

以 MgO 基板成長高準直性奈米碳管之研究

林明憲* 劉益銘

國防大學理工學院應用化學及材料科學系

摘 要

本研究以單晶氧化鎂(MgO)作為基材及緩衝層，利用電子槍蒸鍍法將過渡金屬觸媒(Ni)均勻蒸鍍於單晶氧化鎂基材上，並以熱裂解化學氣相沉積法(Thermal Chemical Vapor Deposition ; TCVD)成長高準直性之奈米碳管(Carbon Nanotubes, CNTs)，並探討製程溫度、通氫前處理時間以及C₂H₂/H₂流量比例對所成長CNTs形態之影響。研究中所成長之碳管形態及場發射特性以場發式掃描電子顯微鏡、穿透式電子顯微鏡、拉曼光譜以及I-V特性量測進行觀察及研究。研究結果顯示，在製程溫度800 °C，C₂H₂/H₂流量比例10/40，通氫前處理時間30 min，以MgO為基板可大面積成長高準直性之奈米碳管，其碳管垂直成長高度可達24.8±2.2 μm，而管壁石墨層數約8~12層，所獲得之場發射開啟電場為3.1 V/μm。

關鍵詞：氧化鎂，蒸鍍法，奈米碳管

The Synthesis of Aligned Carbon Nanotubes with MgO Substrats

Ming-Hsien Lin * and Yih-Ming Liu

Department of Applied Chemical and Material Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University

ABSTRACT

The synthesis of aligned carbon nanotubes (CNTs) using thermal chemical vapor deposition (TCVD) and C₂H₂/H₂ as gas sources was studied in this work. Multi-wall CNTs (MCNTs) were grown on MgO substrates, which also act as a buffer layer, by TCVD process using an evaporated Ni layer (10 nm) as a catalyst. The effects of the process parameters such as the growth temperature, the hydrogen pretreatment time and the ratio of C₂H₂/H₂ source gases on the synthesized MCNTs were investigated. The morphology and emission properties of the grown MCNTs were observed and characterized using field-emission scanning electron microscope (FESEM), high-resolution transmission electron microscope (HRTEM), Raman spectroscopy, and the I-V measurement. Our result shows that, at the growth temperature of 800 °C, C₂H₂/H₂ ratio of 10/40 (sccm) and pre-annealed under H₂ ambience for 30 minutes, we can grow well-aligned MCNTs in large scale. The length of 24.8±2.2 μm of these MCNTs was achieved. HRTEM observation revealed that these MCNTs have a tubular structure whose tube-wall was composed of 8 to 12 layers of parallel graphene. Besides, the I-V measurement showed that they have good field emission property with a turn-on voltage (for a current density of 0.01 mA) of 3.1 V/μm.

Keywords: MgO, physical evaporation, carbon nanotube.

文稿收件日期 99.2.3; 文稿修正後接受日期 99.6.30; *通訊作者

Manuscript received February 3, 2010; revised June 30, 2010; * Corresponding author

一、前言

自從飯島博士(Iijima)在 1991 年發現了奈米碳管後，人們發現其具有非常獨特的物理特性，如：熱傳導性佳、導電性佳、強度佳與化學穩定性高等優點，運用奈米碳管作為場發射顯示器的發射體，可以大大的改善場發射特性，使得奈米碳管場發射陰極成為熱門之研究焦點[1, 2]。

因為奈米碳管管徑細小($<100\text{ nm}$)，且在幾何上的長度與直徑比(aspect ratio)非常大(>500)，因此具非常好的場發射特性，在很小的偏壓下($0.1\text{ V}/\mu\text{m}$)，就可以將電子發射出去，所以利用奈米碳管之高性能場發射特性可製作矩陣定址、高解析度、高效率、長壽命的奈米碳管場發射平板顯示器(Carbon Nanotube Field Emission Display, CNT-FED)，可取代傳統熱發射陰極射線管顯示器，且場發射顯示器兼具傳統映像管顯示器與液晶顯示器的優點，並可克服強光、高溫等使用環境，且無視角的限制和無需背光源的顯示特性[2, 3]。

除了 CNT-FED 的發展之外，在目前顯示器主流液晶顯示器(Thin Film Transistor Liquid Crystal Display, TFT-LCD)的發展方面，依據市場研究機構 iSuppli 的分析指出：在大尺寸電視的發展上，液晶電視發展之主要關鍵即在於背光源之發展與高輝度、低成本瓶頸之解決方案。其中場發射背光源在室溫以及外加電場下具有良好之電子發射特性，在背光源方面具有相當大之應用潛力[4]。其目前之關鍵技術在於發射材料之低功函數與尖銳外型，而奈米碳管因具有極低之門檻電壓(Threshold Voltage)、高場發射電流密度(High Current Density)以及良好之化學及場發射穩定性，是目前最具吸引力之電子發射材料。

