

OLED封裝技術綜覽

OLED Encapsulation: An Overview

蔡豐羽

國立台灣大學(National Taiwan University) 材料系副教授

有機發光二極體 (organic light-emitting diodes : OLEDs)元件的材料易受環境(以水氣與氧氣為主)影響而產生急速劣化，因此必須以隔絕性極佳之封裝方法加以保護，始能達到符合實用之使用壽命。本文將介紹OLED之劣化機制、封裝需求、封裝技術發展現況，以及封裝技術未來發展方向。

Organic light-emitting diodes (OLED) require hermetic encapsulation to obtain adequate lifetime. This article provides an overview to the topics related to OLED encapsulation, including degradation mechanisms, encapsulation requirements, and recent advances as well as future development in encapsulation technologies.

關鍵字/Key Words

有機發光二極體(organic light-emitting diode : OLED)、封裝技術(encapsulation)、有機半導體(organic semiconductor)、有機光電(organic electronics)

一、OLED之封裝需求

OLED技術雖較其它顯示技術具有許多優勢，但其商業化過程卻仍遭遇重重困難，困難之一主因乃為OLED元件之高度不穩定性與極短的使用壽命。OLED元件之不穩定性主要來自於其構成材料之高反應性，例如：OLED元件中之有機發光材料多為低能隙(low energy band gap)之共軛(conjugated)結構；此類材料

之低能隙使其易受光照或加熱激發，而與環境中之氧化物如水或氧等產生氧化反應，亦即光氧化反應(photo-oxidation)。另外，低能隙之有機光電材料多具有較高的HOMO(highest occupied molecular orbital)分子軌域，因此即使該類材料處於未受激發之基態，也能輕易與氧化物產生氧化反應，使其喪失光電特性。除了有機光電材料本身的不穩定性之外，OLED元件中多需使用低功函數(work function)金屬

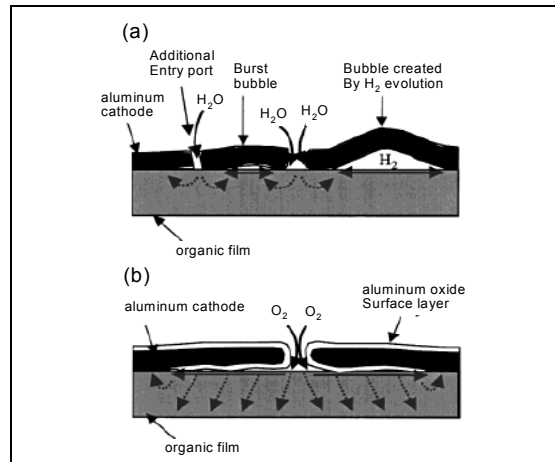
為電極，如鈣、鋇、鎂等。低功函數金屬皆具極強之還原性，在微量水或氧存在下即產生劇烈氧化反應；此氧化反應之副產物為氫氣，其在界面釋出時易造成元件脫層，使元件迅速毀壞，如圖一所示。

改善OLED元件之不穩定性最直接的方法為將元件封裝(encapsulation)，將環境中之水氣與氧氣及其它具不良影響之物質隔絕於外。除此主要目的之外，封裝亦可提供元件機械保護、幫助元件散熱、及調整元件之光輸出特性等功能。

