

28. 低成本奈米鑽石粉末製造與應用於抗反射及疏水/疏油行為之研究

林啟瑞¹、張建國²

¹國立台北科技大學 機電學院教授兼任院長

²國立台北科技大學 機電科技研究所研究生

摘要

本研究以低價位及較差等級的微米級工業鑽石粉末(每克拉為0.2~0.3美金)，利用高溫高壓法製成次微米級鑽石，再以行星式球磨法(Planetary ball mill)進行奈米級的鑽石粉末製作與分離。本方法可改善傳統爆炸法，因奈米鑽石產生聚集團聚、含雜質高及清洗與分離費用高之問題。同時，為了解決4C科技產品如顯示器、個人電腦(PC)、筆記型電腦及手機等，常因表面吸附灰塵、殘留指紋及刮傷等問題，而影響到產品功能，如光穿透率降低、眩光產生及美觀的破壞等。因此，本研究利用奈米級的鑽石粉末自製成奈米鑽石靶材，並以低溫及大面的方式製備可操控折射率之類鑽碳(DLC)膜，且本研究中製程有別於一般氣相合成方式或以石墨靶材所製造出的類鑽碳(DLC)膜。本研究所製備出的高品質類鑽碳(DLC)膜具有高硬度、高光穿透率、散熱快及疏水/疏油等之優異特性。

對於奈米鑽石應用於抗反射、疏水及疏油之特性，本研究方法主要分為三個部份來完成：(1)利用旋鍍法疊出大面積緊密排列的單層奈米球作為類光阻遮罩，再以濕式及乾式蝕刻在基板上製作出奈/微複合結構；(2)氟與碳形成穩定的共價鍵將會導致表面帶有低表面能的性質，因此，利用Hydro-fluoroether(HFE)溶液以Dip-coating方式，完成氟化層；(3)利用RF非平衡磁控濺鍍系統製備可操控折射率的類鑽碳(DLC)膜之製作。本研究之結果利用SEM、AFM、Raman spectrometer、UV/VIS/IR spectrometer及接觸角分析儀等分析其結構與機械性質及光學性質。由SEM觀察在RF power 150 W、沉積時間為3 hr的條件下，其表面形貌(plane view)仍然相當平整，不因在長時間的沉積後，因類鑽碳膜本身內應力較大的缺點，所造成濺鍍的類鑽碳膜產生裂痕。AFM分析範圍為50 μ m × 50 μ m，在RF power 150 W及沉積時間3 hr條件，基板經被覆類鑽碳膜後，其表面平均粗糙度Ra=0.670 nm，比未鍍膜基板Ra=3 nm，降低了4.5倍。D263T玻璃基板在工作壓力5 mtorr、RF power 150 W及沉積時間分別為3hr與4 hr的條件下，在中心波長570 nm，其光光穿透率分別為74.58%及68.41%。對於基板表面經microsphere array /HFE(Hydrofluoroether)/DLC後之疏水/疏油性分析，利用去離水(DI water)及動物油作為液滴，所測得的接觸角分別為58.85°及23.71°；表面能分別為

37.76 mN/m及66.84 mN/m；比較未鍍膜基板疏水/疏油所測得的接觸角分別為45.79°及15.94°；表面能分別為49.26 mN/m及70.19 mN/m。因此，基板經microsphere array /HFE (Hydro-fluoroether)/DLC處理後，可有效的達到疏水/疏油的功能，且疏水/疏油的接觸角，也分別增加了28.5%及48.7%。

關鍵字：奈米鑽石、類鑽碳膜、抗反射、疏水、疏油

一、前言

鑽石屬面心立方結構，(Face-Centered Cubic Structure, 簡稱F.C.C)(如圖1)，每一碳與碳的鍵結均是單鍵，鍵長為1.54 Å，密度3.515 g/cm³，鍵結能為711 kJ/mol。在鑽石結構中，碳原子以四個sp³軌域鍵結，使電子軌域完全局部化，為完整的共價鍵等方性結構致使無法有更多的電子使其導電；鍵結角度為109°28(如圖2)，為碳的同素異構物中密度最大者，也因為其結構緊密[1]。晶粒大小約為幾奈米到幾十奈米的奈米鑽石(nanodiamond)，不但仍具有鑽石的許多優異性質，如高硬度、熱傳導度、傳聲速度及彈性模數都是已知物質中之最高，其他如低摩擦係數、低膨脹係數、高折射率、遠紅外光至X-光範圍之光學穿透性、良好電絕緣性、負電子親和力、寬廣之價帶及高電子電洞移動速等優異特性(如表1) [2-4]，加上晶粒遠小於多晶鑽石，表面粗糙度(surface roughness)大幅降低。因此，大幅提升奈米鑽石在工業材料上的應用，其應用範圍包含拋光原料、金屬表面保護膜、材料強化劑、光電及生物醫學等用途。