除了 FED 以及背光源之應用外，目前利用碳管場發特性中高亮度、高穩定及耐久性之優點以製作照明燈具之概念及構想亦已被學界或業界提出[5-14]，此種碳管場發燈具因為屬於自發光光源，除發光效率高外，燈具內不需要填充汞蒸汽，能符合世界上尤其是歐盟對於環保或綠色產品的日漸嚴苛要求，因此為下世代燈具發展的重要技術。目前之技術瓶頸則在於如何找出一便宜而穩定之碳管陰極製程，估計此技術若能成功，將對市場規模龐大

之照明市場投下一極具威力之震撼彈，有可能成為市場之新主流產品。

目前，合成奈米碳管的製成方法有許多種，例如電弧放電法(Arc Discharge Method)[15]、雷射剝蝕法(Laser Ablation)[16]、化學氣相沉積法(Chemical Vapor Deposition ; CVD)[17]等方法。比較上述方法，化學氣相沉積法為公認合成奈米碳管最有效率的方法，並具有產量及密度大、純度高、易控制成長位置等優點，而所使用之金屬觸媒種類，則多以鐵、鈷、鎳三種過渡金屬或其合金為觸媒。

此外，並有文獻顯示，利用觸媒與氧化鎂(MgO)所混合製備而成的基材，可進一步成長出生產比例大且品質較高的單壁或雙壁奈米碳管[18, 19]，而 2005 年 Xiong 等人之研究亦指出，以單晶的氧化鎂作為基材，利用濺鍍法直接將鐵(Fe)觸媒鍍在基材上，並藉由化學氣相沉積法可成長出大面積陣列及準直性佳之高品質奈米碳管，其碳管長度可達 2.2 mm [20]。

因此，本研究以單晶氧化鎂作為基材，利用電子槍蒸鍍法將過渡金屬觸媒(Ni)均勻蒸鍍於單晶氧化鎂基材上，並以熱裂解化學氣相沉積法(Thermal Chemical Vapor Deposition ; TCVD)去大面積成長高準直性之奈米碳管，並針對反應溫度、通氫前處理時間及 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{H}_2$ 流量比例等實驗參數對於奈米碳管成長之影響，以及奈米碳管之場發射效應，作進一步的探討及分析。

二、研究內容及方法

本研究使用結晶方向 (100)之單晶氧化鎂(MgO)為基材，相關實驗步驟如下所述：

首先將基材浸入之丙酮(Acetone)溶液中超音波震盪 3~5 min，以清除表面雜質，相同步驟重複 3 次，隨後，並將完成清潔之氧化鎂基板浸入沸騰之異丙醇(Isopropyl Alcohol)溶液中，清潔基材試片上殘留之丙酮液體，最後再以去離子水沖淨備用。

將預先完成清潔之單晶氧化鎂(MgO)基材放置於圓形載台上，利用物理製程之蒸鍍法進行鎳(Ni)觸媒薄層的製備，其預抽的真空度為 $9\times 10^{-7}\text{ Torr}$ ，系統的蒸鍍速率平均為 0.4 nm/sec ，所蒸鍍的 Ni 觸媒厚度為 10 nm ，最

後，將完成蒸鍍之 Ni 觸媒試片裁切成 1×1 cm 的尺寸大小，並以沸騰之丙酮及異丙醇加以清潔，再以去離子水沖洗及氮氣吹乾備用。

將完成製備之基材試片置入石英舟上，隨之推至熱裂解化學氣相沉積反應系統中 (Thermal Chemical Vapor Deposition, TCVD, 系統示意圖如圖 1 所示)，並通入氫氣(流量 100 sccm) 及將系統升溫至反應設定溫度 ($600 \sim 900^\circ\text{C}$) 後，通入 H_2 (流量 40 sccm) 前處理 0~50 分鐘，接著導入不同比率之碳源氣體 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{H}_2$ 進行反應，控制奈米碳管生長時間為 20 分鐘，並利用 JEOL, JSM-6500 型掃描式電子顯微鏡 (Scanning Electron Microscopy, SEM)、Philips, Tecnai G2-200 kV 型高分辨穿透式電子顯微鏡 (High Resolution Transmission Electron Microscopy, HRTEM) 及 Renishaw in Via 雷射拉曼光譜儀 (Raman) 等儀器對所成長碳管之型態、結構及品質進行檢測。

