

1.2 研究動機 (Motivation)

在觀察薄膜電晶體的種類中發現，金屬氧化物半導體作為通道層的薄膜電晶體同時兼具非晶矽之高均勻性以及多晶矽之高載子遷移率(~10cm²/Vs)的優點，因此本實驗採用非晶矽鋅錫氧化物(a-ZTO)當作電晶體通道層的材料。鋅錫氧化物 (ZTO) 半導體是以氧化鋅為基底，具有寬能隙(>3.6eV)，在可見光範圍下具有高透明度，因此相較於其他半導體材料，一般認為高透明度及高載子傳輸能力是無法兼具的，然而因為能隙差距造成電子從價電帶躍遷到導電帶變得不易。

雖然非晶 ZnO 薄膜可以在 80°C 下製造^[13]。但是，到目前為止非晶態 ZnO 薄膜仍不適合用於柔性光電元件。非晶態摻雜 Zn 的 In₂O₃ (IZO；鋅含量為 10 wt%) 或 ITO 可以用於透明電極應用^[14-15]。但儘管這些薄膜表現出良好的光學和電學性能，製備上依舊需要昂貴且有毒性的 In₂O₃，對在各種下一代光電設備產品的應用構成了極大的限制。因此，新型的非晶態鋅錫氧化物 (ZnSnO₃-ZTO) 是柔性光電元件的良好候選材料^[16-17]。在研究中，我們通過射頻磁控濺射系統的方法製作與研究 ZTO 薄膜。在製備 ZTO 薄膜

的過程中，我們改變 O_2 / Ar 的比例來控制薄膜的電導率，找尋最佳薄膜特性，在不同的氣氛下得出不同的薄膜特性，再利用不同電導率的情況下製造 TFT。



圖 1.1 薄膜電晶體應用

Si			
a-Si	優(Advantage)	缺(Weakness)	
	較優的均勻性 相較低廉的成本	1. 低電子遷移率 ($<1\text{cm}^2/\text{Vs}$) 2. 對於光和溫度有著高敏感度	
Poly-Si	高遷移率 ($>100\text{cm}^2/\text{Vs}$) 能積體電路化	1. 不均勻的狀態 2. 高度花費的投資與加工成本	

圖 1.2 非晶矽與多晶矽分子結構及優缺點比較^[18]

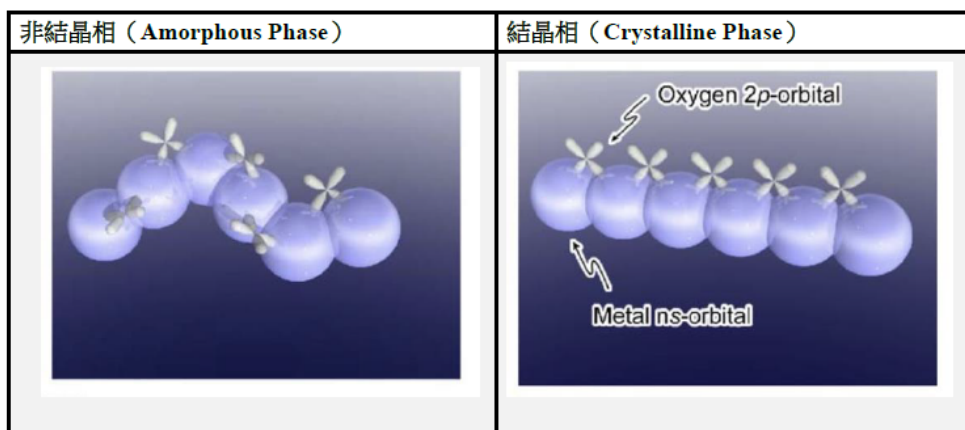


圖 1.3 金屬氧化物非結晶相與結晶相電子排列示意圖^[18]

主動層 材料 特性	a-Si TFT	Poly-Si TFT	a-Si: H TFT	Oxide-based TFT
均勻度	H	L	H	H
遷移率(μ cm^2/Vs)	$\sim 1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$	$\sim 100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$	$\sim 1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$	$10\sim 100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
光罩工序	4~5	5~11	4~5	4~5
產能/花費	H/L	L/H	L/L	H/L
再現性	H	L	H	H
製程溫度 (Process Temp $^{\circ}\text{C}$)	150~350 $^{\circ}\text{C}$	450~550 $^{\circ}\text{C}$	$\sim 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$	30~350 $^{\circ}\text{C}$
適用產品	LCD, ETC	LCD, Small organic EL	LCD	LCD, Small organic EL

表 1.1 薄膜電晶體之特性比較

2. 實驗方法及步驟

2.1 實驗介紹

第一部分為 ZTO 導電薄膜分析、薄膜電晶體製造和其薄膜電晶體電學測量，如圖 3.1 所示為實驗流程。首先使用射頻磁控濺鍍(RF Magnetron Sputtering)沉積通道層;所使用的材料為鋅錫氧化物 (ZTO) 單靶材，材料於特性分析後，接著開始進行薄膜電晶體製作。

2.1.1 玻璃基板清潔

基板上的清潔度對於設備在沉積的後續加工有著高度的重要性，因為基板上的灰塵、油脂、指紋與有機物會造成後續薄膜沉積的品質，從而導致較差的附著力和均勻性不加的情況：

清洗步驟 (1) ~ (4)，基板清洗流程圖如圖 2.1 所示。

- (1) 將 2x2x1 玻璃基板浸泡於丙酮溶液，於超音波震盪中 5 分鐘以利除去基板上油脂、灰塵以及有機物。
- (2) 將玻璃基板放置於甲醇溶液中，以超音波震盪中 5 分鐘以幫助除去殘留於基板上的丙酮。
- (3) 將玻璃基板放置於去離子水中，並以超音波震盪 3 分鐘去除表面離子和殘留物。
- (4) 使用氮氣槍將玻璃基板表面吹乾，使其沒有水珠附著於表面。

