

氧气氛环境对无氢类金刚石膜红外性能的影响

陆益敏¹, 黄国俊¹, 王赛¹, 米朝伟¹, 蔡晓红², 田方涛¹, 程勇^{1*}

¹陆军工程大学光电技术研究所, 湖北 武汉 430075;

²陆军工程大学装备底盘系, 湖北 武汉 430075

摘要 采用飞秒激光制备了无氢氧掺杂类金刚石膜,研究了环境气压对膜层红外性能的影响,并从掺杂含量、原子键、晶态结构等微观特性方面分析了膜层在含氧条件下的演变。研究发现:氧气氛环境可以提高无氢类金刚石膜中金刚石相的含量,有效降低类金刚石膜的红外吸收,从而增强其红外透射性能;膜层折射率可以由气氛环境自由调控,为多层光学膜的设计提供了匹配手段;氧气氛环境未改变类金刚石膜的非晶结构,不会妨害其红外性能。提出了碳膜在含氧条件下的原子键重组模型,丰富了氧掺杂类金刚石膜的研究,为提升类金刚石膜对红外窗口的增透保护提供了理论分析和实践依据。

关键词 薄膜; 脉冲激光沉积; 无氢类金刚石膜; 氧气氛环境; 红外性能; 原子键

中图分类号 TN304.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0403005

Effect of Oxygen Atmosphere on Infrared Properties of Non-Hydrogenated Diamond-Like Carbon Films

Lu Yimin¹, Huang Guojun¹, Wang Sai¹, Mi Chaowei¹, Cai Xiaohong²,
Tian Fangtao¹, Cheng Yong^{1*}

¹Opto-Electronics Institute of Army Engineering University, Wuhan, Hubei 430075, China;

²Equipment Chassis Department of Army Engineering University, Wuhan, Hubei 430075, China

Abstract In this study, non-hydrogenated oxygen-doped diamond-like carbon (DLC) films were grown by femtosecond laser, and the influence of oxygen atmosphere on the infrared (IR) properties of the films was investigated. The evolution of the properties of oxygen-doped DLC films at the microscale was determined by investigating their doping content, atomic bonding, and crystal structure. The results show that the oxygen atmosphere increases the diamond-phase content and reduces the absorption of the DLC films, thus increasing their IR transmittance. The refractive index of the films can be freely controlled by the oxygen atmosphere, which provide a suitable method for the design of multilayer optical films. The oxygen in the environment does not change the amorphous structure of the DLC films and does not hinder their IR transmittance. A model is proposed for the rearrangement of the atomic bonds in the carbon films in the oxygen atmosphere, which is of benefit to the research on oxygen-doped DLC films and provides theoretical analysis and a practical basis for improving the anti-reflective protection of IR windows by DLC films.

Key words thin films; pulse laser deposition; non-hydrogenated diamond-like carbon film; oxygen atmosphere; infrared property; atomic bond

OCIS codes 310.6860; 300.6340

1 引 言

类金刚石(DLC)膜是一种富含金刚石相(sp³键)的非晶碳,具有诸多良好的性能,已在光学、力

学、摩擦学等领域得到了广泛关注^[1]。气氛环境可以对 DLC 膜的性能起到良好的调制作用,使其显现出不同的特性^[2]。作为气体反应源,含氢气体(如 CH₄、C₂H₂)是采用化学气相沉积(CVD)工艺制备

收稿日期: 2019-10-12; 修回日期: 2019-11-05; 录用日期: 2019-11-15

基金项目: 军内科研项目(012016017000B12503)

* E-mail: gdyjs@263.net

DLC膜的基本需求^[3-4];在物理气相沉积(PVD)过程中,经常采用氢气(H₂)或含氢气体(如C₂H₂等)来提高DLC膜的光学性能和力学性能^[5-7];氮气(N₂)氛围是使用最多的一种气氛环境,可以提高类金刚石膜的导电性、摩擦性和生物相容性等性能^[8-10];氩气(Ar)是一种惰性气体,可以改善DLC膜的微结构、微表面、电子或光电子特性^[11-13]。所查资料显示,在氧气氛环境中制备氧掺杂含氢DLC膜的研究已有一些报道^[14-16],但氧气氛环境对无氢DLC膜影响的研究较少,目前只有使用248 nm纳秒激光制备无氢DLC膜的报道^[17]。

