

# The Effect of Plate Spacing on the DLC Films' Raman Spectroscopy

Ying Ren<sup>1\*</sup>, Mingchao Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Materials Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou Henan

<sup>2</sup>School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning

Email: \*ying\_ren@haut.edu.cn, wmc163yx@163.com

Received: May 11<sup>th</sup>, 2017; accepted: May 24<sup>th</sup>, 2017; published: May 27<sup>th</sup>, 2017

## Abstract

Using radio frequency plasma enhanced chemical vapor deposition (RF-PECVD), CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub> as gas sources, diamond-like carbon (DLC) films were prepared on the substrate of Si(100) by varying the plate spacing using radio frequency plasma enhanced chemical vapor deposition (RF-PECVD). Raman spectroscopy was used to characterize the microstructure of these films. The results show that the deposited films are typical DLC films with sp<sup>3</sup> and sp<sup>2</sup> bonds and the crystal structure of diamond in films were Hexagonal or rhombohedral. G peak position and I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> ratio were found to be increased, which indicated that the strain between film and substrate was changed and the ring structure content was increased with the increase of plate spacing. The content of sp<sup>3</sup> bond was decreasing in the range of 0% - 20% with increasing the plate spacing between 8 - 17 cm.

## Keywords

Radio Frequency Plasma, Diamond-Like Carbon Films, Raman Spectroscopy, Plate Spacing

## 极板间距对DLC薄膜拉曼光谱的影响

任 瑛<sup>1\*</sup>, 王明超<sup>2</sup>

<sup>1</sup>河南工业大学材料科学与工程学院, 河南 郑州

<sup>2</sup>大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁 大连

Email: \*ying\_ren@haut.edu.cn, wmc163yx@163.com

收稿日期: 2017年5月11日; 录用日期: 2017年5月24日; 发布日期: 2017年5月27日

## 摘 要

采用射频等离子增强化学气相沉积法(RF-PECVD), 使用CH<sub>4</sub>和H<sub>2</sub>作为气源, 通过改变极板间距, 在Si(100)

\*通讯作者。

衬底上制备类金刚石(DLC)膜。采用拉曼光谱表征DLC薄膜的微观结构,结果表明,制备的薄膜中含有 $sp^3$ 、 $sp^2$ 杂化碳键,具有典型的类金刚石结构特征,且以六方或菱方结构存在。通过分峰及计算表明:G峰位置和 $I_D/I_G$ 值不断上升的趋势说明薄膜和衬底之间的应力逐渐改变,薄膜中六角碳环结构的含量随着极板间距的上升而不断增加;随着极板间距在8~17 cm范围内的增大, $sp^3$ 键的含量在0%~20%范围内先减少后增加。