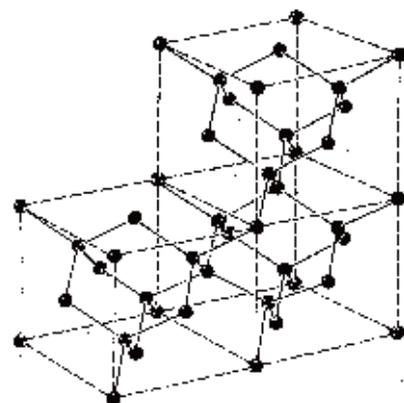


圖1 鑽石晶體結構[1]

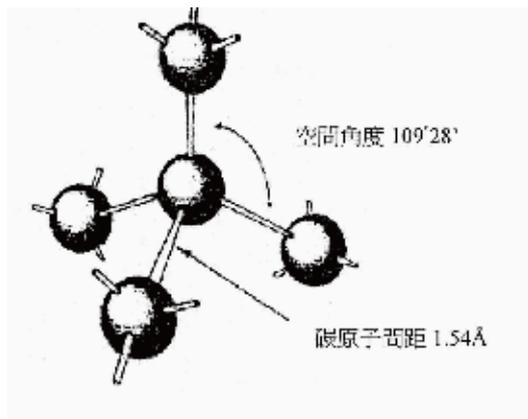


圖2碳原子之 sp^2 、 sp^3 結構示意圖[1]

表1 奈米鑽石之特性[2-4]

Properties	NCD
Electronic properties	
Bandgap (eV)	4.3~5.45
Electron affinity	Negative
Optical properties	
Transmission	~78-84%
Refractive index(at 633 nm)	2.27-2.35
Mechanical properties	
Hardness(GPa)	>90
Yung' s modulus(GPa)	~1000
Wear resistance	High
Coefficient of friction	0.1-0.01
Other properties	
Thermal conductivity (W/cm-K)	12
Thermal stability(°C)	>800
SAW phase velocity(km/s)	10

傳統奈米鑽石粉末的製作方法，大部份仍然以爆炸法為主。此法所用炸藥的碳成份要高，而氧份及其他雜質要少。其製作原理是藉由氣體爆炸將大量碳原子互相撞擊成奈米級的炸渣。炸渣內含有極多雜質，因此，炸藥爆炸後轉化成鑽石的比率很低，且奈米鑽石的晶粒大小分佈廣。為了減少奈米鑽石製作過程中所殘留的雜質與粉體的聚集，以及降低篩選與分離費用成本。本研究方法是以前較差等級的微米級工業鑽石粉末(每克拉為0.2~0.3美金)，利用高溫高壓法製成次微米級鑽石，再以行星式球磨法(Planetary ball mill)進行奈米級的鑽石製作與分離(如圖3)。

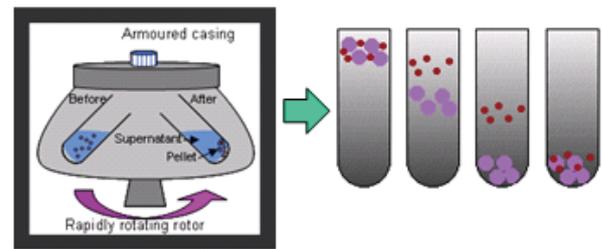


圖2行星式球磨法(Planetary ball mill)進行奈米級的鑽石製作與分離之示意圖

近年來隨著4C科技產業、能源產業及綠色科技等快速發展，使得光電薄膜及表面處理之技術已成為最熱門的研究領域。表面處理技術雖然發展已久，然而其應用範圍的廣度及規模，是近十年來才有顯著的成長，此項成長可歸因於快速及可靠的表面處理技術之發展。對於4C科技產品如顯示器、個人電腦(PC)、筆記型電腦(NB)及手機，以及眼鏡、光學鏡片、汽車玻璃及建築物玻璃或是雷達、天線等產品，利用表面處理技術使其具有疏水、疏油及防污的功用，更是當今表面處理技術之研究領域最重要的課題之一。目前針對疏水/疏油的操控技術之研究，主要研究方式有二：一為在已經具有疏水特性的材料表面上，增加粗糙化結構；另一為藉由低表面能的化學物質(如含氟化合物)，來修飾粗糙表面。因此，為了提高材料表面具有疏水性/疏油性的表面結構及特性之研究方法有：溶膠-凝膠(Sol-Gel)法、光化學法、高能物理法及靜電場法等方法[5]。