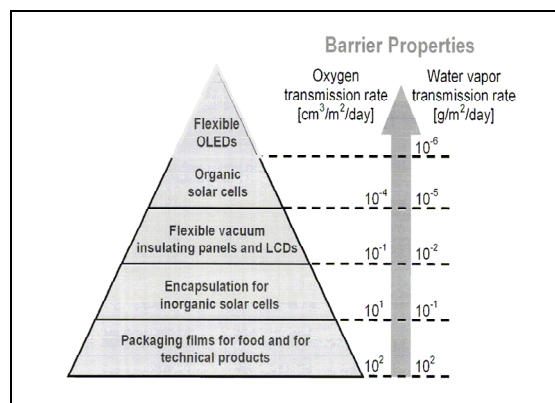
二、OLED封裝方法

如上所述，OLED元件必須經由封裝來避免其受水氣與氧氣破壞，但因OLED元件之結構、材料、設計等可有多種變化，其對水氣與氧氣之容忍度亦不同。一般來說，若欲使OLED元件達到10,000小時使用壽命，其對於水氣穿透率(water vapor transmission rate；WVTR)之容忍限度約為 1×10^{-6} g/m²/day，氧氣穿透率(oxygen vapor transmission rate；OTR)則約為 $1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-5}$ cm³/m²/day⁽²⁾。此WVTR與OTR極限即為OLED封裝技術研發之目標。與其它光電元件之耐水氧能力相較(圖二)，OLED封裝之WVTR與OTR要求極為嚴苛，實為研發上的一大難題。

一般微電子元件之封裝多利用有機材料為基底之塗料進行，但有機材料(包括所有塑膠材料)之WVTR與OTR皆在OLED要求之萬倍至百萬倍以上，因此無法沿用一般微電子元件之封裝方法，而必須研發採用不同技術。主要OLED封裝方法可分為傳統封裝與薄膜封裝，如圖三所示；以下分別介紹。

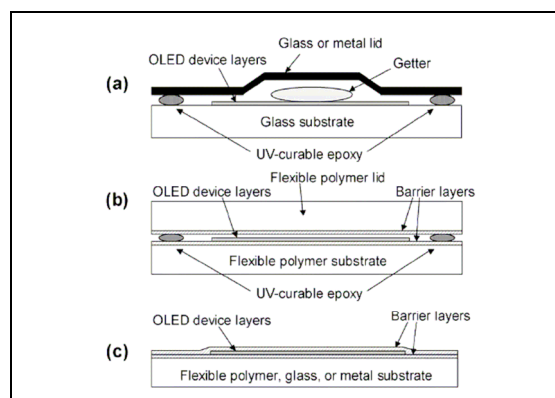


▲圖一 OLED中低功函數金屬電極受水氣與氧氣劣化機制示意圖⁽¹⁾



資料來源：取自Vitex system產品文獻

▲圖二 OLED之WVTR與OTR容忍度與其它光電元件之比較



▲圖三 OLED封裝方法(a)硬式元件之傳統封裝；(b)軟性元件之傳統封裝；(c)薄膜封裝⁽²⁾

(一)傳統封裝

如圖三(a)所示，對於使用玻璃基板之硬式OLEDs而言，現行之封裝法使用一片較元件面積略大之玻璃或金屬板將元件完全覆蓋，利用玻璃或金屬之不透氣性質作為主要氣體阻隔屏障，再以有機接著劑(如：UV膠)將蓋板四周固定，其中蓋板與元件間必須置入吸附劑(getter)以降低元件內部殘留的水氣與氧氣，並且吸收透過有機接著劑而滲入之水氣與氧氣，封裝完成後的元件如圖三(a)所示。但此封裝法有以下缺點：(1)吸附劑價昂，且會增加元件之重量及體積；(2)不適於大面積元件⁽³⁾；(3)不適用於軟性元件；(4)製程繁瑣，難以自動化。

若欲應用於軟性OLED元件上，亦可採用如圖三(b)所示之方法，亦即以一鍍有阻氣薄膜之塑膠基板作為蓋板，再以有機接著劑將蓋板四周固定於元件上。此法必須使用有效之阻氣薄膜，因此技術關鍵實與以下所述之薄膜封裝技術相同。

(二)薄膜封裝

為解決傳統封裝方法之不足及其軟性元件不適用性，研究者已提出薄膜封裝之概念，亦即以具有阻氣性之薄膜直接包覆整體元件⁽⁴⁻⁶⁾。如上所述，有機材料之阻氣能力遠不敷OLED所需，因此封裝薄膜必須以無機材料為主，如 SiO_2 、 Si_3N_4 、 Al_2O_3 等。一般封裝薄膜厚度可達微米以下，由於其厚度薄，因此仍可具有良好之可撓性；且由於薄膜封裝可直接在元件上沈積薄膜，更不需於元件內部添加乾燥劑，在製造與生產方面可降低OLED面板的成本。對於使用塑膠基板之軟性元件而言，除了元件頂層之封裝薄膜之外，為防止由基板本身滲透造