此外，研究中並以 1×1 cm 尺寸基板所成長之奈米碳管試片作為場發射陰極板，並利用奈米碳管激發電子撞擊螢光板，觀察奈米碳管之場發射效能，另輔以 I-V Curve 檢測儀器進行場發射起始電壓 (Turn on Voltage, 於碳管場發射研究中，一般均定義為可發射 $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 電流量之電壓值) 數據之分析。

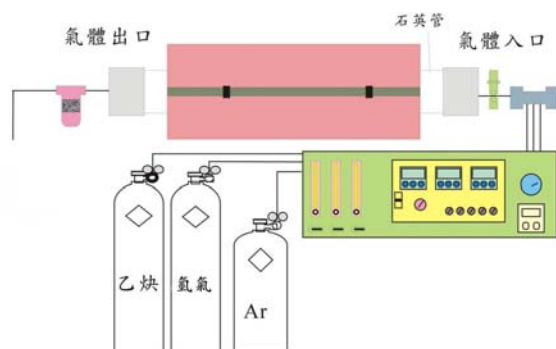


圖 1. 本研究所使用之熱裂解化學氣相沉積裝置示意圖[21]。

三、結果與討論

本研究分別針對碳管成長溫度、碳源氣體比例以及通氫前處理時間等製程參數對於奈米碳管成長之影響進行探討及分析，期能獲得高準直性奈米碳管成長之最佳製程參數。上述各製程參數對於奈米碳管成長之影響分述如

下：

3.1 碳管成長溫度之影響

在不同製程溫度下，由於碳源氣體 (C_2H_2) 裂解速率及在鎳 (Ni) 金屬觸媒顆粒中之擴散速率的不同，對於碳原子之沉積及析出所成長之奈米碳管形態也會造成相當的影響。因此，本研究首先針對不同製程溫度對於奈米碳管之成長形態及其生成量進行探討，製程溫度設定為 600°C 、 700°C 、 800°C 、 900°C ，成長時間為 20 min，而 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{H}_2$ 流量比例則參照文獻[9]以鎳 (Ni) 觸媒成長奈米碳管之最佳參數比例 ($\text{C}_2\text{H}_2:\text{H}_2=1:4$)，設定為 10/40。

圖 2 為 MgO 基材蒸鍍 10 nm Ni 觸媒於不同溫度 (600°C 、 700°C 、 800°C 、 900°C) 所成長之奈米碳管 SEM 觀察圖，由圖中得知，不同製程溫度所成長之奈米碳管在形態及生成量上皆有相當大之差異。當溫度為 600°C 時，因低溫環境下，碳源裂解不易且碳源子在觸媒顆粒中之擴散速度較低，使得碳原子無法快速的進行沉積反應，進而造成觸媒表面碳原子緩慢且多向性的沉積，所以在圖 2(a) 中可觀察到，均成長出螺旋形態之奈米碳螺旋線圈。而當溫度升高為 700°C 時，隨著觸媒反應能量及碳原子擴散速率的提升，可促使 Ni 觸媒表面碳原子快速沉積，碳原子多向性沉積現象趨減，使得奈米碳螺旋線圈生成比例明顯降低，進而有相當數量之平直奈米碳管生成，如圖 2(b) 所示。當溫度提升至 800°C 時，如圖 2(c) 所示，所生成之奈米碳管具有均勻的準直排列成長趨勢，此時碳管平均管徑約為 $38.8 \pm 5.7 \text{ nm}$ 。但若成長溫度持續增加至 900°C 時，由圖 2(d) 中可發現，過高的製程溫度將使得 C_2H_2 的催化裂解速率大幅增加，並大於 Ni 金屬觸媒沉積奈米碳管的反應速率，進而造成反應過程中 Ni 觸媒表面快速的被裂解碳所包覆產生鈍化，失去催化活性，導致奈米碳管在反應過程中在短時間內即停止成長。

因此，經由上述研究結果得知，當製程溫度為 800°C 時，碳源 (C_2H_2) 的催化裂解速率與碳原子在觸媒內之擴散及沉積速率可達到較佳之平衡狀態，可大面積成長準直排列之奈米碳管，為較適當的製程溫度。