為了在基板表面製造奈/微結構陣列，本研究利用奈米球微影術(Nanosphere Lithography, NSL)，即為利用自組裝之方式在基板上堆疊出六方緊密週期排列的奈米球，奈米球具有類光阻之遮罩，並可藉由選擇奈米球尺寸作為控制其週期尺寸。在奈米球的自組裝堆疊中，本研究利用旋鍍法疊出大面積緊密排列的單層奈米球作為類光阻遮罩，再以濕式及乾式蝕刻在基板上製作出奈/微複合結構。氟是降低表面能中最有效的元素，因所有元素中氟有最小的原子半徑及最大的負電性，若是氟與碳形成穩定的共價鍵將會導致表面帶有低表面能的性質[6-7]。因此，本研究中利用Hydro- fluoroether(HFE)溶液以Dip-coating方式，完成氟化層。此外，研究中所使用的Hydrofluoroether(HFE)溶液具有無毒性及不燃性，以及對臭氧破壞係數為零，故對生態環境不會造成影響。類鑽碳(Diamond-Like Carbon, DLC)薄膜具有與天然鑽石相近的性質，如高硬度、低摩擦係數、表面平滑、高熱傳導性及耐化學腐蝕等。故其優越的性質廣泛的運用於各領域，如機械、汽車、電子、光學元件及醫療器材等工業之各種基材的保護膜。本研究中類鑽碳膜的製作是利用自製的奈米

鑽石粉末作為靶材，再利用RF非平衡磁控濺鍍系統 (RF un- balanced magnetron sputtering)，以低溫及大面積的方式製作完成。

二、研究方法

本研究是以低價位及低品質的工業級之微米鑽石粉末，製成奈米級的鑽石粉。利用自製的奈米鑽石粉末作為RF非平衡磁控濺鍍系統之靶材，最後，以低溫及大面積的方式製作高品質的類鑽碳(DLC)膜，其實驗流程設計圖，如圖3所示。對於基板具有抗反射及疏水/疏油的特性，本研究中主要是利用奈/微結構陣列、氟化層及類鑽碳膜的製作。然而，研究中除了須考量奈/微結構陣列、氟化層及類鑽碳膜之間的表面能外，也須考量三者之間光學的特性。因此，本研究將依奈/微結構陣列、氟化層及類鑽碳膜之膜層結構設計堆疊的方式，如圖4所示。

本研究中對於不同製程參數及製程方法，所造成薄膜性質的影響及特性，本研究利用SEM、AFM、Raman spectrometer、UV/VIS/IR spectro- meter及接觸角分析儀等分析其結構與機械性質及光學性質。

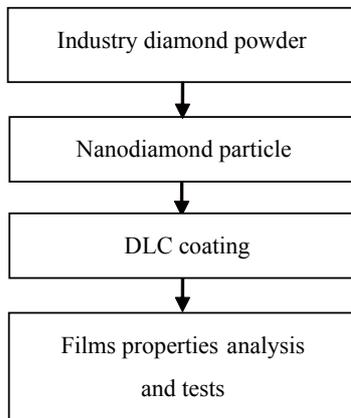


圖3 奈米鑽石及類鑽碳(DLC)膜的製作流程

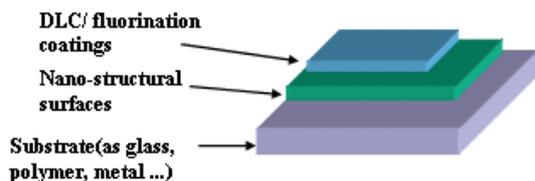


圖4 抗反射、疏水及疏油的膜層結構設計之示意圖

2.1 球磨法製作奈米粉末之機制

本研究中利用行星式球磨(Planetary ball mill)裝置，屬於高能量的加工設備，具有強力分散能力及量產能力，適於奈米粉體分散製程。球磨裝置是利用機械力帶動高硬度及耐磨耗研磨介質，使研磨介

質形成不同形式的相對運動作用，對粉體產生高能量密度的撞擊及剪切力，最後將粉體微細化或將團聚體分散。分散的粉體顆粒散佈於溶液之中，並受到分散劑作用使粉體而不聚集，因此製作奈米尺度的粉體分散液[8-10]。

由於球磨裝置視為一種高能量裝置，因此能量的輸入與粉體的分散效率關係密切。其中，加工能量表示有兩種：一為，能量密度(Energy Density)；另一為比能量(Specific Energy)[11-12]。能量密度(Energy Density)方程式，可寫成

$$E_v = \frac{P - P_o}{V} \quad (1)$$

其中， E_v ：能量密度(kW/l)；
 P ：研磨消耗能量(kW)；
 P_o ：空轉消耗能量(kW)；
 V ：研磨室容積(l)；

因此，能量密度方程式表示研磨腔體內單位體積的加工能量，並依此數值表現球磨裝置的加工性能。

比能量(Specific Energy)方程式，可寫成

$$E_m = \frac{P - P_o}{m \times c_v} \quad (2)$$

其中， E_m ：比能量(kWh/t)；
 m ：流量(t/h)；
 c_v ：原料固成分百分比；

因此，比能量方程式表示單位重量的原料所受到的加工能量，可利用此數據監控加工品質重現性。

2.2 RF非平衡磁控濺鍍系統

本研究所使用的鍍膜系統為RF非平衡磁控濺鍍機(如圖5)，大致分為：(1)真空抽氣系統；(2)壓力檢測與控制系統；(3)反應氣體輸送裝置；(4)直流電路系統；(5)磁控濺射槍裝置。分別說明如下：