成有機元件的損害，基板上(元件底部)亦需能有效阻隔氣體之阻氣薄膜，如圖三(c)所示。薄膜封裝方法依材料的不同可分為：(1)無機薄膜封裝；(2)同時使用有機物與無機物的複合薄膜封裝，分述於下。

1. 無機薄膜封裝

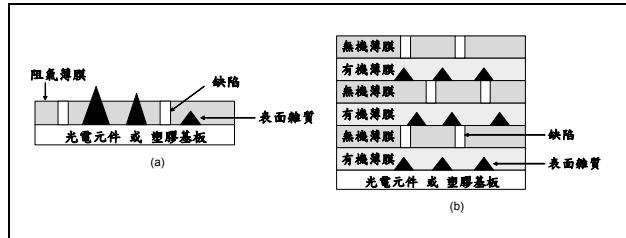
無機薄膜之阻氣能力雖遠優於有機材料，其柔軟性則遠不如，因此若欲使封裝後元件保有足夠柔軟性，所用之無機薄膜厚度必須極薄。許多研究者已嘗試使用一般薄膜沉積方法，如濺鍍(sputtering)、蒸鍍(evaporation)、電漿輔助化學氣相沉積(plasma enhanced chemical vapor deposition；PECVD)等在塑膠基板上製備 SiO_2 、 Si_3N_4 或 Al_2O_3 等阻氣薄膜，但發現不論其製程如何改良，薄膜之最低OTR與WVTR值僅能達到約 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ 範圍。造成此高透氣率的原因為阻氣薄膜內之缺陷(defect)，主要成因為：(1)成膜過程中，薄膜分子在隨機堆疊中產生堆疊不完全的孔洞；(2)加速粒子(如電漿中之離子)撞擊成膜表面所造薄膜之損傷；(3)成膜過程中，薄膜分子在氣相反應而產生顆粒，降低薄膜之緻密度；(4)薄膜之立體包覆率(step coverage或conformability)低，因此不易完全包覆基板表面之高低起伏(如灰塵等)。一般而言，薄膜中缺陷在高成膜溫度下會有顯著減少，但為配合有機材料與塑膠基板不耐高溫的特性，阻氣薄膜必須使用低溫成膜，更不利於其阻氣性質。阻氣薄膜內之缺陷狀況示意如圖四。

為解決無機薄膜中無法避免的缺陷問題，部分研究者改採原子層沉積技術(atomic layer deposition；ALD)來開發無機阻氣薄膜。ALD是已知薄膜品質最好，且薄膜阻氣能力最佳的薄膜沉積方法，其薄膜可達到趨近於零的缺陷

密度，並可100%包覆高深寬比(aspect ratio)極大的立體結構。ALD並可在低溫下成膜，更增加其在有機光電元件上之適用性(圖五)。文獻研究及筆者個人之研究，已證明ALD氧化物薄膜之阻氣能力遠較一般無機薄膜為佳，並已達到OLED封裝要求的WVTR與OTR範圍，如表一所示。

在實際元件封裝方面，文獻研究及筆者個人之研究，亦已證明ALD封裝可達到與傳統封裝相等或更佳之有機元件壽命，且其元件封裝製程溫度最低可達60度⁽¹²⁾，封裝層厚度只需100nm以下，即可達到與傳統封裝相同的封裝效果，如圖五所示⁽¹³⁾。