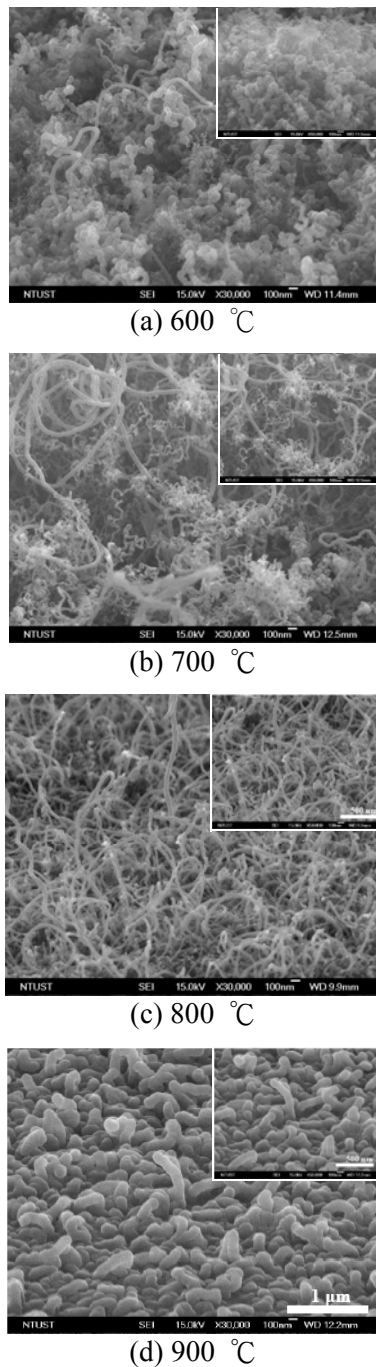


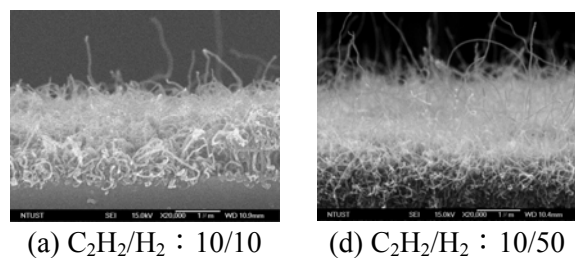
圖 2.在不同溫度下所成長之奈米碳管型態圖：(a) 600 °C；(b) 700 °C；(c) 800 °C；(d) 900 °C。

3.2 不同氣體流量比例之影響

在碳管成長之反應過程中，增加碳源氣體 (C_2H_2) 的流量，雖可提升碳原子的裂解量，但是在高溫反應製程中，碳原子在觸媒內的擴散及沉積速率若是無相對提高，卻容易促使觸媒表面被裂解碳所包覆而鈍化，因此活化氣體

(H_2) 所扮演的角色則為確保觸媒之表面活性，避免鈍化發生，進而促進奈米碳管的成長，所以適當的碳源與活化氣體流量比例對於奈米碳管的成長有正面的幫助。因此，本研究利用 TCVD 製程於 800 °C 進行奈米碳管的成長，並針對不同氣體流量比例(碳源氣體/活化氣體， C_2H_2)對於所成長奈米碳管之影響進行探討。

圖 3.為 MgO 基材蒸鍍 Ni 觸媒 10 nm 以不同 C_2H_2/H_2 氣體流量比例(10/10、10/20、10/40、10/50、10/60、10/70)於溫度 800 °C 所成長之奈米碳管 SEM 圖，由圖 3(a)中觀察得知，當 C_2H_2/H_2 流量比例為 10/10 時，所成長之奈米碳管雖屬於平直形態，但皆互相纏繞，並無垂直排列成長的現象，依本團隊以往的研究[22]得知，隨著 H_2 流量比例的提高，可增進奈米碳管垂直成長的速率，且碳管成長高度亦隨之大幅增加。因此，本研究則持续提升 H_2 流量比例，期能驅使奈米碳管垂直排列成長，但是，藉由圖 3. (a)至(f)奈米碳管成長趨勢的觀察，在同樣的製程環境下(800 °C)，發現隨著 H_2 流量比例的提高， C_2H_2/H_2 流量比例由 10/10 至 10/70，碳原子沉積速率並不如預期般大幅的提升，導致奈米碳管則無明顯垂直排列成長的趨勢，所以造成奈米碳管的成長狀態差異性不大，大部分仍互相纏繞成長，且奈米碳管成長量亦無法以碳管成長高度明確的估算比較，其原因可能如前一小節所述，在 800 °C 之製程溫度下，碳源(C_2H_2) 的催化裂解速率與碳原子在觸媒內之擴散及沉積速率已達到較佳之平衡狀態，因而在本研究中，提高活化氣體(H_2) 的流量比例，未能造成碳管成長形態之明顯差異，並無法有效的驅使奈米碳管垂直排列成長，且難以估算準直奈米碳管之生成量。



