

# 準分子雷射鍍製碳膜

方治國<sup>1</sup> 何惠雯<sup>2</sup> 余佳凝<sup>2</sup>

1. 國立宜蘭大學機械與機電工程學系教授
2. 國立宜蘭大學機械與機電工程學系學生

## 摘要

碳膜主要是由元素碳所構成之薄膜鍍層，包括化學氣相沈積鑽石膜、石墨膜、無定形碳膜(類鑽碳膜)、及電漿高分子膜等。碳膜具有獨特且可調整之各種特性組合，包括高硬度及高耐磨耗性、化學鈍性、及磨潤特性等。然而其缺點是成膜製程通常須在真空系統進行，本研究則於大氣環境及室溫下利用脈衝式雷射鍍製碳膜。

本研究使用 ArF 準分子雷射(波長 193 nm)照射於浸泡在環己烷之單晶矽表面以鍍製碳膜。鍍膜以原子力顯微鏡觀察其表面形貌，其平均粗糙度(Ra)約 0.275 nm。碳膜經拉曼光譜儀(激發雷射波長 532 nm)分析其結構特徵，除 G band 外，可發現  $\beta$ -SiC 拉曼譜峰。

**關鍵詞：**準分子雷射、環己烷、拉曼光譜、原子力顯微鏡

# Deposition of Carbon Films by Exvimer Laser

## Irradiation

Chih-Kuo Fang<sup>1</sup>, Huei-Wun He<sup>2</sup>, Jia-Ning Yu<sup>2</sup>

1. Professor, Department of Mechanical and Electromechanical Engineering, National Ilan University.
2. Undergraduate Student, Department of Mechanical and Electromechanical Engineering, National Ilan University.

### ABSTRACT

Carbon films are thin film coatings consisting predominantly of the chemical element carbon. Which include CVD diamond films, graphite films, amorphous carbon films (diamond-like carbon, DLC) as well as plasma polymer films. Carbon films possess unique and adjustable combination of properties such as high hardness and wear resistance, chemical resistance and good tribological performances. However, the disadvantage is that their deposition process generally need vacuum systems. In this study, carbon films have been produced through pulsed-laser deposition in the atmosphere at room temperature.

ArF Excimer laser ( $\lambda = 193$  nm) irradiation of a single-crystalline silicon surface immersed under cyclohexane liquid is demonstrated to form carbon films. Atomic force microscopy has been used to study the surface topography of the deposited carbon films. The average surface roughness (Ra) is about 0.275 nm. Raman analyses at 532 nm excitation wavelength are employed to characterize the structure of the deposited films. In addition to the G band, Raman peak due to  $\beta$ -SiC is observed.

**Keywords:** Excimer laser, Cyclohexane, Carbon film, AFM, Raman Spectrum

## 一、前言

在機、光、電等應用領域中，為滿足各種元件不同物性、化性的需求，例如導電性、硬度、磨耗性、耐蝕性、熱導性、及光學特性等，薄膜技術之開發和應用益形重要。

在硬度及耐磨耗性方面，目前已知的材料中，鑽石(Diamond)擁有最好的硬度。1954年由美國通用公司(General Electric Company)首發先例，在高壓、高溫(1700 K)的工作環境下，做出人工合成的鑽石〔陳炳州，2002〕。但由於鑽石膜必須在高溫下合成，常無法滿足許多機、光、電元件低溫製程之需求。因此尋求其他碳膜之製備已成為熱門的研究議題。

碳原子以  $sp^1$ 、 $sp^2$  和  $sp^3$  三種混層軌域存在。自然界中，碳的結晶型態主要有鑽石和石墨兩種，鑽石是  $sp^3$  共價鍵結四面體結構(C-C 距離 1.54 Å)，緊密堆積，原子間結合性強。石墨(Graphite)則是  $sp^2$  共價鍵結層狀六方網狀結構，兩碳鍵距離為 1.48 Å，每層距離為 3.35 Å，易形成層狀剝離，表 1-1 為鑽石及石墨特性之比較)。