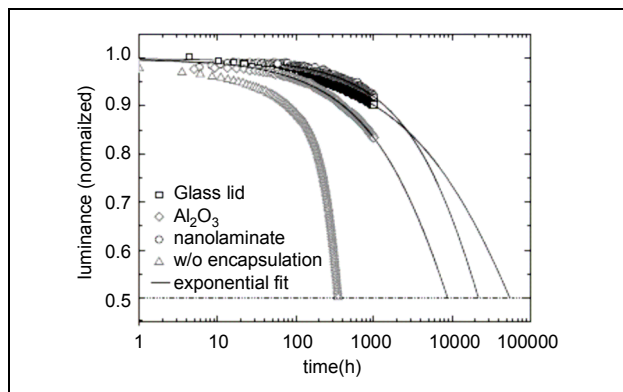
一般對ALD在實用性上最大的考量在於其低成膜速率，因為其成膜機制為自限式(self-limiting)的表面反應，因此一個反應循環(cycle)只能成長單一原子層(monolayer)，其厚度約在1Å上下。一個ALD反應循環所需時間依反應前驅物種類、機台設計、成膜溫度及其它條件、基板表面立體結構而不同，一般在0.5秒至數十秒不等。關於此成膜速率的考量，ALD則具有其它優勢可彌補，因此仍可有良好的實用性。ALD在實用性上的優勢包括：(1)薄膜之缺陷密度極低，因此所需薄膜厚度遠較其它技術沉積小；薄膜厚度小則總成膜時間可縮短；(2)ALD成膜均勻度不受基板大小影響，因此若基板面積加大，一次ALD製程所完成的產品量即增加；(3)ALD成膜具100%立體覆蓋率，因此一次製程可不限只處理一片基板，而可將多片基板



▲圖四 阻氣薄膜與元件表面之剖面示意圖：(a)單層無機阻氣膜之缺陷狀況；(b)有機薄膜與無機薄膜交互堆疊之多層阻氣膜之缺陷狀況

▼表一 ALD氧化物薄膜阻氣能力，測量儀器為MOCON偵測儀，測量最低極限為水氣： 10^{-3} g/m²/day；氧氣： 10^{-3} cm³/m²/day與鈣測試法(量測極限水氣 10^{-6} g/m²/day氧氣 10^{-5} g/m²/day)

隔絕薄膜	厚度(nm)	水氣穿透率 (g/m ² /day) 溫度=37.8~40℃	氧氣穿透率 (cm ³ /m ² /day) 溫度=20~23℃
PECVD Si ₃ N ₄ ⁽¹¹⁾	100	1.2	0.5
PECVD SiO _x	200~1000	<2×10 ⁻⁴ (7)	<10 ⁻¹ (8)
PECVD SiOxNy ⁽⁹⁾	150	<10 ⁻²	<10 ⁻¹
Reactive ion sputtered Al ₂ O ₃	100~120	1.8	0.1 ⁽¹⁰⁾ ~1.1
ALD Al ₂ O ₃	26~100	5×10 ⁻³ ~6×10 ⁻⁶ (11)	<1×10 ⁻³
OLED 容忍度		1×10 ⁻⁶	1×10 ⁻⁵ ~1×10 ⁻³



▲圖五 以ALD薄膜封裝之OLED元件其發光特性隨時間變化圖⁽¹³⁾

相疊，進行批次式成膜，使一次ALD製程所完成的產品量更增加；(4)氧化物之ALD成膜對氣氛的純淨度不高，因此只需低度真空即可操作，可降低機台

成本與操作時間。ALD技術目前已在顯示器產業上有量產應用，如圖六所示之大面積、大批次之ALD機台。

2. 多層複合薄膜封裝

為了克服一般無機薄膜缺陷過多的問題，部分研究者開發出以有機薄膜與無機薄膜交互堆疊而成的多層阻氣膜⁽¹⁴⁾。大部分有機薄膜阻氣效果極差，但具有將表面平坦化的功能，可改善無機薄膜的表面覆蓋；有機薄膜並可將相鄰兩層無機薄膜中之缺陷隔離，延長氣體透過多層阻氣膜所需之時間。隨著有機薄膜與無機薄膜之交互層數增加，其阻氣效果亦快速增加，一定層數後即可達到有機光電元件所需之阻氣性。此方法所需之薄膜總層數由無機薄膜之缺陷密度決定，但一般需要6~14層左右。此法雖有效，但實用上有一定的困難，因多層有機/無機膜之交疊製程複雜，成本降低不易。有機薄膜與無機薄膜交互堆疊之多層阻氣膜示意圖請參見圖四。