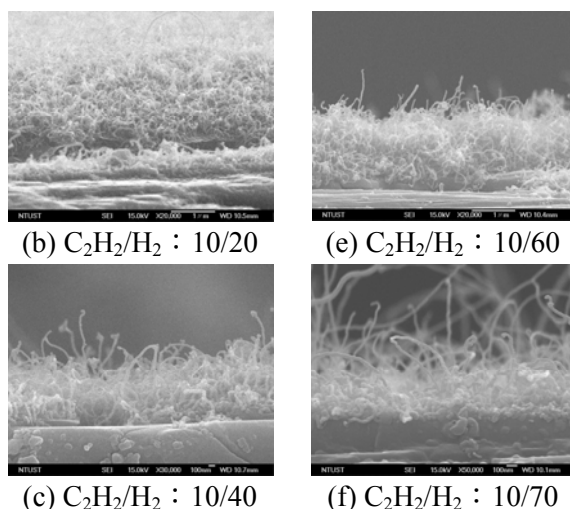


圖 3. MgO 基材蒸鍍 Ni 觸媒 10 nm 以不同 C_2H_2/H_2 氣體流量比例：(a) 10/10；(b) 10/20；(c) 10/40；(d) 10/50；(e) 10/60；(f) 10/70 於溫度 800 °C 所成長之奈米碳管 SEM 圖。

3.3 通氫前處理時間之影響

本研究在 800 °C 的製程溫度下，以不同通氫前處理時間成長奈米碳管，進一步分析探討所生成碳管之準直特性及生成量的差異，而 C_2H_2/H_2 流量比例則設定為 10/40。

圖 4 為 MgO 基材蒸鍍 Ni 觸媒 10 nm 於溫度 800 °C 經不同通氫前處理時間(0 min、10 min、20 min、30 min、40 min、50 min)所成長之奈米碳管 SEM 觀察圖，而碳管之成長高度及平均管徑則分別列於表 1。由圖中觀察發現，經由不同通氫前處理時間所成長之奈米碳管，其準直排列特性及生成量皆有所不同，當通氫前處理時間為 0 min 時，因碳管成長反應時，Ni 觸媒尚未滲入 MgO 基材並藉由氫氣活化而還原析出，因此碳管成長形態與一般 TCVD 直接成長碳管狀況無異，由圖 4(a)中可發現並無明顯垂直排列成長之現象，但隨著通氫前處理時間的增加，有效提升滲入 MgO 基材之 Ni 觸媒還原量及反應速率，因此，由圖 4(a)至(d)奈米碳管成長形態中，可明顯發現奈米碳管具有垂直排列成長之趨勢，其中以通氫前處理時間為 30 min 所成長之奈米碳管，不僅具有垂直排列成長之特性，且碳管生成量最多，其碳管成長高度可達 $24.8 \pm 2.2 \mu m$ (如表 1. 所示)。但是隨著通氫前處理時間持續增加至 40 min 及 50 min，觀察圖 4(e)及(f)發現，所成長之奈米碳管雖具有垂直成長形態，但碳管的

成長高度反而降低至 $14.4 \pm 0.5 \mu m$ 及 $11.6 \pm 2.1 \mu m$ (表 1)，碳管生成長度明顯減少，主要原因為 Ni 觸媒還原量及反應速率的持續提升，造成碳原子裂解供應量的不足，使得碳管的生成量有負成長之趨勢。

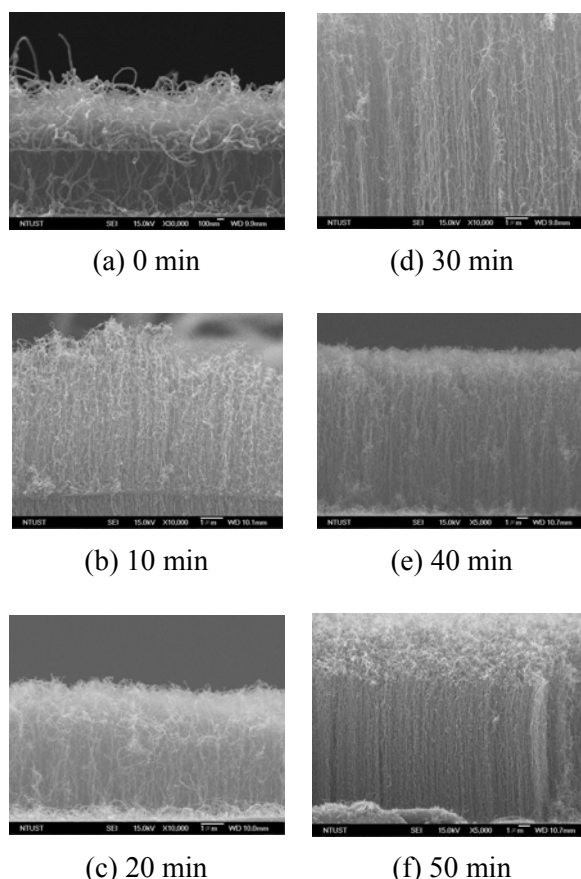


圖 4. 以 MgO 基材蒸鍍 Ni 觸媒 10 nm 於溫度 800 °C 經不同通氫前處理時間：(a) 0 min；(b) 10 min；(c) 20 min；(d) 30 min；(e) 40 min；(f) 50 min 所成長之奈米碳管低倍率 SEM 圖。