表 1-1 鑽石及石墨特性比較〔黃瑞成，2007；周上智，2001〕

	鑽石	石墨
結構	$sp^3$ 鍵結	$sp^2$ 鍵結

密度(g/cm <sup>2</sup> )	3.515	2.26
拉曼譜峰 (cm <sup>-1</sup> )	1332	1580 (單晶)
熔點 (°C )	4000	3797
25°C 時電阻率 (Ω-cm)	10 <sup>16</sup>	10 <sup>-3</sup> ~10 <sup>-5</sup>

在碳膜方面，依照各種碳-碳之鍵結比例不同，可分為四類：鑽石膜、石墨膜、類高分子薄膜(Polymer-like films)、類鑽碳膜(Diamond-like carbon, DLC)。其中石墨膜有 sp<sup>2</sup> 和 sp<sup>3</sup> 兩種軌域(sp<sup>2</sup> 占多數比例)，能導電，氫含量比例低(< 30 atom %)，硬度低(< 10 Gpa)。類高分子薄膜 sp<sup>1</sup> 占大多數比例(sp<sup>2</sup> 和 sp<sup>3</sup> 也可能以少數比例包含其中)，具絕緣性，其性質與高分子材料類似，但不具有高分子重複單元之分子結構，含氫量較高(>45 atom %)，硬度非常低(<<10 Gpa)。至於類鑽碳膜則是介於鑽石和石墨中間，一般為含有 sp<sup>3</sup> 和 sp<sup>2</sup> 之鍵結(sp<sup>3</sup> 鍵結佔多數比例) 混合而無順序 (Chaotic) 的非晶或無定形碳(Amorphous Carbon, a-C)結構。因四面體結構之 sp<sup>3</sup> 鍵結佔多數比例，故稱為四面體無定形碳(Tetrahedral amorphous carbon, ta-C)。由於具有鑽石之部分特性，故又稱為類鑽碳膜。所謂無定形碳係指其內部結構。實際上，DLC 結構並非真正的無定形體，而是在無定形碳基地中具有石墨或鑽石之多晶(Polycrystalline)或奈米晶(Nanocrystalline)結構，故具有短程規律性(Short-range order)，只是由碳原子六角形環狀平面形成的層狀結構零亂不規則，晶體形成有缺陷，且晶粒微小，含有少量雜質。類鑽碳膜細部分類如下：(1) 含氫量在 1 atom %內，直接稱作類

鑽碳膜。結構有單晶(Single Crystal)、複晶(Polycrystal)、奈米晶(Nano-crystal)、及非晶質(Amorphous)；(2)含氫量在 50 atom %內，稱為含氫無定形碳(Hydrogenated amorphous carbon, a-C:H) 或含氫類鑽碳膜。其結構多為非晶質含氫類鑽或微晶粒。

類鑽碳膜係最早是由 Aisenberg [ Aisenberg and Chabot, 1969 ] 在 NASA Elec. Res. Center, 利用 Ion-beam deposition 於矽基板上得到一種透明膜，對此膜做出多種測試後，發現其與鑽石性質有許多相似之處，但結構是以非晶質為主，故以類鑽碳膜命名。由於 DLC 為非晶質結構，故表面平整度可達奈米等級，可降低相對運動元件之磨耗。而製程上，類鑽碳膜能在低溫(相較於鑽石膜之高溫製程)下進行，故能適用於某些耐熱性不佳的基板，例如塑膠、鋁材等。由於 DLC 具有高硬度之特點，可應用在光學鏡片、電腦資料儲存的光碟及硬碟等，以避免表面之刮傷。此外，其抗酸鹼特性可對化學藥品儲槽內部常因腐蝕而破裂之問題有所改善。另外在生醫工程上，對於人工合成材料要求較為嚴謹，DLC 因有極佳的生物相容性，不會引起血栓等併發症，故在生醫領域之應用有不錯之前景。在光電產業方面，製程及系統運作上散熱能力常為重要因素，由於 DLC 具高導熱性，有助於電子或光電元件封裝之熱傳效果，延長系統壽命。