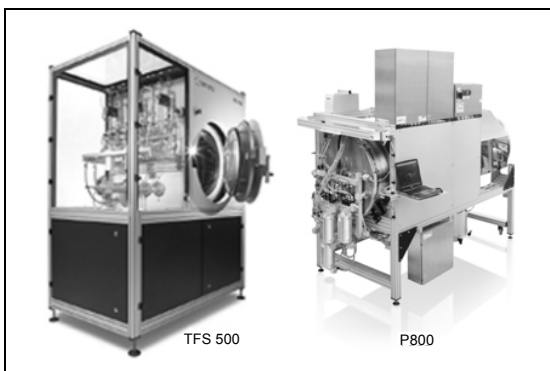
在多層阻氣膜中，有機薄膜沉積方式可用化學氣相沉積法⁽¹⁵⁾、光聚合法⁽¹⁶⁾、旋轉塗佈法等。化學氣相沉積法為在真空腔體中將小分子加熱裂解，並使之帶有不穩定之自由基，並

向上沈積在基板表面，與其它已裂解之小分子反應而形成聚合物。此種方法可以形成品質相當良好之有機膜，但由於需較高真空度之設備，以及製程較為繁複，故在應用上仍然有需要改善的地方。而光聚合法為將高分子單體與光起始化劑同時噴灑在基板表面，當照射UV光時，光起始化劑會裂解並帶有自由基與高分子單體反應，並於基板表面形成聚合反應而成膜。

多層薄膜技術中最具代表性者為Vitex System的BarixTM封裝技術(如圖七所示)⁽¹⁷⁾。BarixTM封裝技術以蒸鍍polyacrylate高分子膜和濺鍍 Al_2O_3 膜堆疊成多層薄膜；其薄膜層數在3~5對(總厚度約 $3\mu\text{m}$)時，WVTR可達 $1\times 10^{-6}\text{g/m}^2/\text{day}$ ，OTR亦可達 $1\times 10^{-5}\text{cm}^3/\text{m}^2/\text{day}$ ，已達到OLEDs需求(如圖八所示)。多層薄膜技術雖效果優異，但其製程繁複且耗時價昂，在工業應用上仍有許多困難。此方面持續研發之重點包括：(1)改善無機薄膜的品質：薄膜中缺陷愈少、所需薄膜層數愈少、製程愈簡單快速；(2)改善有機薄膜與無機薄膜製程的相容性，以降低製程複雜度與縮短製程時間，例如利用網印或噴墨印刷等快速製程印製有機薄膜。在目前業界中，Samsung於2009年發表可撓曲式AMOLED螢幕，並使用有機無機複合薄膜(Polyurea/ Al_2O_3)⁽¹⁸⁾可撓曲式封裝層。

三、OLED封裝發展趨勢

未來OLED封裝勢必走向薄膜化，而阻氣薄膜實用化所須面對主要的兩大課題為：價錢與功效。現今由Vitex開發之阻氣薄膜，其阻氣能力已經達到OLED之需求($\text{WVTR} < 1\times 10^{-6}\text{g/m}^2\text{ day}$, $\text{OTR} < 1\times 10^{-4}\text{ cc/m}^2\text{ day}$)。雖



資料來源：BeneQ網站

▲圖六 BeneQ所生產的量產型ALD機台

然如此，Vitex系統所製作出之阻氣薄膜至少需要以5組有機/無機薄膜交疊，才能達到此結果。其無機薄膜利用濺鍍法完成，有機層利用光聚合法完成。此製程之成膜過程都需在高真空下進行，再加上層數眾多，製造成本非常高昂。因此經由改善現有製程來降低阻氣薄膜之生產成本，將是未來發展薄膜封裝很重要之課題。簡化製程的發展方向如下。