另觀察不同通氫前處理時間所成長奈米碳管的微觀形態，不同通氫前處理時間所成長之奈米碳管的平均管徑約為 $31.9 \pm 2.6 \text{ nm}$ (0 min)、 $33.5 \pm 4.4 \text{ nm}$ (10 min)、 $31.5 \pm 4.3 \text{ nm}$ (20 min)、 $30.4 \pm 6.3 \text{ nm}$ (30 min)、 $30.8 \pm 4.6 \text{ nm}$ (40 min)、 $30.5 \pm 2.7 \text{ nm}$ (50 min)，管徑大小並無明顯差異，因此，通氫前處理時間的不同對於所成長之奈米碳管的管徑尺寸並無太大影響。而進一步以拉曼(Raman)光譜分析碳管結構，則出現兩個主要峰值訊號，代表無序碳結構缺陷的 D-band 峰值出現在 1349 cm^{-1} 附近，代表有序碳石墨層結構的 G-band 峰值出現在 1597

cm^{-1} 附近，並由波峰強度比值(IG/ID)則可觀察出碳管結構的良窳，如圖 5.不同通氫前處理時間所成長之奈米碳管拉曼光譜圖，其 IG/ID 比值分別為 0.98(0 min)、0.86(10 min)、0.97(20 min)、0.96(30 min)、0.93(40 min)、0.91(50 min)，碳結構形態並無明顯之差異性。

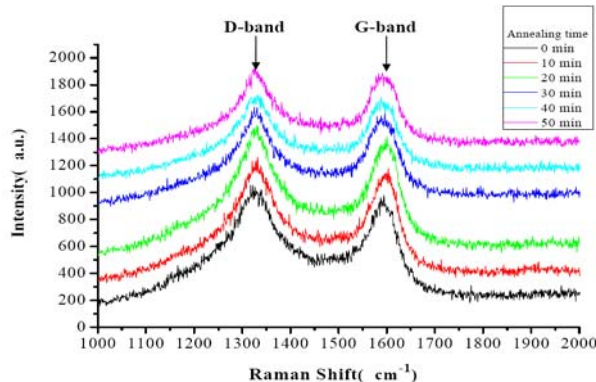


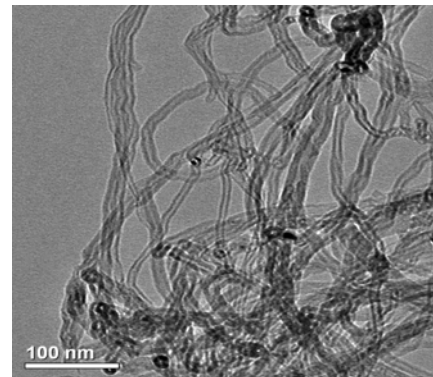
圖 5.不同通氫前處理時間所成長之奈米碳管拉曼光譜圖。

表 1.不同通氫前處理時間對於奈米碳管成長之影響分析表

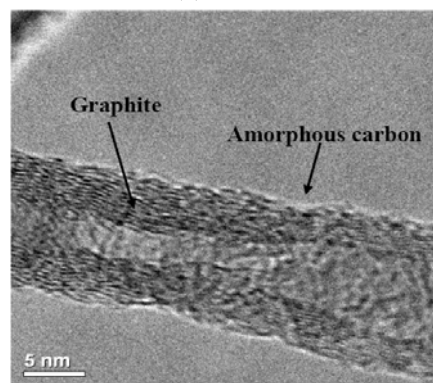
	0 min	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min
碳管成長高度 (μm)	1.03±0.1	3.5±0.4	5.3±0.7	24.8±2.2	14.4±0.5	11.6±2.1
碳管平均管徑 (nm)	31.9±2.6	33.5±4.4	31.5±4.3	30.4±6.3	30.8±4.6	30.5±2.7