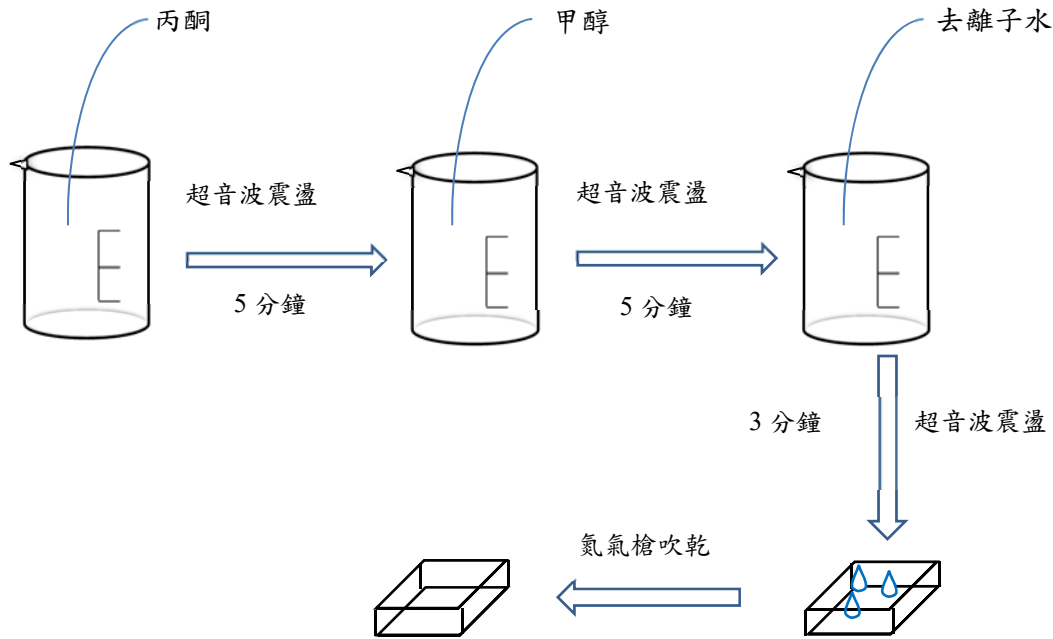


圖 2.1 基板清洗流程

2.2 薄膜電晶體

TFT 結構我們使用金屬遮罩用以定義出薄膜電晶體各個膜層的形狀。ZTO 的 TFT 的元件結構如圖 2.2 所示。

第一步通過熱蒸鍍機(Thermal)將 70 nm 的鋁(Al)電極，透過第一道金屬遮罩蒸鍍於玻璃基板上作為底部閘極電極。

第二步接著使用射頻磁控濺鍍(RF Magnetron Sputtering)沉積 200nm 厚的二氧化鈦(HfO_2)作為絕緣層

第三步透過第二個遮罩使用射頻磁控濺鍍沉積 50 nm ZTO 主動層，ZTO 靶材將在不同氣氛下製作金屬氧化物半導體薄膜。

最後，我們將再次使用熱蒸鍍法通過第三個遮罩作為源極、汲極(S/D)電極 70nm 厚的 Al。

2.2.1 金屬薄膜電極製作

實驗中閘極電極、源極、汲極使用的製作方法是以熱蒸鍍法來達成，使用的是鎢絲以及鋁圈1圈，清洗步驟與清潔玻璃基板時相同，僅需再多加一項步驟，使用酸作為洗滌，將鹽酸和水(1:1)混合成溶液，詳細操作如下：(1)~(7)。

(1) 使用機器進行熱機前，須檢查空壓機是否正常工作，冷卻水溫度已達規定範圍內(21°C)。

(2) 用酒精清潔腔體，並將鎢絲固定在熱蒸鍍機電流源的電極上。同時，將所需蒸鍍的鋁圈放在鎢絲中，並將帶有光罩的玻璃基板黏貼於載台上。

(3) 檢查並確保關閉遮罩與載台，即可抽氣使其於高真空(需約1小時)