(1) 真空抽氣系統

本實驗系統之真空抽氣可分為兩部份：第一部份為前級粗抽的迴轉式機械幫浦 (Rotary mechanical pump)，為日本ULVAC公司產品 (D- 950DK)，其抽氣速率為46 m³/hr，終端壓力為5×10⁻³ torr。第二部份為高真空擴散幫浦(High vacuum diffusion pump)，為美國Varian公司產品(VHS-6)，其抽氣速率為5580 m³/hr，終端壓力為< 5×10⁻⁹ torr。

(2) 壓力檢測與控制系統

真空計主要依據各種物理原理或是腔體中分子數目之多寡來量測壓力值，但到目前為止尚無任何一種真空計可涵蓋一大氣壓到超高真空範圍。故本系統利用兩種真空計來量測壓力值及壓力控制系統：

- (a) Thermocouple gauge：壓力量測範圍由 $990 \sim 10^{-3}$ torr，主要用來做低真空量測及初步真空測漏。
- (b) Ion gauge：壓力量測範圍由 $1 \sim 10^{-10}$ torr，主要用來做腔體潔淨低壓力用量測。

(3) 反應氣體輸送裝置

(a) 流量計

氫氣：Tylan FC-2900V-200SCCM

氮氣：Hastings 202-50SCCM

(b) 反應氣體

氫氣：勝益氣體，純度99.995%

氮氣：勝益氣體，純度99.998%

(c) 調節閥：惰性氣體與反應性氣體，共二組。

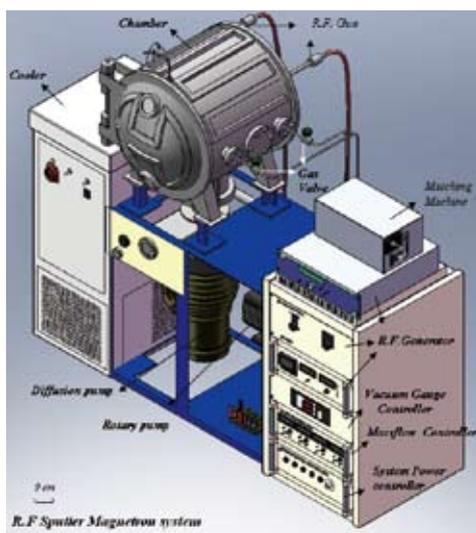


圖5自行組裝RF非平衡磁控濺鍍機之示意圖。其主要部分有：(1)真空抽氣系統；(2)反應氣體輸送裝置；(3)電源供應系統；(4)磁控濺射槍裝置。

三、實驗結果

本研究主要分為D263T玻璃基板上：(1)利用奈米球微影術(Nanosphere Lithography, NSL)製作奈/微複合結構；(2)利用Hydrofluoro ether(HFE)溶液以Dip-coating方式，製作氟化層；(3)利用RF非平衡磁控濺鍍系統，以低溫及大面積的方式製作類鑽碳膜。因此，本研究之結果，將進行對薄膜的微結構特性分析、潤濕性分析及光學特性分析，並探討在不同製程方式與參數條件下，進行比較分析與討論。

3.1 SEM影像分析薄膜結構

為了觀察D263T玻璃基板在披覆類鑽碳膜後的表面形貌及其微結構變化之情形，本研究利用掃描式電子顯微鏡 (SEM) 來觀察。在製程參數為RF power 150 W、工作壓力5 mtorr、基材旋轉速度為15 rpm及沉積時間為3 hr的條件下，D263T玻璃基板經披覆類鑽碳膜後，其表面形貌(plane view) 仍然相當平整(如圖6(a))，不因在長時間的沉積後，因類鑽碳膜本身內應力較大的缺點，所造成濺鍍的類鑽碳膜產生裂痕。其中，由掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀察其斷面 (cross-section) 圖，觀察到沉積時間3 hr的類鑽碳膜，其膜厚約為30 nm (如圖6(b))。

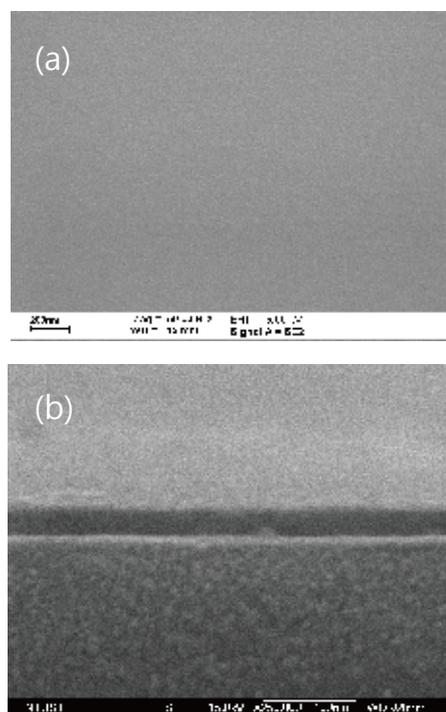


圖6 D263T玻璃基板披覆類鑽碳膜後之SEM圖。其中，RF power 150 W、工作壓力5 mtorr及沉積時間3 hr條件下，(a)表面形貌(plane view)圖；(b)斷面 (cross section) 圖。