3.4 奈米碳管之微觀結構及場發射效能分析

圖 6 為以 MgO 基材蒸鍍 Ni 觸媒 10 nm 於溫度 800 °C 經通氫前處理時間 30 min 所成長之奈米碳管 HR-TEM 結構圖，經觀察得知，其奈米碳管外徑約 29.8 ± 5.9 nm，內徑約 11.3 ± 1.1 nm，並有明顯之中空管狀結構，進而觀察圖 6(b)高倍率 TEM 圖，奈米碳管管壁為石墨層狀(Graphite)平行排列結構，層數約 8~12 層，而管壁外側則明顯有一層不均勻之非晶質碳(Amorphous Carbon)沉積，因此針對前一小節之拉曼光譜分析，經由通氫前處理時間 30 min 所成長之奈米碳管，其 IG/ID 比值為 0.96，當中代表無序結構碳排列的 D-band 訊號強度略大於代表 sp^2 石墨結構排列的 G-band 之原因，經推測主要是由此包覆在碳管管壁外層之非晶質碳雜質所造成的。



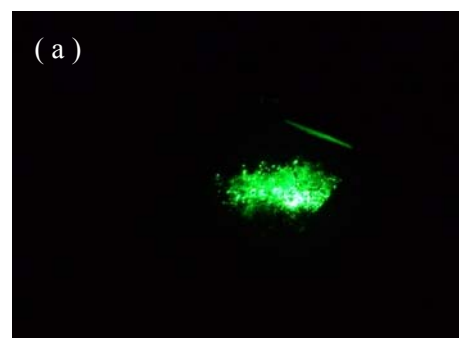
(a)低倍率



(b)高倍率

圖 6.以 MgO 基材蒸鍍 Ni 觸媒 10 nm 於溫度 800 °C 經通氫前處理時間 30 min 所成長之奈米碳管 HR-TEM 結構圖：(a)低倍率；(b)高倍率。

除了上述奈米碳管之型態及特性分析之外，本研究亦針對奈米碳管之場發射效能進行分析與評估，本研究以 1×1 cm 尺寸的奈米碳管試片作為場發射陰極板進行測試，由圖 7(a)觀察發現，藉由奈米碳管激發電子撞擊螢光板，可獲得均勻之亮點，並以圖 7(b)I-V 曲線圖分析得知，以 MgO 基材蒸鍍 Ni 觸媒經通氫前處理 30 min 於溫度 800 °C 所成長之奈米碳管的場發射開啟電場(Turn-on field)為 $3.1 \text{ V}/\mu\text{m}$ 。



參考文獻

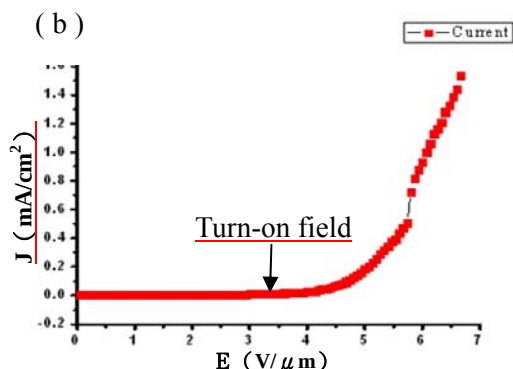


圖 7. 奈米碳管場發射測試(a)效能測試圖；(b)I-V 曲線圖。

四、結論

本研究以 MgO 基材蒸鍍 Ni 觸媒 10 nm，藉由 TCVD 製程參數的調整控制，成功的成長出高準直性陣列成長之奈米碳管，並發現藉由製程溫度的提高，可提升碳原子在 Ni 金屬觸媒之擴散及沉積速率，促進平直形態奈米碳管的成長，其中以製程溫度 800 °C 為成長高準直性奈米碳管最適當的製程溫度。而提高碳源氣體 C₂H₂/H₂ 流量比例，並未造成碳管成長形態之明顯差異，且無法有效的驅使奈米碳管垂直排列成長。而利用通氫前處理製程，亦可提升奈米碳管垂直排列成長之趨勢，尤其以通氫前處理 30 min 所成長之奈米碳管，不僅具有垂直排列成長之特性，其碳管成長高度可達 24.8±2.2 μm。

此外，藉由場發射特性之測試可得知，以 MgO 基材蒸鍍 Ni 觸媒所成長之奈米碳管具有良好的場發射效能，可於螢光板上觀察到均勻之亮點，並由 I-V 曲線圖分析得知，其場發射啟始電壓為 3.1 V/μm，對於未來場發射元件的開發及應用極具幫助。