(4) 當真空值降至 1×10^{-5} Pa以下時，可開始蒸鍍沉積，首先緩慢增加電流。當鋁圈開始

蒸發後，打開遮罩，再將電流上升到90A，接著計時1分鐘。

(5) 蒸發完成後，關閉電流源，冷卻腔體後，再次抽真空保持腔體內部環境。

(6) 蒸鍍機使用完畢後開始冷機，並用酒精擦拭石英腔體，遮罩與載台。

(7) 冷機完成後，關閉冷卻水機、空壓機並將空壓機放氣，盡量將空壓機裡的水分排除，以免殘留過多水分於內部管線造成問題。

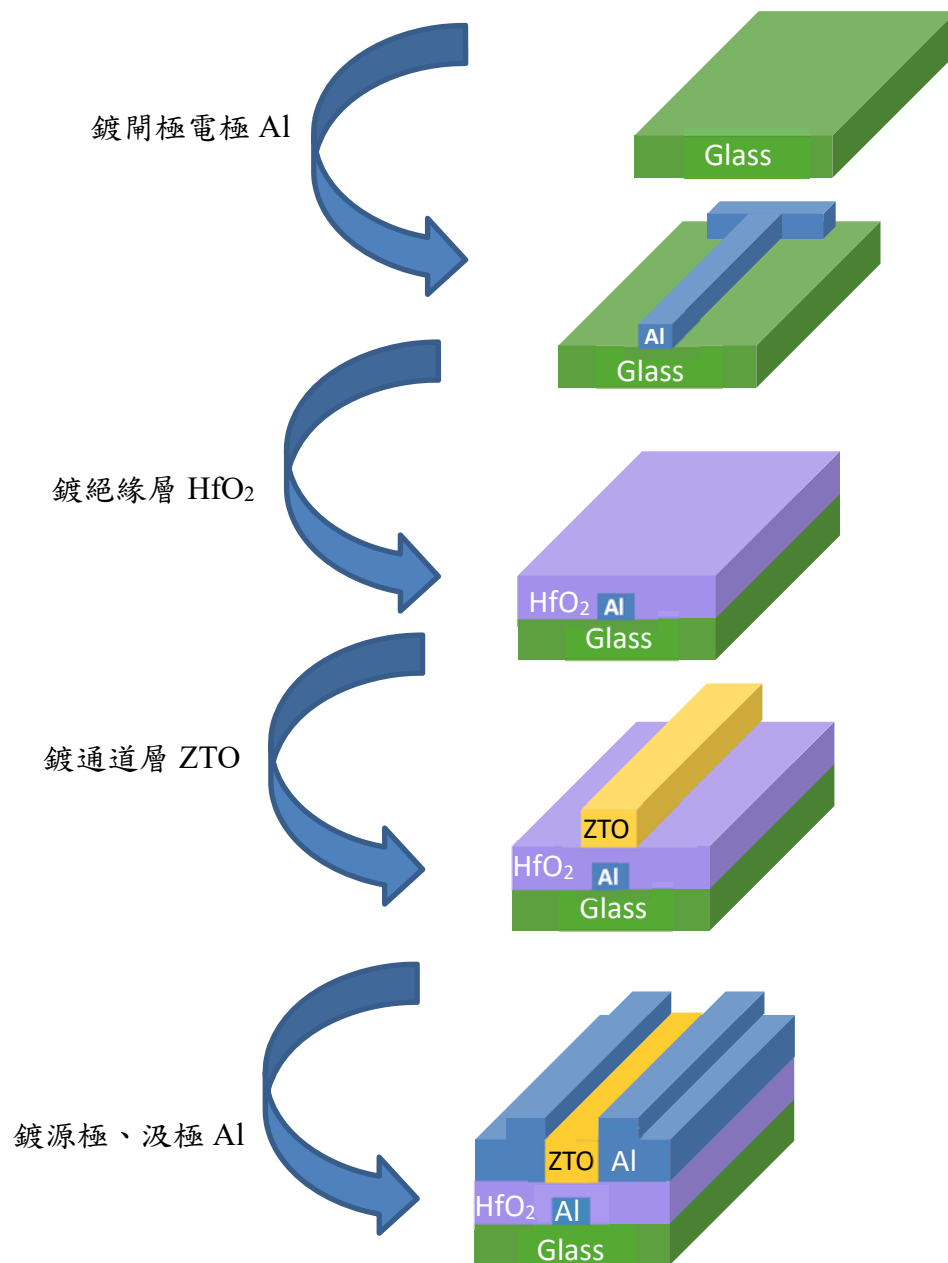


圖 2-2 ZTO 薄膜電晶體結構圖

2.2.2 濺鍍通道層ZTO

實驗中使用的是單靶材射頻濺鍍系統基板清洗過後，放置濺鍍腔體(Chamber)中的上方載台，並利用遮罩(Shutter)擋開基板與靶材之間，再由電源供應器產生射頻信號，使通入的腔體內氣體解離，此時解離出來的陽離子經由負偏壓的加速下轟擊放置好的靶材，靶材中的原子便會濺射出來，沉積於試片上。在濺鍍過程中，可以控制的變因有許多種，包含通入腔體內的氣體流量大小與比例、調整濺鍍功率、腔體內壓力、基板加熱與否等...。ZTO濺鍍沉積參數如表2-1。下方步驟為濺鍍實驗順序(1)~(11)：

- (1) 打開冷卻水機和空壓機以確保正常運轉。
- (2) 開啟機台後，依序開啟抽氣幫浦(RP)與其中間的連接閥(FV1)並打開渦輪泵(TP)，直到其轉速達到設定數值340rms。
- (3) 破開真空與清潔腔體，接著將ZTO靶材和玻璃基板進行更換與放置。關閉腔體後開啟粗抽閥(RV1)開始進行粗抽。當腔體內真空值降至 3×10^{-2} mtorr以下
- (4) 打開細泵閥(MV1)並開始細抽，接著開啟自動壓力控制器(APC)。
- (5) 等待腔體內真空值已低於低真空表的可測量範圍後，打開高真空計，並於壓力低於 1×10^{-5} mtorr時開始設置製程參數。
- (6) 首先開啟氣體閥門並流入製程所需氣體，實驗中製程所使用於沉積的氣體氮氧流量比為49/1、48/2、47/3、46/4和45/5。
- (7) 於氣體穩定後，為順利地將離子打出，我們調整APC把壓力控制在50 mtorr，將輸出功率調整為40w接著打開遮罩試打電漿，如果有反射功率發生，須將阻抗匹配箱調整為自動或手動，阻抗匹配箱可將反射降至零，以避免損壞電源及靶材，待電漿轟擊出後關閉遮罩並調整實驗所需壓力和輸出功率。
- (8) 接著我們預先透過濺鍍3分鐘以去除靶材表面上的雜質與氧化。並在設定濺鍍時間之後，旋轉上方載台且打開遮罩。等待濺鍍時間結束後，關閉遮罩，RF濺射功率和氣體。
- (9) 等待數分鐘，將腔體中的氣體抽出後，停止抽氣並且破真空開啟腔體，取下載台上的試片。
- (10) 機台冷機：將渦輪泵(TP)點選關閉並等待其轉動速度達到顯示為0。
- (11) 將機台進行粗抽，將粗抽閥(RV1)打開，腔體內部抽氣至5Pa以下，以保持腔體真空。
- (12) 冷機完成後，關閉冷卻水機和空壓機，需將空壓機內部氣體、水氣排出。