3.2 拉曼光譜分析

本實驗中直接利用鑽石粉末之靶材製備類鑽碳膜，並將D263T玻璃基板表面經披覆類鑽碳膜後，進行拉曼光譜(Raman)分析。由光譜分析的結果可得到兩個特性峰，分別在 1350 cm^{-1} (Disorder carbon band, D band) 與 1580 cm^{-1} (Graphite band, G band)，此D band及G band 兩特性峰分別代表類鑽碳薄膜中之失序碳與石墨結構[14]。拉曼光譜 (Raman)分析是由於晶格振動導致極化率改變而引起的光散射，其產生的條件是某一簡諧振動分子對於分子的感應極化率不為零。因此，拉曼位移與物質分子的轉動及振動能程度有關，不同的分

子振動及晶體結構具有不同的特徵拉曼位移。為了探討本實驗中在不同製程參數條件下，對類鑽碳膜 sp^3/sp^2 結構的影響，本實驗利用波長為514.5 nm的激發源，對試片表面進行Ramam光譜分析，以及對Ramam光譜分析結果以高斯函數回歸分析 (Gaussian function) 進行資料處理。

圖7顯示在製程參數分別為，工作壓力5 m torr、基材旋轉速度為15 rpm及改變RF power與沉積時間條件下，以RF power 150 W及沉積時間4 hr所得類鑽碳膜的Ramam光譜分析結果之G band峰值(1593 cm^{-1})有向高波數較多的偏移。Ferrari[13]認為 sp^3C 含量從0增加到100%，相對應 sp^2C 會以環狀結構逐漸變為鏈狀結構，由於鏈狀結構的鍵長比環狀短，所以振動頻率會增加，在拉曼光譜上表現為G band峰值移向高波數。因此，此分析結果顯示出 sp^2 有較低的含量。

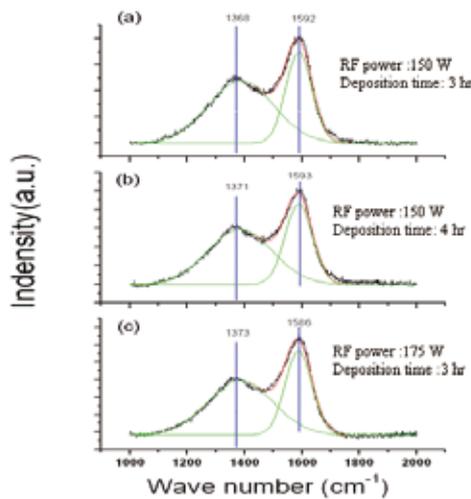


圖7 D263T玻璃基板披覆DLC膜後進行Ramam光譜分析圖。其RF power與沉積時間及G band峰值分別為：(a) 150 W / 3 hr / 1592 cm^{-1} ；(b) 150 W / 4hr / 1593 cm^{-1} ；(c) 175 W / 3 hr / 1586 cm^{-1} 。

3.3 原子力顯微鏡分析鍍膜的表面型態

利用AFM分析D263T玻璃基板未鍍膜及披覆類鑽碳膜後之表面粗糙度。其中，AFM在試片表面作等力掃描，並利用電子迴路控制使探針與力場的作用力保持一定，來得到試片的表面型態，其空間精度可達原子尺度，故可分析平整度較高的類鑽碳膜。本研究是利用低溫及大面積的方式製作類鑽碳膜，因此，薄膜的均勻性對其光學及機械特性影響就顯得格外重要，故將D263T玻璃基板披覆DLC膜後，利用AFM分析範圍為 $50\mu m \times 50\mu m$ ，測量其表面平均粗糙度(Ra)值。

圖8 顯示D263T玻璃基板經披覆類鑽碳膜的表面平均粗糙度(Ra)值，經比未鍍膜的D263T玻璃基板之

Ra=3 nm更低。因此，D263T玻璃基板表面經披覆類鑽碳膜後能有效填平其表面之不平整的結構。特別在製程參數為RF power 150 W、工作壓力5 mtorr、沉積時間3 hr及基材旋轉速度為15 rpm的條件下，D263T玻璃基板經披覆DLC膜後，其表面平均粗糙度為最低(Ra= 0.670 nm)(如圖9)。對於改變工作壓力、沉積時間及RF power時，表面粗糙度的提高，推測是因為粒子的動能提昇使得re-sputtering的現象更加顯著而造成。