類鑽碳膜之成膜係藉由碳粒子在基材上凝結成暫穩態相 (Metastable phases)，一般係透過真空鍍膜製程：例如化學氣相蒸鍍法 (Chemical Vapor Deposition, CVD)、濺鍍 (Sputtering)、雷射燒蝕 (Laser ablation)、及離子植入 (Ion implantation)等。而雷射燒蝕法中的中脈衝式雷射沈積法 (Pulsed Laser Deposition, PLD) 在真空無氫環境下已證實可有效合成非晶質碳膜 [Marquardt et al., 1985]。此技術具有低成膜溫度及高成膜速率等特點。其薄膜特性與真空度、雷射波長、及功率密度等製程參數有關。製程環境至少須達  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  Pa 真空度，所需最低功率密度隨雷射波長而增加，例如波長 248 nm 之 KrF 準分子雷射(Excimer laser)之功率密度須達  $3 \times 10^6$  W/mm<sup>2</sup> [Voevodin and Donley, 1996]。

前述準分子雷射在 1975 年左右被開發，一般以化性活潑之鹵素(如 F<sub>2</sub>、Cl<sub>2</sub>、及 Br<sub>2</sub>)與惰性氣體(如 He、Ne、Ar、及 Kr)之混合氣作為共振腔中之雷射激發介質，故屬氣體雷射。惰性氣體化性雖極不活潑，但被激發至激態後則較易與其他分子結合而構成雙原子氣體分子，此即所謂「準分子」或「受激雙體」- Excited dimer，其縮寫即為 Excimer。例如 Ar 與 F 結合成激發態的準分子 ArF，但並不穩定，經過幾個毫微秒又轉為穩定的基態—Ar、F<sub>2</sub>，過程中會釋放出一光子(波長 193nm)，光子在光共振腔內震盪，當到達一定能量時，準分

子雷射光便由光共振腔射出，放出高功率紫外光。準分子雷射波長落在深紫外光(Deep UV)範圍，為 UV 範圍內最強的雷射。各種準分子雷射之波長及其他參數如表 1-2。一般脈衝式雷射沈積法係利用短脈衝準分子雷射經由光學系統，於真空中轟擊石墨靶材，利用光熱(Photothermal)及光化學(Photochemical)反應打斷其鍵結，使碳子原子沈積於基材表面以製備碳膜。

表 1-2 各種準分子雷射參數〔許嘉瑋，2004；黃威智，2005〕

	波長 (nm)	光子能量 (eV)	最大功率 (W)	脈衝時間 (nS)
ArF	193	6.42	60	10-30
KrF	248	4.98	150	10-30
XeF	351	3.53	70	10-30
XeCl	308	4.03	200	10-200
KrCl	222	5.58	10	10-30

由於前述製程皆須在真空環境下進行，而本研究則尋求一種常壓、室溫之準分子雷射鍍膜製程。本製程雖亦使用脈衝式雷射，但有別於傳統之脈衝式雷射沈積法所使用之固態石墨靶材，而以液態之環己烷(Cyclohexane) 作為前驅物 (Precursor)，可在大氣環境下進行。雷射部分採用波長 193 nm 之 ArF 準分子雷射。製作之碳膜以拉曼光譜儀分析結構，並以原子力顯微鏡(Atomic force microscope, AFM)觀察其表面形貌。

## 二、 實驗步驟

本研究實驗試片係由四吋 (1 0 0) 矽晶圓經切割成 10×10 mm 晶片，樣品分別標示為 A~C。將試片置於乙醇中經超音波震洗兩分鐘，置入去離子水中再以超音波震洗。將完成前述前處理之試片置入盛有環己烷之小燒杯中，試片(1 0 0)面朝上，環己烷液面高出試片 3 mm，燒杯上方覆蓋 UVU Quartz Glass (對於 193nm 波長光之穿透率為 87%)，以避免製程中環己烷之揮發造成液面高度之差異。

本研究之雷射微加工系統(如圖 2-1)，使用波長為 193 nm 之 ArF 準分子雷射，雷射主體由美國 GAM Laser Inc.公司製造(型號 EX50)，其相關規格見表 2-1。在微加工系統部分，雷射加工載台(如圖 2-2) X、Y 軸向之運動由電腦加工介面控制(如圖 2-3)，Z 軸之高度則為手動調整。



圖 2-1 準分子雷射微加工系統



圖 2-2 雷射加工載台

表 2-1 雷射規格

波長	193 nm
最高脈衝能量	35 mJ
最高脈衝頻率	250 Hz
平均功率	5 W
脈衝持續時間	17~20 ns
光束尺寸	9×4 mm
光束發散角	0.8×1.6 mrad