靶材	氧化鋅錫(ZTO)
功率	90W
腔體真空值	1×10^{-5}
氬氧比	49/1、48/2、47/3、46/4、45/5
工作壓力	5mtorr
濺鍍時間	6min
基板溫度	常溫

表 2-1 ZTO 濺鍍參數

2.2.3 濺鍍絕緣層 HfO₂

本實驗的絕緣層使用到的沉積方法與沉積通道層 HfO₂ 相同，操作模式亦相同，表 2-2 為 HfO₂ 的沉積參數。

靶材	二氧化鈣(HfO ₂)
功率	100W
腔體真空值	1×10^{-5}
氬氣含量	20sccm
工作壓力	5mtorr
濺鍍時間	40min
基板溫度	常溫

表 2-2 HfO₂ 濺鍍參數

3. 結果與討論

本章節為 ZTO 薄膜特性的探討、討論 ZTO 在不同氧氣流量的製備情況下對薄膜電晶體的電性影響。

3.1 ZTO 薄膜分析

3.1.1 X射線繞射儀(XRD)

圖 3.1 顯示氬氣/氧氣流量比為 2、4、6、8、10% (Ar/O₂=49/1、48/2、47/3、46/4、45/5) 的 XRD 圖譜，於圖譜上未發現明顯的峰值，表示出 ZTO 薄膜均為非晶態結構。非晶薄膜具有大面積均勻性特點、低電子缺陷、光滑表面和低界面態密度的優點，對於

生產元件是極為重要的。

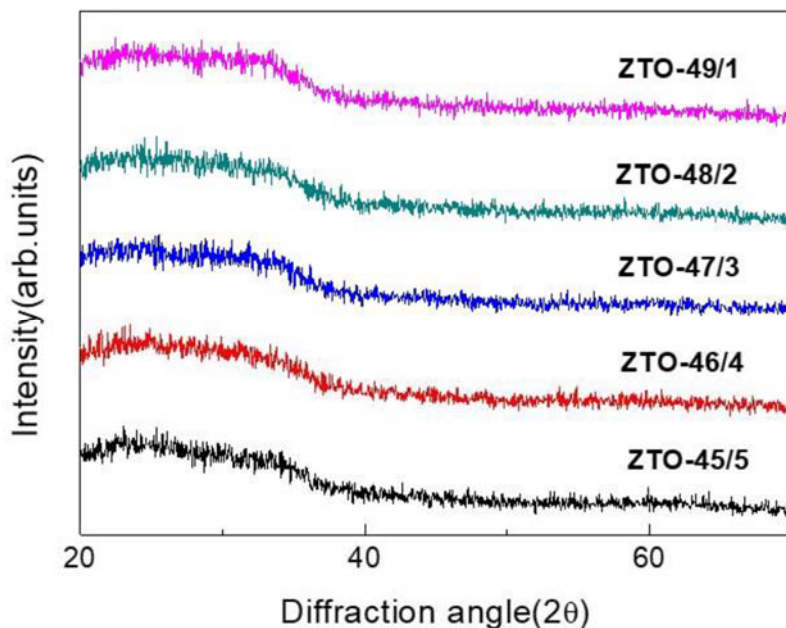


圖 3.1 ZTO 的 XRD 圖

3.1.2 紫外光-可見光光譜分析儀(UV-Vis)

可見光波長為 300 nm 至 700 nm 的能隙約為 1.8eV 至 3.1eV，我們知道 ZTO 膜中，具有不穩定的氧鍵，這會導致晶體中形成缺陷，從而有氧空缺的狀態。在濺鍍 ZTO 的過程中從圖 3.2 可發現氧氣增加提高了透射率。

圖3.2是於相同濺鍍時間下不同的氧氣流量所量測的穿透率，會發現薄膜的穿透率隨著氧氣流量的增加而增加，當氧氣流量增加時，會影響薄膜的沉積速度，有相對高氧氣流量的ZTO薄膜有著較薄的厚度，使其在相同濺鍍時間下擁有較好的穿透率與濺鍍品質，於圖中可以發現可見光範圍內有好的穿透率高於85%以上。

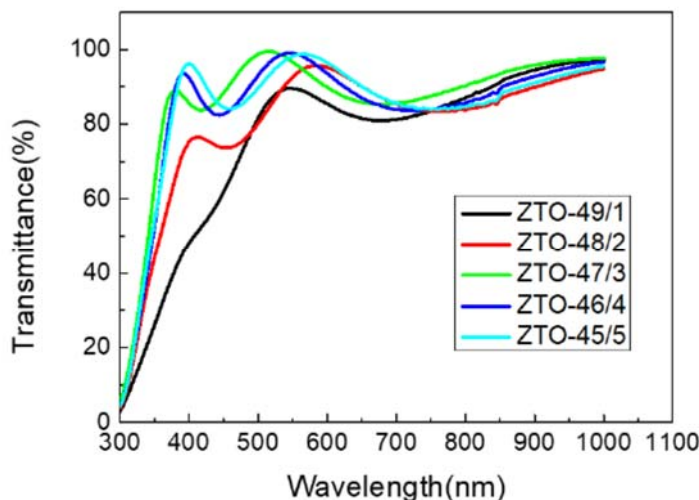


圖 3.2 相同濺鍍時間下不同的氧氣流量的穿透率

3.1.3 霍爾效應分析

表 3.1 顯示了根據霍爾效應在不同氬氧流量比(Ar:O₂)的 ZTO 薄膜的電阻值。當氧氣流量從 1sccm(2%)增加到 5 sccm(10%)時，電阻從 3.81×10^2 (Ω/cm) 增加到 2.82×10^3 (Ω/cm)，我們發現增加氧氣流量會增加薄膜透射率，會降低導電率並增加其電阻率，在 ZTO 薄膜中的氧空穴將提供薄膜載體。因此，更多的氧氣流入過程中，將更加的降低其中所含有的氧空穴，正因為有氧空穴被填補情況而造就載子濃度的降低^[19]。