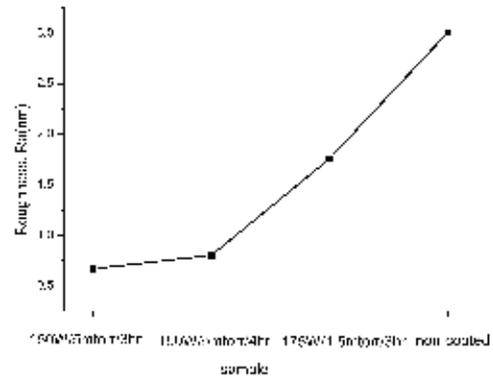


圖8 AFM分析範圍在 $50\mu m \times 50\mu m$ 的D263T玻璃基板披覆DLC膜的表面平均粗糙度(Ra)值之結果

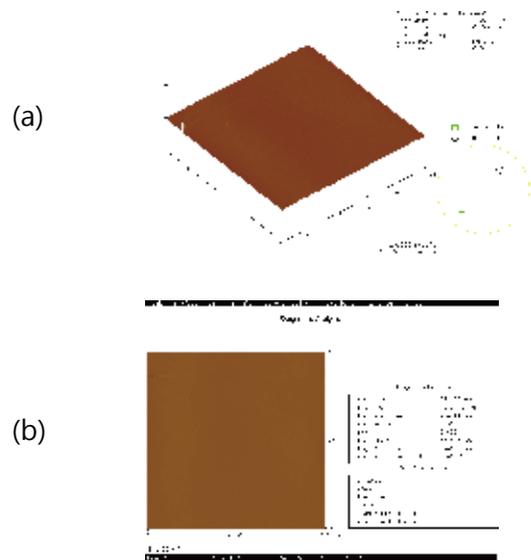


圖9 D263T玻璃基板披覆DLC膜後之AFM分析結果，其中AFM分析的範圍為 $50\mu m \times 50\mu m$ 。其製程參數為RF Power 150 W、工作壓力5 mtorr、沉積時間3 hr及基材旋轉速度為15 rpm。(a)為AFM分析的3D圖，(b)為AFM分析的2D圖，由圖中得到DLC膜的表面平均粗糙度(Ra)值為0.670 nm。

3.4 類鑽碳膜之光學性質分析

本研究中為了探討類鑽碳膜之不同結構，對其光學特性之影響，故利用UV/VIS/IR spectrometer (MP 100-M)測量D263T玻璃基板上類鑽碳膜的光穿透率及反射率。D263T玻璃基板上經披覆單層的類鑽碳膜

後，在波長範圍由380 nm至950 nm之間的光穿透率及光反射率，如圖10所示。D263T玻璃基板未鍍膜時在中心波長570 nm的光穿透率約為92%及反射率為8%。然而，在工作壓力5 mtorr、RF power 150 W及沉積時間分別為3hr與4 hr的條件下，其光光穿透率分別為74.58%及68.41%(如圖10(a))；其光反射率分別為13%及16%(如圖10(b))。由D. R. Tallant等人文獻[15]得知光穿透率及反射率之所以降低，主要是因為薄膜的折射率改變而上升所致。

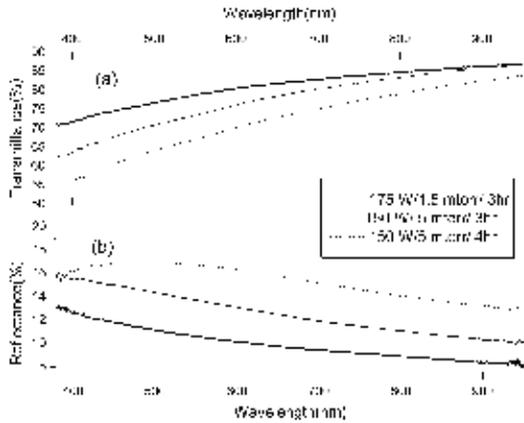


圖10 D263T玻璃基板在不同製程參數條件，所披覆類鑽碳膜後的穿透率及反射率之變化。其中，分析的波長從380 nm至950 nm之間，(a)穿透率；(b)反射率之變化。

3.5 類鑽碳膜之疏水/疏油特性分析

3.5.1 類鑽碳膜之疏水特性分析

本實驗中為了探討類鑽碳膜之疏水性，故研究中將分成兩個部份作為討論：(1)基板表面未經特殊處理，直接披覆類鑽碳膜；(2)基板表面經奈/微米結構陣列、氟化處理及披覆類鑽碳膜的疏水性。本實驗中接觸角的量測是採用靜置液滴法(sessile drop method)，即將一定量的液滴輕沾於待測物體表面之處，接著藉由攝影鏡頭擷取影像並進行接觸角測定。其中，本實驗中為避免水中的雜質影響到測量結果，實驗所選用的液體為去離子(DI water)。

由接觸角分析結果，D263T玻璃基板經披覆類鑽碳膜後，其接觸角均大於未鍍膜的45.79°，特別在工作壓力5 mtorr、RF power 150W及沉積時間3 hr條件下，其接觸角高於84.53°(如圖11)。因此，由接觸角分析結果，類鑽碳膜有較高的疏水性。對於基板表面經microsphere array/HFE (Hydro- fluoroether)/DLC後，其接觸角為58.85°；表面能為37.76 mN/m，比未鍍膜的表面能(49.26 mN/m)更低(如圖12)。因此，本實驗中在D263T玻璃基板表面製作微米球陣列及塗佈氟化物與披覆類鑽碳膜後，可提高其疏水性。