## 关键词

射频等离子体, 类金刚石薄膜, 拉曼光谱, 极板间距

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

类金刚石膜(diamond-like carbon, DLC)性能优越,被广泛应用在真空微电子学、摩擦学、光学、医学材料等领域,而且它比金刚石的制备过程简单、快捷和成本低、易于工业化推广[1] [2] [3] [4]。射频等离子增强化学气相沉积法(RF-PECVD)是制备类金刚石膜的主要方法之一[5]。然而目前对于类金刚石膜的成膜机理以及沉积时各个参数对薄膜性能的影响仍没有统一的认识[6] [7]。在射频功率对类金刚石膜的影响方面,WS Choi [8]等人研究了射频功率对薄膜的摩擦性能的影响。R Awang 和 SA Rahman 研究了射频功率和氢含量之间的关系[9]。QI Hai-Cheng 等人研究了射频功率对 $sp^3$ 键含量的影响[10]。YK Yun 等人研究了射频功率对薄膜的热扩散系数的作用[11]。崔万国、陈林林和 Jiang [12] [13] [14]等人则研究了射频功率对薄膜光学性质的影响。在沉积气压对类金刚石膜的影响方面,近几年的研究表明:随着沉积气压从7 Pa 增加到15 Pa,薄膜的 $sp^3$ 含量和机械性能明显增加,而摩擦学性能显著降低[15];随着沉积气压从15 Pa 增加到31 Pa,薄膜的 $sp^3$ 含量和机械性能明显降低,而摩擦学性能却显著增加[16]。同时,于玥等研究者对反应气源浓度的影响也进行了研究[17]。综上所述,大多数研究者将焦点主要集中在射频功率和沉积气压等工艺参数上面,而对极板间距的研究较少。曾有报道称极板间距可能会影响薄膜的沉积速率,高的沉积速率可以使薄膜空穴增加,从而导致致密度降低,降低其折射率[18]。因此研究极板间距对薄膜的影响有其重要的意义。DLC 薄膜 $sp^3$ 含量测量的方法有多种,其中拉曼光谱测量由于具有测试简易,花费时间短,对样品无损伤等优点而成为分析 DLC 膜物理结构最主要的手段[19]。课题将使用拉曼光谱检测射频等离子体增强化学气相沉积(RF-PECVD)技术制备的 DLC 薄膜实验样品,并通过对不同极板间距所得样品的拉曼图谱的分析,探究极板间距对制备类金刚石膜的影响。

## 2. 实验设备与方法

### 2.1. 试样制备

采用的实验设备是中国科学院沈阳仪器研究股份有限公司生产的“热丝 + 射频 PECVD 及硬碳膜联合镀膜装置”。试验将采用射频等离子体增强化学气相沉积法(RF-PECVD)在 Si(100)衬底上制备类金刚石膜,其原理是通过低气压气体放电,使碳源分解形成各种含碳中性或离子基团和原子(离子)氢,并在基片负偏压的作用下使含碳基团轰击、吸附在基底表面,在基底表面成核、迁移,形成由 $sp^3$ ,  $sp^2$ 杂化碳混杂结构与氢组成的氢化碳膜[20] [21]。

实验原料包括: 单晶硅片(110), 研磨膏, 超声波清洗仪, 气体源为纯度 99.999% 的  $H_2$ , 纯度 99.999% Ar 和纯度 99.9%  $CH_4$ , 纯度 99.9% 的氮气。

## 2.2. 实验方法

将经过预处理的单晶硅基体, 放入洁净的反应腔体中, 关闭腔体。将腔体压强抽至  $5 \times 10^{-3}$  Pa 以下后, 通入流量为 30 sccm 的氩气, 调节腔体压强稳定至 20 Pa 然后开启射频电源, 射频功率调至 200 W 对 Si 基体进行 15 min 的轰击清洗; 清洗后, 通入氢气和甲烷, 调节合适的气压和功率, 改变极板间距(8, 11, 14 和 17 cm)沉积 DLC 薄膜, 具体的沉积工艺参数如表 1 所示。

## 2.3. 测试与分析方法

实验采用 Renishaw in Via Raman microscope (Renishaw, UK)光谱仪测试沉积薄膜的 Raman 光谱, 使用波长为 514.5 nm 可见光, 扫描范围为  $800\sim 2000\text{ cm}^{-1}$ 。所有碳薄膜的拉曼光谱在  $800\sim 2000\text{ cm}^{-1}$  范围内显示了共同的特征谱线: 对于可见光激发, 分别是  $1560\text{ cm}^{-1}$  和  $1360\text{ cm}^{-1}$  附近的 G 峰和 D 峰。G 峰是由碳环或长链中的所有  $sp^2$  原子对的拉伸运动产生的。D 峰是由碳环中  $sp^2$  原子呼吸振动模式产生的, 因此, 没有六角碳环就没有 D 峰[22]。实验沉积的含氢 DLC 碳膜的光谱通过高斯拟合来确定 D 峰和 G 峰。