氧:氬	49:1(2%)	48:2(4%)	47:3(6%)	46:4(8%)	45:5(10%)
電阻率 (Bulk Resistivity)	3.81×10^2	4.12×10^2	1.86×10^3	2.13×10^3	2.82×10^3
載子濃度 (Carrier Concentration)	3.62×10^{13}	7.74×10^{12}	6.32×10^{12}	8.89×10^{11}	6.45×10^{11}

表 3.1 不同流量比所測得的電性

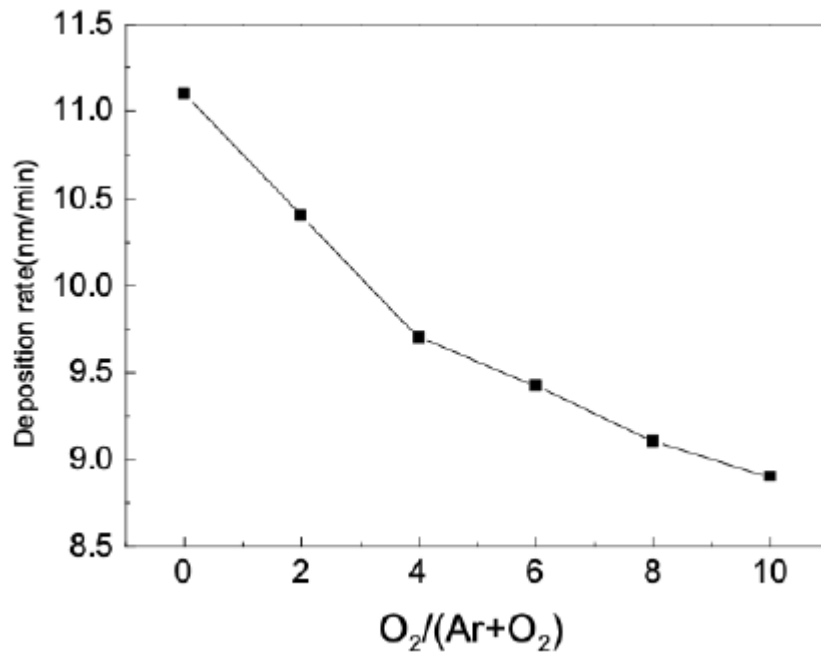


圖 3.3 不同氣氛下所測得的濺鍍功率

3.2 ZTO 薄膜電晶體

3.2.1 元件特性測量

不同的氧氣含量不只會影響氧空穴，還會影響 ZTO 膜中的載子濃度，進而改變膜中導電率，若載子濃度太高，則會影響元件的特性而無法達到飽和並截止。

我們將主動層的寬度(W)和長度(L)固定為 1mm 及 100 μm ，探討不同氣氛下的 ZTO 所形成的薄膜電晶體，元件特性會如何改變。

我們先將不同氣氛下的 ZTO 薄膜電晶體(2%、4%、6%、8%、10%)分別命名為元件 A~E。

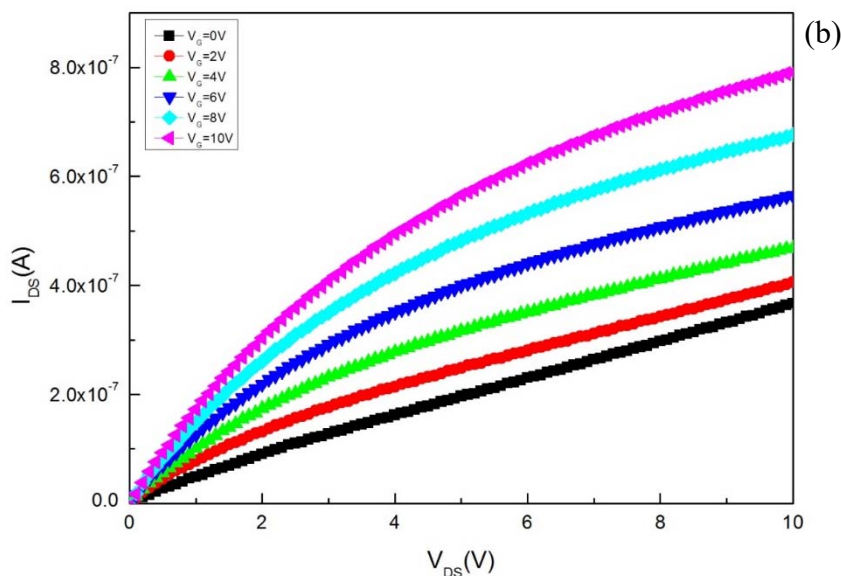
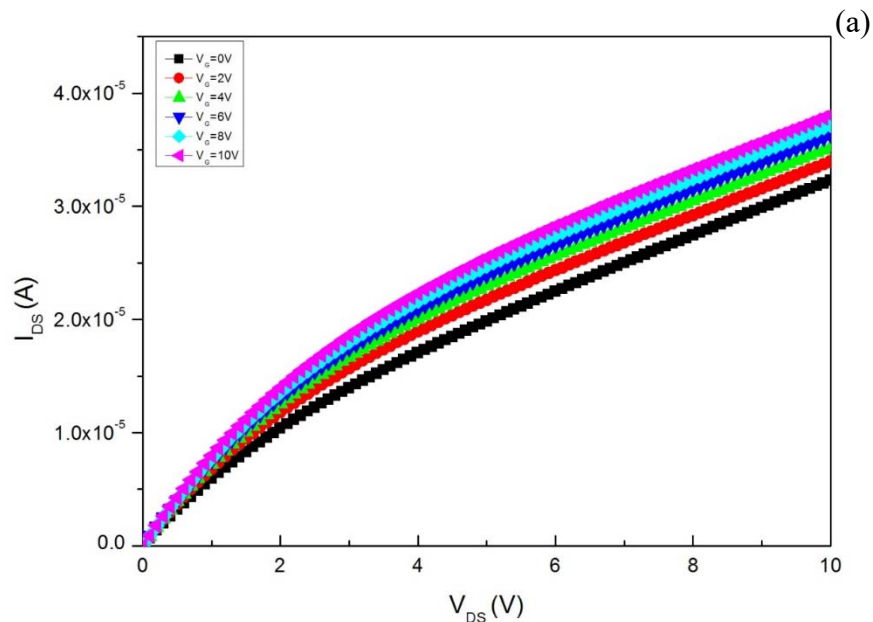
圖 3.4(a)~(e)顯示在施加的柵極電壓 (V_{GS}) = 10 V 時元件的輸出特性。