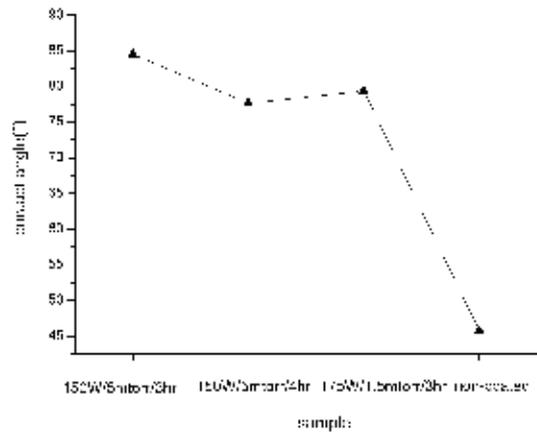


圖11 D263T玻璃基板未鍍膜及披覆類鑽碳膜後，利用去離水(DI water)測量其接觸角之分析結果。

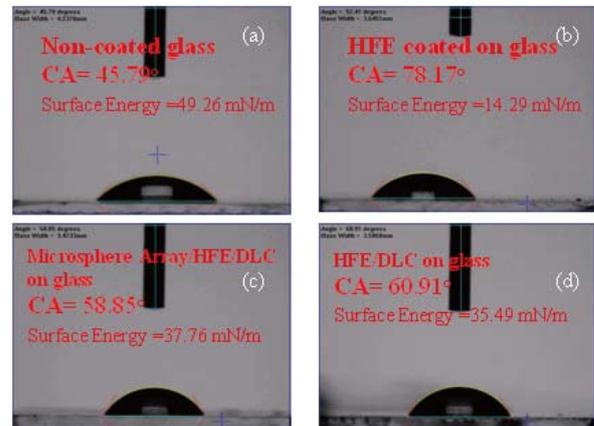


圖12 D263T玻璃基板未鍍膜及表面微細結構化、氟化處理及披覆類鑽碳膜後，利用去離水(DI water)測量其接觸角與表面張力之分析結果。其中，(a)未鍍膜；(b)基板表面塗佈HFE(Hydrofluoroether)；(c)基板表面製作微米球陣列及塗佈氟化物與披覆類鑽碳膜；(d)基板表面塗佈氟化物與披覆類鑽碳膜。

3.5.2 類鑽碳膜之疏油特性分析

本實驗中為了探討類鑽碳膜之疏油性，故選擇動物油作為比較D263T玻璃基板表面未處理及處理之接觸角與表面能分析。由接觸角分析結果，對於D263T玻璃基板表面具有較高親油性，其所測得的接觸角為15.94°；表面能為70.19 mN/m(如圖13(a))。因此，為了有效提高基板表面具有疏油的特性，本實驗中在基板表面經微米球陣列及塗佈氟化物與披覆類鑽碳膜。由接觸角分析結果，顯示出基板經微米球陣列及塗佈氟化物與披覆類鑽碳膜後，其接觸角與表面能分別為23.71°及66.84 mN/m(如圖13(c))。

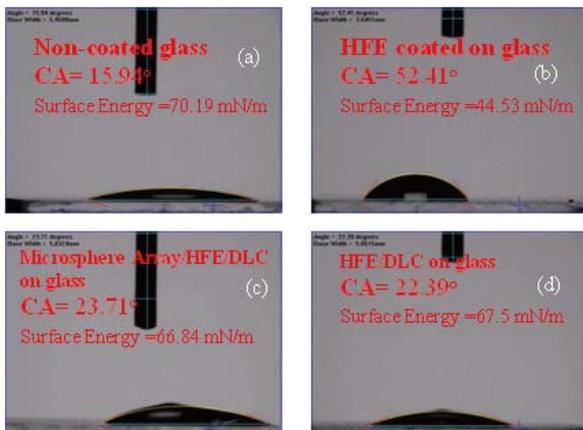


圖13 D263T玻璃基板未鍍膜及表面經微結構化、氟化處理及披覆類鑽碳膜後，利用動物油測量其接觸角與表面張力之分析結果。其中，(a)未鍍膜；(b)基板表面塗佈HFE(Hydrofluoroether)；(c)基板表面製作微米球陣列及塗佈氟化物與披覆類鑽碳膜；(d)基板表面塗佈氟化物與披覆類鑽碳膜。

四、結論

本研究為了提高基板表面同時具有抗反射、疏水及疏油的特性，在基板表面上製作微米球陣列、氟化物處理及披覆類鑽碳膜，作為奈/微複合結構表面及降低材料的表面能。因此，本論文之研究成果，將歸納如下：