在 DLC 薄膜的研究工作中,  $sp^3$  含量的测量或者定性判断是一项最基本的表征工作[23]。所有碳膜拉曼光谱可按无序度增加的三阶段模型来描述。 $sp^2$  官能团首先变小, 然后拓扑无序, 最后从环状变成长链结构, 这个过程也称之为非晶化过程[24], 如图 1 所示。根据图 1, 可以由薄膜拉曼光谱得到的 G 峰位置和  $I_D/I_G$  值来大概确定薄膜中的  $sp^3$  键含量。阶段 1 的平均 G 峰位置从  $1581\text{ cm}^{-1}$  大致变到  $1600\text{ cm}^{-1}$ 。阶段 2 为在石墨片层中引入拓扑无序。成键仍然主要是  $sp^2$ , 但弱键软化振动模式, 因此 G 峰下降到  $1510\text{ cm}^{-1}$ 。阶段 3 是  $sp^2$  位置转变成  $sp^3$  位置,  $sp^2$  配置从环连续变成链。由于  $\pi$  电子在短碳链中的限制效应, G 峰位置移动到  $1570\text{ cm}^{-1}$  附近。由于不存在六角碳环,  $I_D/I_G = 0$ 。

## 3. 实验结果与分析

### 3.1. 实验结果

如图 2 所示是四次实验的拉曼光谱的对比图, 通过直接观察光谱, 可以得出以下信息:

1) 拉曼曲线在  $1350\text{ cm}^{-1}$  附近有明显的拉曼峰, 由此可知所制备的薄膜属于类金刚石薄膜[25]。由图可知,  $1350\text{ cm}^{-1}$  附近有 c 和 d 两处峰: 在  $1344.3\text{ cm}^{-1}$  和  $1385.7\text{ cm}^{-1}$  出现的两个峰都可以认为是 D 峰, 之所以产生两个峰, 通常认为是双光子作用的过程(即在强激光的作用下, 某种物质的一个分子吸收了两个光子) [26]; 而在  $1580\text{ cm}^{-1}$  附近出现 e 处  $1573.9\text{ cm}^{-1}$  这个峰很明显为 G 峰[27]。

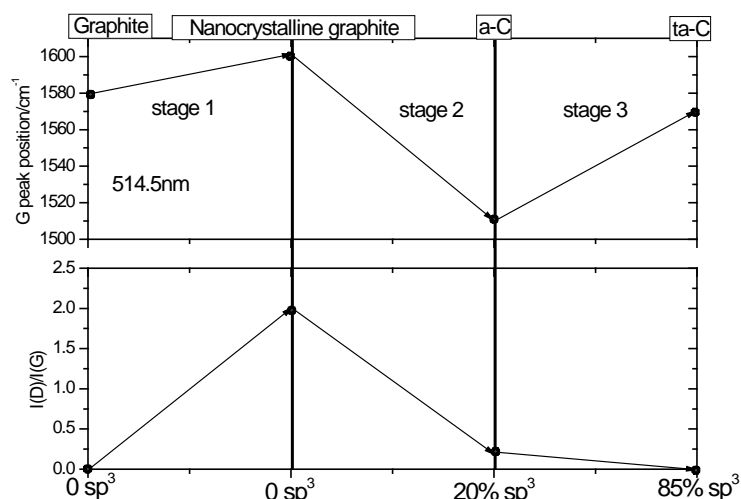
2) 曲线在 a: $950\text{ cm}^{-1}$ 、b: $1265\text{ cm}^{-1}$ 、d: $1385\text{ cm}^{-1}$  和 f: $1646\text{ cm}^{-1}$  等位置附近位置均出现细小的峰;

3) 而在极板间距为 17 cm 时的拉曼光谱峰强度最高, 极板间距为 14 cm 时次之, 11 cm 时继续降低, 8 cm 时最低。在保证拉曼仪激光光源功率相同的前提下, 峰强越高, 只意味着与峰相对应的薄膜的物质含量越高, 并不能得出薄膜越厚的结论, 此处最明显的是与  $sp^2$  键对应的在  $1350\text{ cm}^{-1}$  附近的 D 峰和  $1580\text{ cm}^{-1}$  附近的 G 峰, 这初步说明随着极板间距的增加, 薄膜中  $sp^2$  键的相对含量逐渐增加。