當氧氣流量為 1sccm 時，輸出特性曲線 (I_{DS} - V_{DS}) 呈現出如圖 3.5 所示的導體狀態其歐

姆特性線性。 V_{GS} 不可控， I_{DS} 導致 ZTO TFT 無法進入飽和區，這是因為氧氣流量過少無法有效抑制氧空穴導致載子濃度過高，且氧氣流量比率過低，則該元件將沒有開關特性。

當氧氣流量增加到 2sccm~5sccm 時，可以發現 V_{GS} 可以使電晶體作為開關使用。但是，當 $V_{GS}=0$ 時，可觀察到如圖 3.5 所示發現，在沒有施加閘極電壓的情況下，氧氣流量為 2 sccm 至 3 sccm 的電晶體的汲極電流已形成通道的流動，造成導通。當氧氣流量為 3sccm~5sccm 時，發現 V_{GS} 逐漸可以控制汲極電流進入飽和區，這是因為隨著氧氣流量的增加，部分氧空穴被抑制，導致載子濃度降低。

如表 3.2 所示，當隨著氧氣流量的增加結果 V_{TH} 數值沿正方向移動越大，這是因為隨著氧氣流量的增加，更多的電子被氧捕獲在通道層中，從而導致元件的臨界電壓向正極方向移動需要更大的臨界電壓來吸引電子以形成使元件導通的通道。