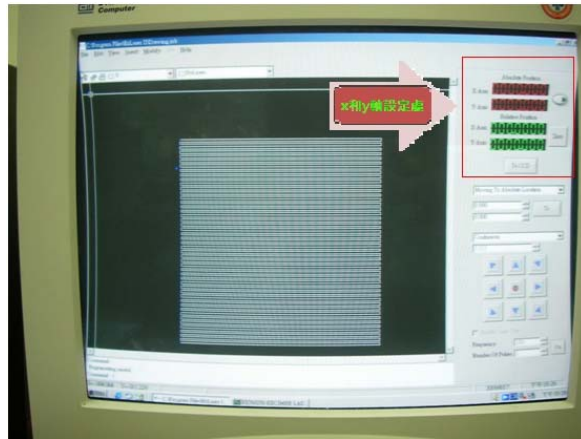


圖 2-3 加工介面

將前述裝有樣品之燒杯置於準分子雷射加工載台，雷射聚焦鏡頭距離樣品 3.7 mm，光束在試片上聚焦至  $0.2\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$  之光點。實驗採固定電壓模式，設定電壓 12KV，雷射擊發頻率設定在 100 Hz，每兩次打擊間光點有 50% 重疊，擊發雷射過程中，XY 載台以 0.1 mm/s 之移動速率進行掃描，掃描加工面積為  $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 。

完成鍍膜後即進行拉曼光譜分析及原子力顯微鏡表面形貌分析。拉曼分析部分採用美國 Enwave Optronics Inc.之 EZRaman-I 拉曼光譜分析儀(如圖 2-4)，其雷射光波長為 532 nm，測得之拉曼光譜利用 Gaussian+Lorentzian 函數進行曲線擬合(Curve fitting)。

在表面形貌分析上，使用日本 SEIKO 公司 SPA300HV 掃描探針顯微鏡之原子力顯微鏡模組(如圖 2-5)，X、Y 軸解析度皆為 0.2 nm，Z 軸解析度 0.01 nm。實驗採接觸模式(Contact Mode)，下壓力 0.17 nN，探針做二維掃描，藉由樣品與探針間的凡得瓦力(Van der Waals force)，使懸臂產生彎曲。雷射光照在懸臂表面，經過反射由高靈敏位置偵測器接收以偵測懸臂彎曲變化量，該變化量傳至電腦，經回饋控制令壓電掃描器伸縮以調整 Z 軸升降，使光偵測器之雷射光點固定於一定點，紀錄 Z 軸升降而得樣品表面形貌像。相關量測參數及環境等如表 2-2。



圖 2-4 拉曼光譜儀



圖 2-5 原子力顯微鏡

表 2-2 AFM 相關量測參數表

探針型號	SI-AF01-A
探針針尖直徑	50 $\mu\text{m}$
探針柄彎曲彈性係數	0.17 N/m
探針柄扭曲彈性係數	81.3 N/m
掃描速率	0.5Hz
掃描面積	4 $\mu\text{m}$ ×4 $\mu\text{m}$
掃描方向	10~80 度
環境溫度	26 $^{\circ}\text{C}$
環境濕度	70 %

### 三、 結果與討論

圖 3-1 (a)~(c)為準分子雷射製程製作之樣品 A~C 表面碳膜經 AFM 分析之形貌像，其表面粗糙度數據顯示於表 3-1。其平均粗糙度  $R_a = 0.2751 \text{ nm}$ ，均方根粗糙度為  $R_{RMS} = 0.4216 \text{ nm}$ 。