Table 1. The parameters during the deposition process of DLC films

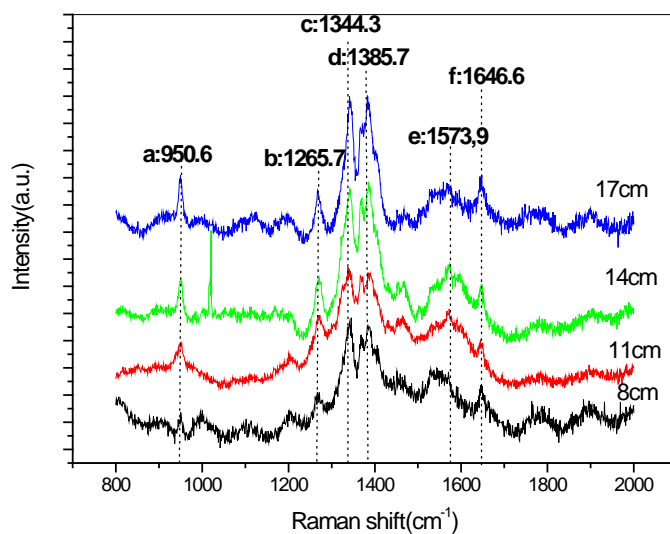
表 1. DLC 薄膜沉积工艺参数

本底真空度	射频功率	沉积气压	氩气流量	沉积时间	衬底温度	甲烷流量	氢气流量
$5 \times 10^{-3}$ Pa	250 W	40 Pa	30 sccm	90 min	250℃	45 sccm	15 sccm



**Figure 1.** The Raman spectra model of the degree of disorder variation in three stage

**图 1.** 碳膜拉曼光谱无序度变化的三阶段模型图



**Figure 2.** The Raman spectra in different plate spacing

**图 2.** 不同极板间距下的拉曼光谱图

根据文献资料[28] [29]分析图 2 可知:

a 处: 曲线在  $950\text{ cm}^{-1}$  附近有峰, 这是硅衬底的二阶信号, 这一谱峰被经常用来判断薄膜的透明程度, 此峰越高, 透光性越强[28]。根据薄膜的颜色可以得出: 随着极板间距增大, 薄膜厚度减小, 这可能是由于极板间距越大, 等离子体密度越低, 导致用来生长金刚石的活性基团就越来越少, 并且  $\text{sp}^2$  键的比  $\text{sp}^3$  键稳定, 薄膜上更容易沉积  $\text{sp}^2$  键的碳。结合两者结论得出: 随着极板间距的增大, 薄膜厚度减小, 透光性越好[29]。

b 处: 曲线在  $1265\text{ cm}^{-1}$  附近出现小突起状的峰, 这个峰与六方金刚石的 8H 晶型和菱方结构的 15R 晶型有关[30]。拉曼峰的微小位移可能是由于薄膜中应力和缺陷的存在而产生的, 因此对于处在  $1265\text{ cm}^{-1}$  处的拉曼峰最有可能代表此处有 15R 晶型的菱方金刚石, 或者由于金刚石薄膜中的应力较大、缺陷含量较多, 导致拉曼峰产生较大位移, 因此它也可能代表 8H 晶型的六方金刚石。

f 处:  $1646\text{ cm}^{-1}$  附近出现峰可以称为 D' 峰, D' 峰是 G 峰的一个弱肩峰常出现在  $1624\text{ cm}^{-1}$  附近, 其代表了石墨晶须。在图中因 G 峰出现一定的偏移, 因此其表征石墨晶须的 D' 也随之向右移动出现在  $1640\text{ cm}^{-1}$  左右[31]。峰的偏移表明薄膜内存在残余的压应力; 而这种压应力, 可能是由于膜与基底具有不同膨胀系数而产生的。