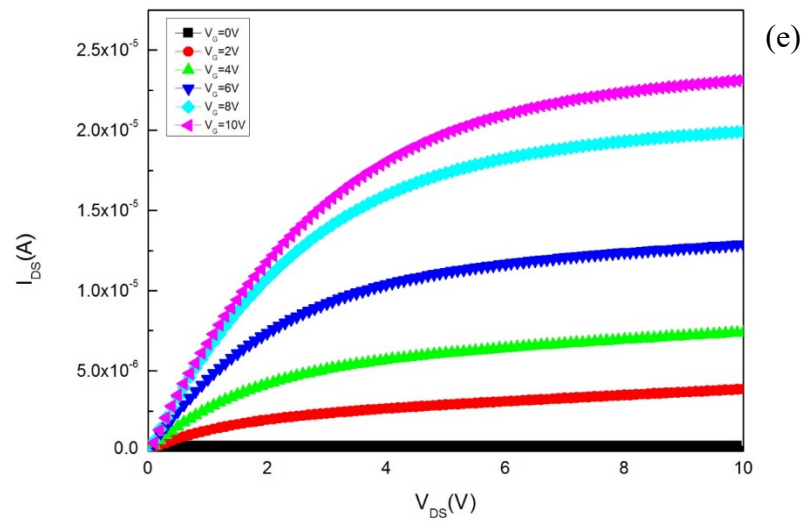
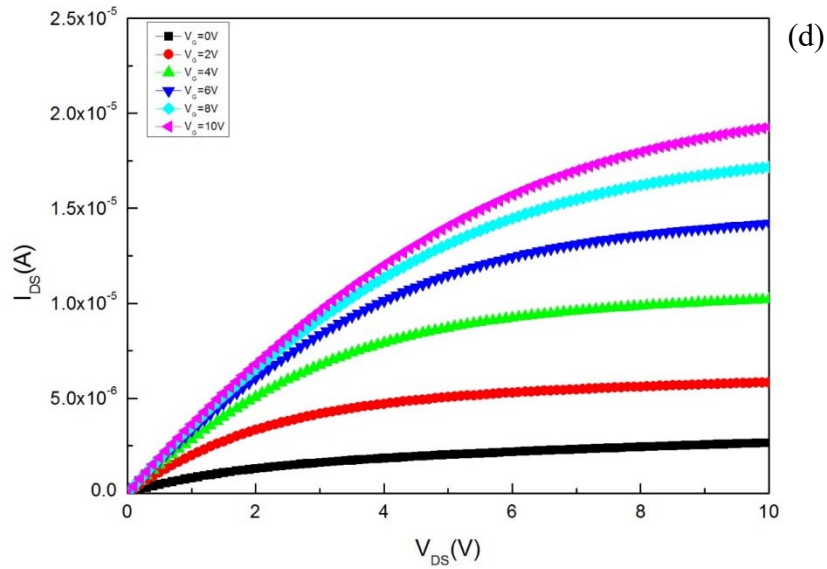
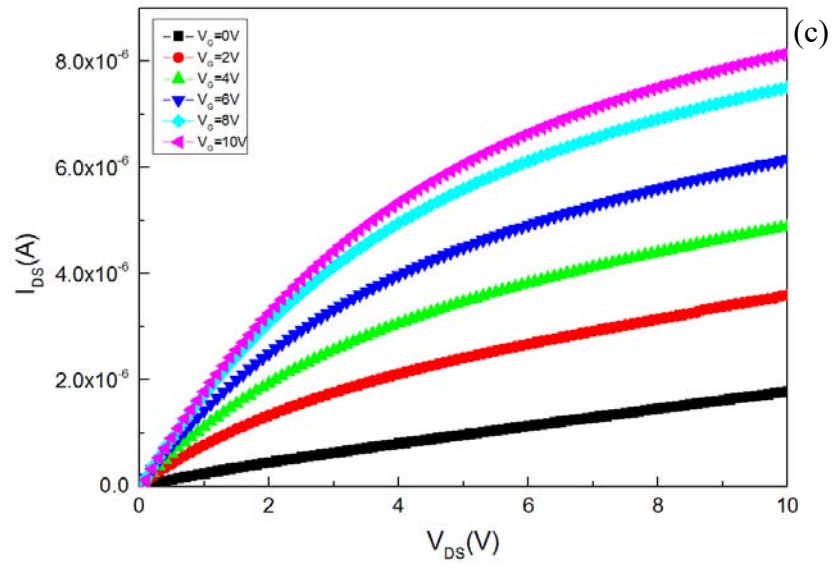
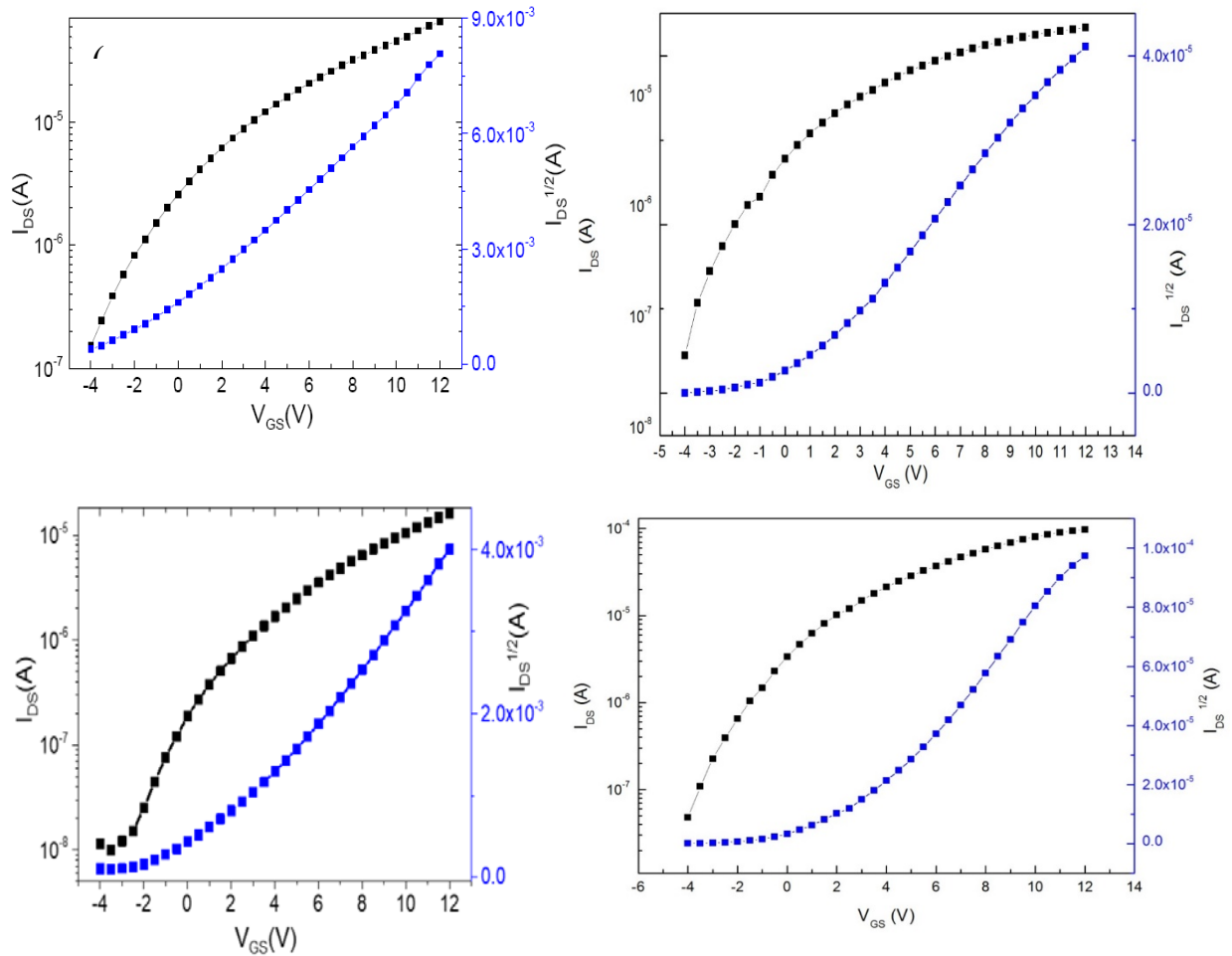


圖 3.4 氧氣流量不同的 ZTO-TFT 輸出特性
 (a)49:1 (b)48:2 (c)47:3 (d)46:4 (e)47:3

圖 3.5 氧氣流量不同條件下 ZTO-TFT 的 I_D - V_G 圖

(b)48:2 (c)47:3 (d)46:4 (e)47:3

元件	$V_{TH}(V)$	S.S (V/decade)
ZTO-4%	-1.02	0.472
ZTO-6%	-0.54	0.389
ZTO-8%	0.41	0.326
ZTO-10%	1.26	0.117