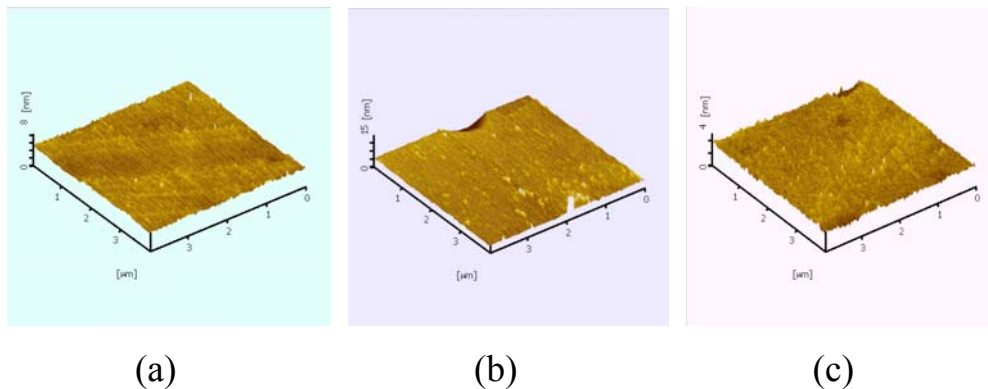


圖 3-1 準分子雷射製程之碳膜之表面 AFM 掃描形貌：(a)~(c)分別為樣品 A~C，

掃描面積  $4 \times 4 \mu\text{m}$ 。

表 3-1 準分子雷射製程製之碳膜表面粗糙度數據

Sample	Ra (nm)	R <sub>RMS</sub> (nm)
A	0.2367	0.3353
B	0.3983	0.6540
C	0.1904	0.2756
Average	0.2751	0.4216

在薄膜結構分析方面，拉曼光譜目前是獲得 DLC 薄膜詳細鍵結結構 (Bonding structures) 之最佳方法。本實驗 A, B, C 每個樣品各做三次拉曼分析，各光譜之譜峰位置數據如表 3-2。根據文獻記載，單晶(或粗晶)石墨及高方向性熱解石墨(Highly Oriented Pyrolytic Graphite, HOPG)之拉曼光譜約在  $1580 \text{ cm}^{-1}$  處會呈現單一銳利譜峰(G Band)；而細晶( $< 30 \text{ nm}$ )石墨或 Disordered graphite 則會在  $1355 \text{ cm}^{-1}$  附近出現另一譜峰(D Band)，且原 G Band 移至  $1600 \text{ cm}^{-1}$  附近 [Nemanich et al., 1988]。此二譜峰係由微晶石墨(Microcrystalline graphite)之  $A_1$  及  $E_{2g2}$  共振模式所產生 [Lespade et al., 1982]。D band 與  $sp^2$  “Graphite” carbon 有關，係由於碳六角環(Hexagonal rings)之 Breathing 現象造成；而 G band 則與  $sp^2$  “Disordered” carbon 有關，來自於  $sp^2$  碳原子之相對運動 [Ferrari and Robertson, 2000]，特別是在類碳環(Graphite-like rings)平面上之格子振動 (Lattice vibrations) [Yoshikawa, 1989]。根據拉曼光譜可監測  $sp^3$  基地內之  $sp^2$  鍵結材料之狀態 [Praver et al., 1996]。

一般無定形碳(a-C)類鑽碳膜之拉曼光譜在  $1350 \sim 1560 \text{ cm}^{-1}$  (如表 3-3)間會呈現寬廣之非對稱譜峰(Skewed peak)，其中心約在  $1500\text{-}1550 \text{ cm}^{-1}$ 。當  $sp^2$  成分降低時，拉曼光譜整體絕對強度降低，故對於完全  $sp^3$  之鍵結結構，在  $1550 \text{ cm}^{-1}$  應看不到任何譜峰 [Praver et al., 1996]。上述類鑽碳膜之寬廣非對稱譜峰經曲線擬合後可分解為兩個譜峰之疊加，分別是  $1550 \text{ cm}^{-1}$  附近的 G Band 及  $1350 \text{ cm}^{-1}$  附近的 D Band。不同製程的 DLC 之 G Band 與 D Band 譜峰位置略有差異。根據表 3-2，本製程拉曼光譜特徵亦呈現兩個譜峰，分別落在  $1520 \text{ cm}^{-1}$  及  $1756 \text{ cm}^{-1}$ ，而  $1355 \text{ cm}^{-1}$  附近未見 D band。根據 McCulloch 等人 [McCulloch et al., 1994] 對 Glassy carbon 所作的研究，D band 雖僅發生於細晶石墨，但若