### 3.2. 数据分析

将四组不同极板间距下的拉曼光谱过高斯拟合来确定 D 峰和 G 峰。拟合结果如图 3。从图 3 拟合结果可以得到在不同极板间距情况下得到 G 峰和 D 峰的各种信息, 包括半高宽、峰面积、峰强度、峰的高度和峰位置等, 整理成如下表 2 所示。

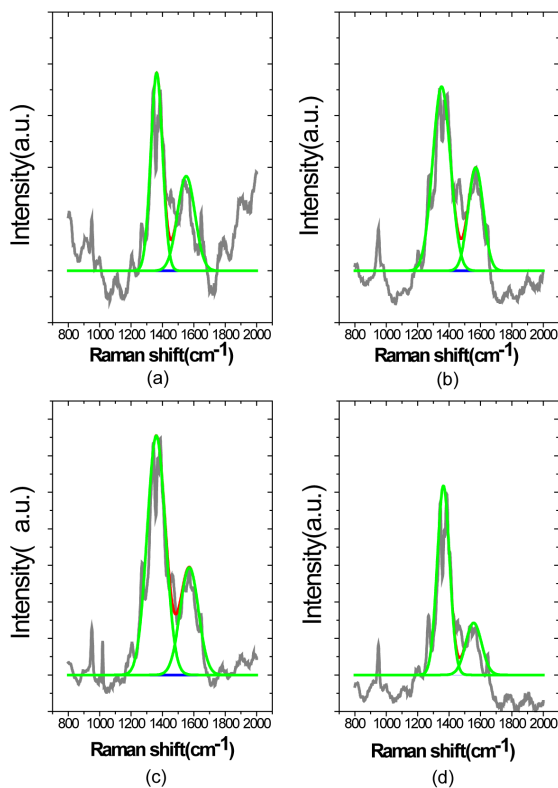
图 4 是根据表 2 绘制的  $I_D/I_G$  值和 G 峰位置随极板间距变化的趋势图。由表 2 的 G 峰位置及图 4 可知: 四个极板间距下的 G 峰位置都低于  $1580\text{ cm}^{-1}$ , 且随着极板间距的增大, G 峰位置呈先上升后下降趋势, 据此可以得到  $sp^3$  含量在 8~13 cm 范围内下降, 在 13~17 cm 范围内升高。 $I_D/I_G$  呈上升趋势, 据此可以得到  $sp^3$  含量在 8~17 cm 范围内随极板间距的升高而降低, 这与 G 峰位置得到的  $sp^3$  含量变化略有不同, 这是因为通过  $sp^2/sp^3$  的比例得出  $sp^2$  含量会有一些的滞后性, 由于  $sp^3$  含量是通过  $sp^2$  含量确定的, 所以也会发生滞后性[32]。首先根据 G 峰位置都低于  $1580\text{ cm}^{-1}$ , 这排除了薄膜处于阶段 1 的可能; 根据  $I_D/I_G$  值的趋势可以判断薄膜不可能处于阶段 3, 因为阶段 3 的  $I_D/I_G$  值由于六角碳环的瓦解而趋近于零; 因此, 极板间距在 8~17 cm 范围内变化时,  $sp^3$  含量变化范围在 0%~20% 之间, 也就是处于阶段 2。由表 2 可知,  $FWHM_G$  值随着极板间距增加, 先减少再增加后又减少。由于 G 峰的半峰宽与  $sp^3$  含量同样具有正相关关系[33], 因此  $sp^3$  含量先增加再减少最后又降低, 但是这与前边通过 G 峰位置及  $I_D/I_G$  值推出来的  $sp^3$  含量的变化趋势不同, 这可能是由于试验样本有限, 导致得出的趋势图无法有效认定  $sp^3$  含量随  $FWHM_G$  的变化规律。因此对于含氢 DLC 薄膜来说, 对  $FWHM_G$  的分析无法得出有效结论。综上可以得出: 随着极板间距在 8~17 cm 范围内增加,  $sp^3$  键的含量先减少后增加, 也就是说极板间距在一定范围内的增加不利于  $sp^3$  键的生长, 原因可能是极板间距增加, 等离子体密度降低, 石墨的生长速率大于金刚石, 正因为等离子体密度的降低, C-H 键数量增多, 又导致  $sp^3$  键含量的缓慢升高。由图 4 可知, G 峰位置的在  $1551$  到  $1570\text{ cm}^{-1}$  的逐渐增长说明在 DLC 薄膜和 Si 衬底之间应力逐渐改变; 从  $I_D/I_G$  比值不断上升的趋势中, 可以得到薄膜中六角碳环结构的含量随着极板间距的上升(8 cm, 11 cm, 14 cm, 17 cm)而不断增加(1.41, 2.10, 2.22, 2.85)。