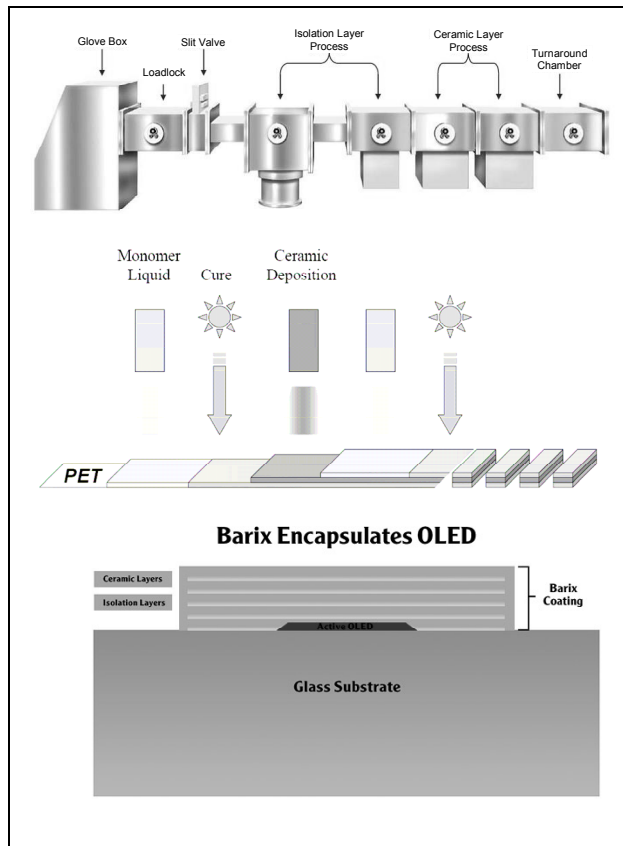
(一)單層阻氣膜或單一製程之多層阻氣膜

單層阻氣膜為最簡單的OLED薄膜封裝結構。依目前研究成果看來，僅有ALD技術具有以單層薄膜達到OLED封裝要求的能力，因此將會是未來研發的重點。另外，ALD技術亦可沉積有機薄膜(此技術又稱為分子層沉積技術或MLD)；當ALD搭配MLD時，即可在同一設備、同一製程中同時沉積有機與無機薄膜之多層阻氣薄膜，因此具有將多層阻氣薄膜製程大幅簡化之潛力。此外，ALD可製備之多種薄膜除作為阻氣薄膜，也具有許多其它有用特性，可同時作為OLED元件之其它結構，包括半導體層、緩衝層、電極、介電層等。若經由特定的設計，將可使ALD薄膜於元件內部具備多種用途。(如介電層兼阻氣層，上電極兼阻氣層)。ALD/MLD多層阻氣薄膜及ALD多功能阻氣層，為筆者目前研究之方向。

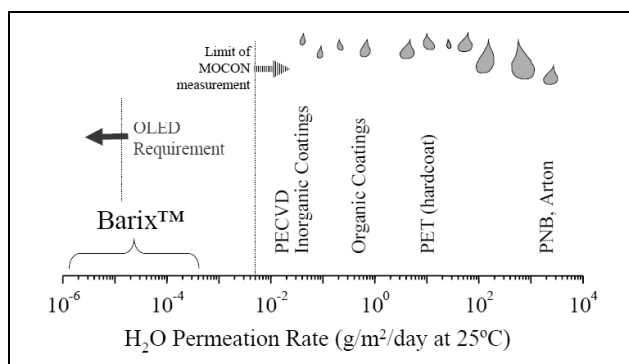
(二)溶液製程之阻氣薄膜

現有之阻氣薄膜大多是利用真空製程製造出之無機薄膜。由於真空製程之

成本一般遠大於高分子之溶液製程，因此以高分子溶液製程製成阻氣薄膜，將可大幅降低製造成本。但若要用純粹之高分子薄膜來取代無機薄膜幾乎不可能，主要的原因是高分子薄膜之阻氣性不佳，無



▲圖七 Barix™封裝設備技術與封裝層示意圖(彩圖請見目錄)



資料來源：取自Vitex system網站

▲圖八 一般高分子材料與製程之WVTR

法作為OLED的阻氣薄膜。但若將無機材料如黏土、雲母或奈米顆粒加入有機薄膜內後，將可使有機薄膜之阻氣能力提升，使其有機會成為光電元件之封裝阻氣薄膜或阻氣基板。因此，開發奈米顆粒混摻、脫層、分散、塗佈等技術，將有利於溶液製程之阻氣薄膜之發展。