晶粒尺寸小於 2.5 nm，當晶粒減小時，雖呈現更加 Disordered 狀態，D band 強度卻逐漸降低 (此趨勢與晶粒尺寸大於 2.5 nm 時相反)，當完全達到 Amorphized films 時，D band 將完全消失。可見本實驗所製碳膜為幾乎完全處於 Amorphous 狀態，故不出現 D band。至於本實驗出現之 1520  $\text{cm}^{-1}$  譜峰應屬 G Band，而 G Band 譜峰位置與  $\text{sp}^3$  所佔的比例有關[Bhushan, 2004]，G Band 譜峰若落在較低波數(較高頻率)位置，其  $\text{sp}^3$  所佔的比例較高，而本實驗製備之碳膜 G Band 波數比一般 DLC 低 30  $\text{cm}^{-1}$  左右，故含有較高比例的  $\text{sp}^3$  結構，推斷其耐磨耗性應較佳。

此外，本實驗在 1756  $\text{cm}^{-1}$  出現之譜峰來應來自  $\beta$ -SiC。由表 3-3， $\beta$ -SiC 有三個拉曼譜峰，分別在 950、1520、及 1720  $\text{cm}^{-1}$ 。碳化矽是由一個碳原子和最近之四個矽原子形成  $\text{sp}^3$  共價鍵結構〔劉智生，2003〕，其硬度範圍為 27.84~32.55 MPa，可分為  $\alpha$  及  $\beta$  相之同質異晶物。 $\alpha$ -SiC (又稱 6H-SiC) 為在高於 1700°C 之高溫下形成，具有六角晶系之結晶構造(似纖維矽礦)； $\beta$ -SiC (又稱 3C-SiC) 為立方晶系結構，與鑽石相似，在低於 1700 °C 生成。本實驗所生成之  $\beta$ -SiC 應來自環己烷經準分子雷射擊發後釋放之碳原子與矽基材作用之結果。由於 SiC 具有極佳之耐磨耗性，與碳膜構成複合材料後，對薄膜之耐磨性應有正面影響。

表 3-2 準分子製程之拉曼分析譜峰數據

樣品編號		A	B	C
第一譜峰	位置 ( $\text{cm}^{-1}$ )	1679	1500	1430
		1545	1454	1589
		1527	1483	1474
	平均值 ( $\text{cm}^{-1}$ )	1520		
第二譜峰	位置 ( $\text{cm}^{-1}$ )	1753	1834	1745
		1865	1763	1727
		1825	1560	1730
	平均值 ( $\text{cm}^{-1}$ )	1756		

表 3-3 材料性質與拉曼譜峰位置〔林立偉，1999〕

材料	譜峰位置( $\text{cm}^{-1}$ )
----	--------------------------

天然鑽石	1332~1334
合成鑽石	1290
類鑽石	1500
多晶石墨	1350, 1580
a-C	1350~1560
$\beta$ -SiC	950, 1520, 1720

#### 四、 結論

本研究使用準分子雷射及環己烷鍍製碳膜，具有可在常壓、室溫之大氣環境下進行之優點。實驗結果經原子力顯微鏡觀察表面形貌並求得平均表面 Ra 可達 0.275 nm。在薄膜結構分析方面，本製程拉曼光譜特徵呈現兩個譜峰，分別落在 1520  $\text{cm}^{-1}$  及 1756  $\text{cm}^{-1}$ ，未見 D band。G Band 波數比一般 DLC 低 30  $\text{cm}^{-1}$  左右，故含有較高比例的  $\text{sp}^3$  結構，其耐磨耗性應較佳。此外，所製備碳膜中含有 SiC 成分，因其具極佳之耐磨耗性，與碳膜構成複合材料後，對薄膜之耐磨性應有正面影響。未來可對本製程之薄膜作進一步之奈米刮痕試驗，以驗證其耐磨耗性。

#### 參考文獻

- Aisenberg, S. and Chabot, R., 1969, "Study of the deposition of single crystal silicon, silicon dioxide and silicon nitride on cold-substrate silicon," *NASA Technical Report NASA-CR-188166*, USA.
- Bhushan, B. (Ed.), 2004, *Handbook of Nanotechnology*, Springer-Verlag, Berlin.
- Ferrari, A.C. and Robertson, J., 2000, *Physical Review B*, Vol. 61, p. 14095.
- Lespade, P., Al-Jishi, R., and Dresselhaus, M.S., 1982, *Carbon*, Vol. 20, p. 427.
- McCulloch, D. G., Praver, S., and A. Hoffman, 1994, "Structural investigation of xenon-ion-beam-irradiated glassy carbon," *Physical Review B*, Vol. 50, Iss. 9, pp. 5905-5917.