**Table 2.** The data of G peak and D peak in different plate spacing

**表 2.** 不同极板间距下 G 峰和 D 峰的信息表

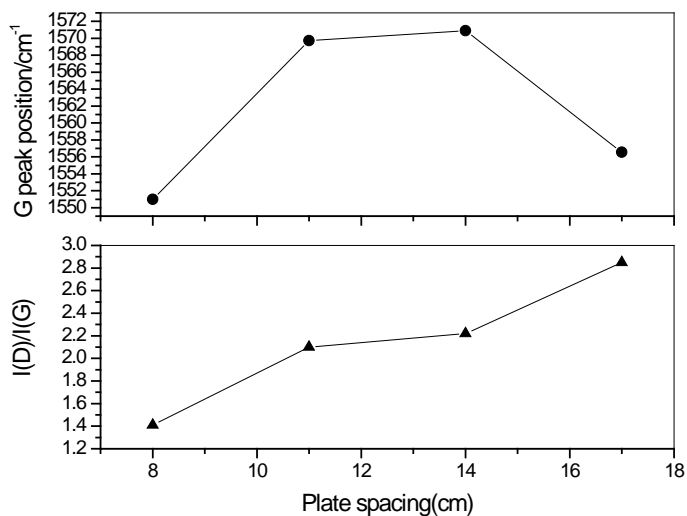
Plate Spacing	Peak	FWHM	Center Grvty	$I_D/I_G$
8 cm	D Peak	88.54	1363.05	1.41
	G Peak	131.00	1551.00	
11 cm	D Peak	133.05	1352.19	2.10
	G Peak	113.10	1569.72	
14 cm	D Peak	137.08	1360.86	2.22
	G Peak	137.08	1570.90	
17 cm	D Peak	93.20	1364.11	2.85
	G Peak	119.08	1556.56	

备注: Center Grvty (Peak gravity center)峰加权平均中心处的 X 值。



**Figure 3.** The Raman spectra fitting in different plate spacing (a): 8 cm; (b): 11 cm; (c): 14 cm; (d): 17 cm

**图 3.** 不同极板间距的拉曼光谱拟合图(a): 8 cm; (b): 11 cm; (c): 14 cm; (d): 17 cm



**Figure 4.** The ratio trend of  $I_D/I_G$  and G peak position in different plate spacing

**图 4.** 不同极板间距下的  $I_D/I_G$  比值和 G 峰位置趋势图

#### 4. 结论

通过对不同极板间距下的 DLC 薄膜的可见光拉曼光谱进行高斯拟合, 对它们的  $I_D/I_G$  值和 G 峰位置



进行分析, 得到如下结论: ① 在极板间距 8~17 cm 的实验参数下, 制备的薄膜中含少量以六方或菱方结构存在的金刚石; ② 薄膜和衬底之间的存在残余压应力且逐渐改变; ③ 薄膜中六角碳环结构的含量随着极板间距的上升而不断增加; ④ 随着极板间距在 8~17 cm 范围内增加,  $sp^3$  键的含量先减少后增加, 也就是说极板间距在一定范围内的增加不利于  $sp^3$  键的生长。