表 3.2 不同氧氣流量的 ZTO-TFT 電性參數

4. 結論

我們探討 ZTO 薄膜在不同氧氣氣下的薄膜特性，根據 XRD 發現 ZTO 薄膜並未有明顯的峰值，我們可以知道 ZTO 為非晶相的薄膜。在使用 UV-Vis 測量穿透率，得知穿透率會隨著氧氣氣的增加而增加。再透過量測霍爾效應，發現在氧氣含量為 5sccm 的時候，電阻值會稍微提高，但是因為氧氣含量提高，造成氧空缺被填補，從而導致載子濃度的降低。相比之下我們發現在氫氧比為 45:5(10%)的情況下，ZTO 薄膜的特性最好。

接著我們將 HfO_2 作為絕緣層，將不同氣氛下的 ZTO 薄膜，疊成 ZTO 薄膜電晶體，之後做電性分析，我們發現在 ZTO 薄膜電晶體內，氧氣含量增加導致氧空穴的減少，所以閘極電壓 (V_{GS}) 可以控制汲極電流 (I_{DS}) 可以進入飽和區。故我們可以知道在 ZTO-TFT 中，使用氬氧含量比為 45:5 的 ZTO 薄膜作為通道層是最為適合的。

5. 參考資料

- [1] T. Minami, H. Sato and H. Nanto, "Group III Impurity Doped Zinc Oxide Thin Films Prepared by RF Magnetron Sputtering," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 24, pp. L781-L784, 1985.
- [2] J. H. Park, K. J. Ahn, K. I. Park, S. I. Na and H. K. Kim, "An Al-doped ZnO electrode grown by highly efficient cylindrical rotating magnetron sputtering for low cost organic photovoltaics," Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 43, pp. 115101-115107, 2010.
- [3] H. Enoki, T. Nakayama, J. Echigoya, "The Electrical and Optical Properties of the ZnO_2SnO_2 Thin Films Prepared by RF Magnetron Sputtering," Physica Status Solid A, vol. A129 . pp. 181-191, 1992.
- [4] T. Minami, "Transparent and conductive multicomponent oxide films prepared by magnetron sputtering," Journal of Vacuum Science & Technology A, Vol. 17, pp. 1765-1772, 1999.
- [5] H. Un'no, N. Hikuma, T. Omata, N. Ueda, T. Hashimoto and H. Kawazoe, "Preparation of MgIn_2O_4 thin films on glass substrate by RF-sputtering", Japanese Journal of Applied Physics, vol. 32, pp. L1260-1262, 1993.
- [6] T. Minami, H. Sonohara, T. Kakumu, and S. Takata, "Highly transparent and conductive $\text{Zn}_2\text{In}_2\text{O}_5$ thin films prepared by rf magnetron sputtering," Japanese Journal of Applied Physics, vol.34, pp. L971-974, 1995.
- [7] T. Minami, Y. Takeda, S. Takata, T. Kakumu, "Preparation of transparent conducting $\text{In}_4\text{Sn}_3\text{O}_{12}$ thin films by DC magnetron sputtering," Thin Solid Films, vol. 13, pp. 308-309, 1997.
- [8] T. Minami, "Present Status of Transparent Conducting Oxide Thin-Film Development for Indium-Tin-Oxide (ITO) Substitutes", Thin Solid Films, Vol. 516, pp. 5822-5828, 2008.
- [9] Y. Shigesato, D. C. Paine, and T. E. Haynes: Adv. Mater. (Weinheim, Ger.) 4, pp. 503,1994.
- [10] J. Cui, A. Wang, N. L. Edleman, J. Ni, P. Lee, N. R. Armstrong, and T. Marks: Adv. Mater. (Weinheim, Ger.) 13, pp. 1476, 2001.

- [11] Y. Park, V. Choong, Y. Gao, B. R. Hsieh, and C. W. Tang, "Work function of indium tin oxide transparent conductor measured by photoelectron spectroscopy," *Applied Physics Letters*, vol.68, p.2699-2701, 1996.
- [12] D. H Kim, M. R. Park, H. J. Lee and G. H. Lee, "Thickness dependence of electrical properties of ITO film deposited on a plastic substrate by RF magnetron sputtering", *Applied Surface Science*, vol.253, pp.409-411, 2006.
- [13] H.Hosono, M. Yasukawa and H. Kawazoe"Novel oxide amorphous semiconductors: transparent conducting amorphous oxides,"*Journal of Non-Crystalline Solids* vol. 203, 334-344 (1996).
- [14] A. Suresh and J. F. Muth,"Bias stress stability of indium gallium zinc oxide channel based transparent thin film transistors,"*Appl. Phys. Lett.* 92, 033502 (2008)
- [15] F. Lemmi, W. Chung, S. Lin, P. M. Smith, T. Sasagawa, B. C. Drews,A. Hua, J. R. Stern and J. Y. Chen"Status of Si thin film transistors,"*IEEE Electron Device Lett.* 25 ,486 (2004).
- [16] C. D. Dimitrakopoulos and P. R. L. Malenfant"Organic thin film transistors for large area electronics,"*Adv. Mater.* 14, 99 (2002)
- [17] J. K. Jeong, H. W. Yang, J. H. Jeong, Y. G. Mo, and H. D. Kim"Origin of threshold voltage instability in indium-gallium-zinc oxide thin film transistors,"*Appl. Phys. Lett.* 93, 123508 (2008).
- [18] Hosono, H. (2006). "Ionic amorphous oxide semiconductors: Material design, carrier transport, and device application." *Journal of Non-Crystalline Solids*, 352(9-20), 851-858.
- [19] Schuegraf, K.F.; Chenming Hu, "Hole injection SiO₂/breakdown model for very low voltage lifetime extrapolation" *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 41, pp. 761, 1994.