- Marquardt, C.L., Williams, R.T., and Nagel, D.J., 1985, in: R.P.H. Chang, B. Abeles (Eds.), *Plasma Synthesis and Etching of Electronic Materials*, Boston, U.S.A., December 2-4, 1985, Materials Research Society Symposium Proceeding, Vol. 38, p. 325.
- Nemanich, R. J., Glass, J. T., Lucovsky, G., and Shroder, R. E., 1988, "Raman scattering characterization of carbon bonding in diamond and diamondlike thin films," *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, Vol. 6, Iss. 3, pp.1783 – 1787.
- Voevodin, A.A. and Donley, M.S., 1996, *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 82, p. 199.
- Prawer, S. , Nugent, K.W., Lifshitz, Y., Lempert, G.D., Grossman, E., Kulik, J., Avigal, I., Kalish, R., 1996, "Systematic variation of the Raman spectra of DLC films as a function of  $sp^2$ :  $sp^3$  composition," *Diamond and Related Materials*, Vol. 5, pp. 433-438.
- Yoshikawa, M., 1989, "Raman Spectra of Diamondlike Amorphous Carbon Films," *Journal Materials Science Forum*, Vol. 52-53, 365-386.
- 李紹民，2002，“奈米碳化矽/氮化矽複合陶瓷之製備、微結構及機械性質之研究”，碩士論文/材料科學及工程學系碩博士班/國立成功大學，第 5 頁。
- 宋長泰，2004，“以聚碳矽烷高溫分解形成之碳化矽薄膜及其應用於鑽石成長緩衝層之研究”，碩士論文/材料工程學系(所)/ 大同大學，第 9、14 頁。
- 周上智，2001，“奈米尖錐類鑽碳膜之成長與特性分析”，碩士論文/機電整合研究所/國立台北科技大學，第 9-10、37、41、51 頁。
- 林立偉，1999，“以工業用鑽石超微粉為靶材沉積非晶質鑽石膜”，碩士論文/機電整合研究所/國立台北科技大學。
- 周淑婷，2003，“氮氧化矽絕緣層其光致發光及拉曼光譜與 MOS 結構電容-電壓量測之研究”，碩士論文/物理學系研究所/國立中山大學，第 9-10 頁。
- 高君陶著，“單層奈米碳管之共振及低溫拉曼散射光譜研究”。<http://sa.ylib.com/saeasylearn/saeasylearnshow.asp?FDocNo=1436&CL=72>。
- 陳炳州，2002，“以拉曼光譜研究由磁控濺鍍合併電子迴旋共振系統所成長的類鑽石薄膜”，碩士論文/物理學系碩博士班/國立成功大學，第 12 頁。
- 許嘉瑋，2004，“準分子雷射拋光化學氣相沉積鑽石膜之研究”，碩士論文/機械與機電工程學系/淡江大學，第 35-36 頁。
- 莊明仁，2002，“雷射拉曼光譜對鎂氧化物之硫化反應之研究”，碩士論文/應用化學研究所/中國文化大學，第 35-36 頁。
- 梁嘉顯，2004，“193nm 準分子雷射加工電磁式微光學振鏡”，碩士論文/機電光工程研究所碩博士班/中華技術學院，第 26 頁。
- 黃昱瑋，2002，“類鑽碳膜保護塗層在生醫材料”，碩士論文/材料工程學研究所/國立中興大學，第 75-76 頁。

黃威智，2005，“準分子雷射微自由曲面加工之研究”，碩士論文/機械工程所/國立中正大學，第 9-10、19-21 頁。

劉智生，2003，“以矽甲烷/乙炔/氫氣的化學氣相沉積系統於矽(100)基材上成長碳化矽之研究”，碩士論文/化學工程系/國立台灣科技大學，第 40 頁。

戴學斌，2003，“利用拉曼散射技術研究鐵電材料之相變化、參雜效應與薄膜之結晶化”，碩士論文/物理學系碩博士班/國立成功大學，第 29-31 頁。