## 5. 展望

不同应用领域对薄膜的性能要求不同, 因此接下来可以探究不同极板间距或者极板间距和其它工艺参数共同影响下制备出的类金刚石薄膜的性能特点及其适用领域, 以推广其应用。

## 基金项目

河南省教育厅自然科学项目科学技术重点研究项目(15A430004); 省属高校基本科研业务费专项资金项目青年支持计划(2015QNJH15); 河南工业大学校高层次人才基金项目(2014BS016)。

## 参考文献 (References)

- [1] Ohgoe, Y., Hirakuri, K.K., Saitoh, H., *et al.* (2012) Classification of DLC Films in Terms of Biological Response. *Surface & Coatings Technology*, **207**, 350-354.
- [2] Vengudusamy, B., Mufti, R.A., Lamb, G.D., *et al.* (2011) Friction Properties of DLC/DLC Contacts in Base Oil. *Tribology International*, **44**, 922-932.
- [3] Dai, W., Ke, P., Moon, M.W., *et al.* (2012) Investigation of the Microstructure, Mechanical Properties and Tribological Behaviors of Ti-Containing Diamond-Like Carbon Films Fabricated by a Hybrid Ion Beam Method. *Thin Solid Films*, **520**, 6057-6063.
- [4] Martinez-Martinez, D., Schenkel, M., Pei, Y.T., *et al.* (2011) Microstructure and Chemical Bonding of DLC Films Deposited on ACM Rubber by PACVD. *Surface & Coatings Technology*, **205**, S75-S78.
- [5] 杨莉, 付亚波, 陈强. 射频等离子体增强化学气相沉积类金刚石薄膜的结构及摩擦学性能研究[J]. 包装工程, 2008, 29(10): 90-92.
- [6] 王鸿翔, 左敦稳, 卢文壮, 徐峰. 工艺条件对金刚石膜红外透射率影响的研究[J]. 材料科学与工艺, 2010, 18(3): 322-325.
- [7] 王兵, 熊鹰, 黎明, 等. 不同反应气源对制备纳米金刚石膜的影响[J]. 材料科学与工艺, 2010, 18(1): 96-100.
- [8] Choi, W.S., Heo, J., Chung, I., *et al.* (2005) The Effect of RF Power on Tribological Properties of the Diamond-Like Carbon Films. *Thin Solid Films*, **475**, 287-290.
- [9] Awang, R. and Rahman, S.A. (2007) Influence of Power and Film Thickness on the Properties of RF PECVD Hydrogenated Amorphous Carbon Films. *International Journal of Cardiology*, **66**, 195-197.
- [10] Qi, H.-C., Feng, K.C. and Yang, S.Z. (2009) Effect of RF Power on Properties of the Diamond-Like Carbon Film Prepared by RF-PECVD Method. *Surface Technology*, **38**, 41-42.
- [11] Yun, Y.K., Alwi, H.A., Awang, R., *et al.* (2011) Influence of Radio Frequency Power on Thermal Diffusivity of Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition-Grown Hydrogenated Amorphous Carbon Thin-Films. *Journal of Applied Physics*, **109**, Article ID: 113503. <https://doi.org/10.1063/1.3592291>
- [12] 崔万国, 张玲. 射频功率对 PECVD 制备类金刚石薄膜光学性能的影响[J]. 光谱实验室, 2010, 27(3): 937-938.
- [13] 陈林林, 张殷华, 黄伟. 射频功率对类金刚石薄膜性能的影响[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(6): 1375-1378.
- [14] Jiang, A., Shao, H., Yang, D., *et al.* (2014) Effect of RF Power on Field Emission Characteristics of Fluorinated Diamond-Like-Carbon Films. *Chinese Journal of Vacuum Science & Technology*, **34**, 538-542.
- [15] 苏永要, 赵黎宁, 王锦标, 等. 气体压强对 DLC 薄膜微观结构及性能的影响[J]. 中国表面工程, 2013, 26(5): 31-36.
- [16] Nelson, N., Rakowski, R.T., Franks, J., *et al.* (2014) The Effect of Substrate Geometry and Surface Orientation on the Film Structure of DLC Deposited Using PECVD. *Surface & Coatings Technology*, **254**, 73-78.
- [17] 于玥. 用 PECVD 制备类金刚石膜的研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- [18] 陈林林. 类金刚石薄膜制备工艺与特性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2013.