誌謝

本研究幸得國防大學理工學院教師學術研究計畫之經費補助(計畫名稱：以 MgO 緩衝層成長高準直性奈米碳管之研究)方得以進行，謹此敬表感謝。

- [1] Iijima, S., "Helical Microtubules of Graphitic Carbon," *Nature*, Vol. 354, No. 7, pp. 56-58, 1991.
- [2] 成會明、張勁燕，奈米碳管，五南圖書出版公司，台北，第 36-42 頁，2004。
- [3] 顧宏壽、周本達、陳蜜、張德安、樊雨心及周宜衡，平面平版顯示器基本概論，高立圖書，台北，第 1-3 頁，2004。
- [4] *On Display*, Vol.1, Issue 2, iSuppli, 2004.
- [5] 邱正茂、賴詩文、賴宏仁，"LCD-TV 背光源的發展現況-誰能勝出"，*工業材料雜誌*，221，第 72-86 頁，2005。
- [6] 賴詩文、邱正茂、林正豐，"場發射平面光源技術"，*工業材料雜誌*，221，第 114-125 頁，2005。
- [7] Kim, J. H., Yoo, M. H., Yoo, D. W., Jung, H. M., and Ha, S. J., The 7th International Conference on Power Electronics, pp. 271-273, Korea, 2007.
- [8] Bonard, J. M., Stockli, T., Noury, O. and Chatelain, A., "Field emission from cylindrical carbon nanotube cathodes: Possibilities for luminescent tubes," *Appl. Phys. Lett.* 78, 2775, 2001.
- [9] Croci, M., Arfaoui, I., Stockli, T., Chatelain, A., and Bonard, J. M., "A fully sealed luminescent tube based on carbon nanotube field emission," *Microelectron. J.* 35, 329, 2004.
- [10] Wei, Y., Xiao, L., Zhu, F., Liu, L., Tang, J., Liu, P., and Fan, S. S., "Cold linear cathodes with carbon nanotube emitters and their application in luminescent," *Nanotechnology*, Vol. 18, 325702, 2007.
- [11] Chen, J., Liang, X. H., Deng, S. Z., and Xu, N. S., "Flat-panel luminescent lamp using carbon nanotube cathodes," *J. Vac. Sci. Technol. B.* 21, 1727, 2003.
- [12] Lee, S., and Jeon, D. Y., "Effect of degassed elements on the degradation behavior of carbon nanotube cathodes in sealed field emission-backlight units," *Appl. Phys. Lett.* 88, 063502, 2006.
- [13] Huang, J. X., Chen, J., Deng, S. Z., and Xu, N. S., "A prototype cylindrical fluorescent lamp based on carbon nanotube field emission," *Technical Digest of the 17th*

- IVNC, Massachusetts, p. 50, 2004.
- [14] Liu, Y. X., Liu, J. H., and Zhu, C. C., "Flame synthesis of carbon nanotubes for panel field emission lamp," *Applied Surface Science*, Vol. 255, pp. 7985-7989, 2009.
- [15] Kim, H. H., and Kim, H. J., "Preparation of carbon nanotubes by DC arc discharge process under reduced pressure in an air atmosphere," *Materials Science and Engineering B*, Vol. 133, pp. 241-244, 2006.
- [16] Zhu, S., Su, C. H., Cochrane, J. C., Lehoczy, S., Muntele, I., and Ila, D., "Growth of carbon nanostructure materials using laser vaporization," *Diamond and Related Materials*, Vol. 10, pp. 1190-1194, 2001.
- [17] Jung, M., Yong, E. K., Lee, J. K., Baik, Y. J., Lee, K. R., and Wan, P. J., "Growth of carbon nanotubes by chemical vapor deposition," *Diamond and Related Materials*, Vol. 10, pp. 1235-1240, 2001.
- [18] Flahaut, E., Peigney, A., Laurent, Ch., and Rousset, A., "Synthesis of single-walled carbon nanotube-Co-MgO composite powders and extraction of the nanotubes," *Journal of Materials Communications, Chemistry*, Vol. 10, pp. 249-252, 2000.
- [19] Colomer, J. F., Stephan, C., Lefrant, S., Tendeloo, G. V., Willems, I., Ko'nya, Z., Fonseca, A., Laurent, Ch., and Nagy, J. B., "Large-scale synthesis of single-wall carbon nanotubes by catalytic chemical vapor deposition (CCVD) method," *Chemical Physics Letters*, Vol. 317, pp. 83-89, 2000.
- [20] Xiong, G. Y., Wang, D. Z., and Ren, Z. F., "Aligned millimeter-long carbon nanotube arrays grown on single crystal magnesia," *Carbon*, Vol. 44, pp. 969-973, 2006.
- [21] 王翰韜, "以化學氣相沉積法低溫製備奈米碳管之研究", 碩士學位論文, 國防大學中正理工學院兵器系統工程研究所, 桃園, 第 35-37 頁, 2005。
- [22] 陳韋達, "緩衝層與覆蓋層材料於奈米碳管成長機制之探討", 碩士學位論文, 國防大學中正理工學院應用化學研究所, 桃園, 第 65-73 頁, 2007。