四、結論

OLED之材料對環境具高度敏感性，因此對封裝之要求極為嚴苛。現有封裝方法係使用玻璃蓋板加上黏膠以及吸附劑的傳統封裝技術，但此技術不利大量生產且成本高(玻璃蓋板、黏膠與吸附劑可佔OLED面板成本的40%)，因此薄膜封裝技術將是OLED發展的必然趨勢。薄膜封裝技術開發的關鍵問題，在於一般薄膜中無法避免的缺陷，目前已驗證可解決此問題的方法，係使用有機/無機交疊而成之多層封裝薄膜，此類薄膜以Vitex所提出之BarixTM結構為代表。有機/無機多層封裝薄膜不但能符合OLED的封裝要求，且具有相當良好之撓曲程度，但其缺點為製程繁複，不易導入量產製程。針對此不足，許多研究者已轉而開發無缺陷之單層封裝薄膜；此研究方向目前以ALD技術最具潛力，因ALD具有低溫成膜、低缺陷密度、大面積、大批次、低真空等優點，不但與有機光電元件相容性高，亦有利於量產製程。文獻與筆者研究已驗證，ALD製備之薄膜可在極薄厚度即提供良好阻水阻氣效果，並能有效延長元件壽命。未來OLED封裝技術的發展，將朝向降低封裝薄膜厚度、降低製程溫度、簡化製程、降低水氣/氧氣穿透

率，以及增加元件壽命、增加可撓曲程度、整合封裝層與有機元件等方向發展，並降低封裝之製程成本。

參考文獻

1. 2008 International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging (ICEPT-HDP 2008)
2. J. S. Lewis, M. S. Weaver, IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., 10, 45, (2004).
3. H. Lifka, et al., SID Digest(2006), pp.436
4. K Yamashita, T. Mori, T. Mizutani, J. Phys. D: Appl. Phys., 34, 740 (2001).
5. S. Kho, D. Cho, D. Jung, Jpn. J. Appl. Phys., 41, L1336 (2002).
6. L. Berthelot, J. Tardy, M. Garrigues, P. Cremillieu, J. Joseph, B. Masenelli, Opt. Mat., 12, 261 (1999).
7. John Fahlteich, Matthias Fahland, Waldemar Schönberger, Nicolas Schiller, Thin Solid Films 516, 3081, (2008)
8. D.-S. Wu, T.-N. Chen, C.-C. Wu, C.-C. Chiang, Y.-P. Chen, R.-H. Horng, F.-S. Juang, Chem. Vap. Deposition, 12, 220–224, (2006)
9. Juno Shim, Ho Gyu Yoon, Sang-Hyun Na, Insun Kim, Soonjong Kwak, Surface & Coatings Technology 202, 2844–2849, (2008)
10. John Fahlteich, Matthias Fahland, Waldemar Schönberger, Nicolas Schiller, Thin Solid Films 517, 3075 (2009)
11. M. D. Groner, S. M. George, Appl. Phys. Lett. 89, 031915 (2006);
12. Patrick Gorm, Thomas Riedl, and Wolfgang Kowalsky, J. Phys. Chem. C, 113, 11126 (2009)
13. J. Meyer, D. Schneiderbach, T. Winkler, S. Hamwi, T. Weimann, P. Hinze, S. Ammermann, H.-H. Johannes, T. Riedl, W. Kowalsky, APPLIED PHYSICS LETTERS 94, 233305 (2009)
14. A.B. Chwang, M.A. Rothman, S.Y. Mao, R.H. Hewitt, M.S. Weaver, J.A. Silvermail, K. Rajan, M. Hack, J.J. Brown, X. Chu, L. Moro, T. Krajewski, N. Rutherford, Appl. Phys. Lett., 83(3), 413 (2003)
15. K Yamashita, T Mori and T Mizutani, J. Phys. D: Appl. Phys. 34 (2001) 740–743
16. Gi Heon Kim, Jiyoung Oh, Yong Suk Yang, Lee-Mi Do, Kyung Soo Suh, Thin, Solid Films 467, 1–3 (2004)
17. L. Moro, T.A. Krajewski, N. M. Rutherford, O. Philips, R.J. Visser, M. Gross, W. D. Bennett, G. Graff, Proc. of SPIE, 5214, 83 (2004).
18. Young Gu Lee, Yun-Hyuk Choi, In Seo Kee, Hong Shik Shim, YongWan Jin, Sangyoon Lee, Ken Ha Koh, Soonil Lee, Organic Electronics 10, 1352 (2009)