- [19] Habibi, A., Khoie, S.M.M., Mahboubi, F., *et al.* (2016) Raman Spectroscopy of Thin DLC Film Deposited by Plasma Electrolysis Process. *Surface & Coatings Technology*, **309**, 945-950.
- [20] Varade, A., Krishna, A., Reddy, K.N., *et al.* (2014) Diamond-Like Carbon Coating Made by RF Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition for Protective Antireflective Coatings on Germanium. *Procedia Materials Science*, **5**, 1015-1019.
- [21] Varade, A., Reddy, K.N., Sasen, D., *et al.* (2014) Detailed Raman Study of DLC Coating on Si(100) Made by RF-PECVD. *Procedia Engineering*, **97**, 1452-1456.
- [22] 沈艾霖. 濺鍍製造的非晶質碳之 532 nm 可見光拉曼光譜數據分析方法探討與類鑽碳相關研究[D]: [博士学位论文]. 成功大學化學工程學系, 2011.
- [23] Miki, Y., Nishimoto, A., Sone, T., *et al.* (2015) Residual Stress Measurement in DLC Films Deposited by PBIID Method Using Raman Microprobe Spectroscopy. *Surface & Coatings Technology*, **283**, 274-280.
- [24] 王一大. 含氫非晶質碳薄膜的拉曼光譜特性研究[D]: [博士学位论文]. 國立中央大學, 2010.
- [25] Śmietana, M., Koba, M., Mikulic, P., *et al.* (2015) Improved Diamond-Like Carbon Coating Deposition Uniformity on Cylindrical Sample by Its Suspension in RF PECVD Chamber. *Physica Status Solidi (A)*, **212**, 2496-2500.
- [26] Chu, P.K. and Li, L. (2006) Characterization of Amorphous and Nanocrystalline Carbon Films. *Materials Chemistry & Physics*, **96**, 253-277.
- [27] Catena, A., Kunze, M.R., Agnello, S., *et al.* (2016) Amorphous Hydrogenated Carbon (a-C:H) Depositions on Polyoxymethylene: Substrate Influence on the Characteristics of the Developing Coatings. *Surface & Coatings Technology*, **307**, 658-665.
- [28] Friedmann, T.A., Sullivan, J.P., Knapp, J.A., *et al.* (1997) Thick Stress-Free Amorphous-Tetrahedral Carbon Films with Hardness near That of Diamond. *Applied Physics Letters*, **71**, 3820-3822. <https://doi.org/10.1063/1.120515>
- [29] 赖起邦. 类金刚石薄膜的制备和光学性质研究[D]: [博士学位论文]. 厦門: 厦門大學, 2008.
- [30] Kapil, R., Mehta, B.R., Vankar, V.D., *et al.* (1998) Growth of Diamond Thin Films in a Cyclic Growth-Etch Oxy-Acetylene Flame Process. *Thin Solid Films*, **322**, 74-84.
- [31] 譚平恒. 碳材料的拉曼光譜[M]. 北京: 化學工業出版社, 2007.
- [32] Ferrari, A.C. and Robertson, J. (2000) Interpretation of Raman Spectra of Disordered and Amorphous Carbon. *Physical Review B: Condensed Matter*, **61**, 14095-14107. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.14095>
- [33] Ferrari, A.C., Rodil, S.E. and Robertson, J. (2003) Interpretation of Infrared and Raman Spectra of Amorphous Carbon Nitrides. *Physical Review B*, **67**, 1553061-15530620. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.67.155306>

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ms@hanspub.org](mailto:ms@hanspub.org)