- (1)本研究是以奈米鑽石粉末作為自製之靶材，再利用RF非平衡磁控濺鍍機，進行低溫及大面積製程的類鑽碳膜沉積。利用SEM觀察D263T玻璃基板在披覆類鑽碳膜後的表面形貌及其結構變化之情形。分析結果顯示，在製程參數為RF power 150 W、基材旋轉速度為15 rpm及沉積時間為3 hr的條件下，其表面形貌(plane view) 仍然相當平整，不因在長時間的沉積後，因類鑽碳膜本身內應力較大的缺點，所造成濺鍍的類鑽碳膜產生裂痕。
- (2)本研究利用拉曼光譜(Raman)進行薄膜結構組成分析，其中波長為514.5 nm的Laser作為激發源。由分析結果顯示，以RF power 150 W及沉積時間4 hr所得類鑽碳膜的Raman光譜分析結果之G band峰值(1593 cm^{-1})有向高波數較多的偏移。因此，此分析結果顯示出 sp^2 有較低的含量。
- (3)利用AFM分析D263T玻璃基板未鍍膜及披覆類鑽碳膜後之表面粗糙度。其中，AFM分析範圍為 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ ，測量其表面平均粗糙度(Ra)值。由分析結果顯示，D263T玻璃基板經披覆類鑽碳膜的表面平均粗糙度(Ra)值，經

比未鍍膜的D263T玻璃基板之Ra值更低。特別在製程參數為RF power 150 W、工作壓力5 mtorr、沉積時間3 hr及基材旋轉速度為15 rpm的條件下，D263T玻璃基板經披覆類鑽碳膜後，其表面平均粗糙度為最低值($Ra = 0.670\text{ nm}$)，比未鍍膜基板 $Ra = 3\text{ nm}$ ，降低了4.5倍。

- (4)D263T玻璃基板上，經披覆單層的類鑽碳膜後，在波長範圍由380 nm至950 nm之間的光穿透率及光反射率的分析結果。以工作壓力5 mtorr、RF power 150 W及沉積時間分別為3hr與4 hr的條件下，其光光穿透率分別為74.58%及68.41%；其光反射率分別為13%及16%。
- (5)對於疏水性的分析，以去離水(DI water)作為液滴。由接觸角分析結果顯示，D263T玻璃基板經披覆類鑽碳膜後，其接觸角均大於未鍍膜的 45.79° ，特別在工作壓力5 mtorr、RF power 150W及沉積時間3 hr條件下，其接觸角高於 84.53° ，比未鍍膜的基板提昇了1.85倍。
- (6)類鑽碳膜之疏油性，選擇動物油作為液滴。由接觸角分析結果顯示，D263T玻璃基板表面具有較高親油性，其所測得的接觸角為 15.94° ；表面能為 70.19 mN/m 。基板經microsphere array/HFE (Hydrofluoroether)/DLC處理後，其接觸角與表面能分別為 23.71° 及 66.84 mN/m 。因此，基板經處理後比未處理的基板的接觸角增加了48%；表面能降低了5%。

參考文獻

1. 許庭璋，微波輔助化學氣相沈積合成奈米碳管與特性分析，碩士論文，國立臺北科技大學，台北，台灣，2002
2. T. Sharda et al., Diamond Nanocrystals, Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, 2004, pp. 337-370.
3. J. W. Baldwin et al., Fabrication of short-wavelength photonic crystals in wide-band-gap nanocrystalline diamond films, J. Vac. Sci. Technol. B, 2006, pp. 50-54.
4. P. Achatz et al., Optical properties of nano-crystalline diamond thin films, Appl. Phys. Lett, 2006, pp. 101908.
5. 沈斯凱，以微機電製程探討微尺度結構表面接觸角與微滴操控之研究，碩士論文，國立臺灣大學，台北，台灣，2005

6. E. F. Hare et al., Properties of Films of Adsorbed Fluorinated Acids, *Journal of physical chemistry*, 1954, pp. 236-239.
7. L. Y. Meng et al., Effect of fluorination of carbon nanotubes on superhydrophobic properties of fluoro-based films, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2010, pp. 559-563.
8. 徐敬添、張義和、簡維誼、蔡書雅·奈米微分散技術與材料應用·奈米技術專刊·第140-148頁·2001
9. 賴耿陽·工業分散技術·復漢出版社·台灣·2000
10. 周大鑫·奈米粉體分散設備發展現況·奈米機械技術專輯·第5-6頁·2006
11. 陳仁英譯·超微細研磨技術在奈米科技上之應用·工業材料雜誌·第171-178頁·2002
12. Pawar J.M. et al., Choosing the Best Media Mill for Your Wet Grinding Application, *Paint and Coating Industry*, 2003, pp. 90-95.
13. Ferrari, A.C., A model to interpret the Raman spectra of disordered, amorphous and nanostructured carbons, *Materials Research Society Symposium – Proceedings*, 2001, pp. W11.5.1-W11.5.12.
14. P.V. Huong, Structural studies of diamond films and Ultrahard materials by Raman and Micro-Raman Spectroscopies, *Diamond Relat. Mater.*, 1991, pp. 33-40.
15. D. R. Tallant et al., The thermal stability of diamond-like carbon, *Diamond Relat. Mater.*, 1995, pp. 191.