作为活性气体之一的氧气,在沉积过程中会与碳粒子发生反应,并在基底上形成氧掺杂DLC膜(O-DLC),从而影响DLC膜的某些特性。本课题组前期做过一些氧气氛环境对无氢DLC膜影响的相关工作^[18-19],但还未深入研究该膜的微观结构以及氧气氛环境的影响机理。本文采用飞秒激光制备了无氢O-DLC膜,研究了环境气压对该膜红外性能的影响,分析了该膜的掺杂含量、原子键组分、晶态结构等微观特性在含氧条件下的演变。本实验为脉冲激光沉积无氢O-DLC膜的研究提供了实验基础,有利于促进无氢DLC膜在红外窗口增透保护需求方面的应用。

2 实验方法

基底采用的是直径为25 mm的本征硅,该材料在中红外波段(3~5 μm)具有良好的光学性能,吸收几乎为零,是常用的中红外窗口材料。靶材选用纯度为4N的高定向热解石墨(HOPG),它与基底平面平行,两者距离70 mm。实验中使用的激光器是武汉安扬激光技术有限责任公司的FemtoYL-100光纤飞秒激光器,其波长与脉宽分别为1030 nm和400 fs。在最大脉冲能量为190 μJ、重复频率为25 kHz的条件下测得光束的聚焦直径约为160 μm,计算得到的脉冲能量密度约为0.24 J/cm²。激光烧蚀靶材形成的等离子体轴线偏离基底自转轴8 mm,以便在基底直径范围内获得较均匀的膜层^[20],从而保证红外光谱测试的可靠性。

在本底真空(5×10⁻⁴ Pa)和不同氧气压(0.05, 0.5, 2, 5, 10 Pa)下,分别制备纯DLC(P-DLC)膜和氧掺杂DLC(O-DLC)膜。其中,氧气压为10 Pa条件下的沉积速率过慢,因此该条件下制备的样品不作为有效样品进行比较。为使各试样的红外透射光谱具有良好的可比性,各样品所镀膜层的光学厚度

均控制在1250 nm左右,以保证其红外透射光谱的峰值均位于5 μm附近。

3 测试结果与讨论

3.1 红外性能

膜层的吸收主要分一般吸收和特征吸收,其中:前者对透射光谱的影响是全波段连续的,并随着波长的增大而降低;后者只对特定的波段或波长具有影响,因此会在透射光谱曲线中出现明显的凹陷。P-DLC膜和不同氧气氛条件下制备的O-DLC膜样品的红外透射光谱如图1所示,可见:所有光谱均在4.26 μm附近存在一个小的凹陷,这是由空气中的水汽和CO₂造成的背景干扰引起的,并非是膜层或硅基底的特征吸收峰。

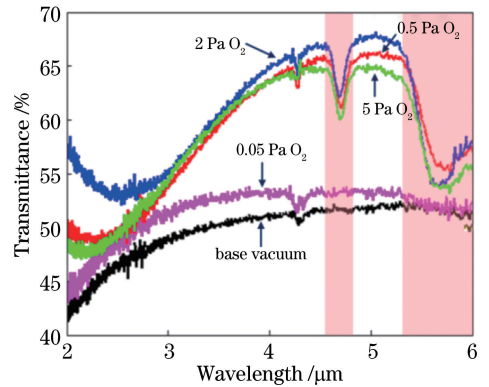


图1 不同条件下制备的DLC膜样品的红外透射光谱
Fig. 1 Infrared transmittance spectra of DLC film samples prepared under different conditions

从图1所示红外透射光谱中可以看出膜层红外透射性能的基本变化趋势:无氧气氛或者氧气氛环境气压很低(0.05 Pa)时,P-DLC膜或O-DLC膜的透射率很低,甚至低于未镀膜的硅基底。结合DLC膜折射率不会高于硅基底的初步判断,可以认为这主要是由膜层的一般吸收特别大造成的,当氧气压提高到一定程度后,透射性能显著提高,说明吸收大幅降低,且折射率也在变小。

在本底真空条件下制备的P-DLC膜的透射光谱中没有明显的特征吸收峰。当引入很少的氧气时(氧气压0.05 Pa),所制备的O-DLC膜的透射率略有上升,除了背景干扰的4.26 μm附近,未见其他明显的特征吸收峰;但与P-DLC膜对比后可以发现,5.3 μm以后的光谱曲线出现了异常降低,说明此波段存在特征吸收。当氧气压进一步提高后,可以清楚地看到4.67 μm附近和5.3 μm以后存在特征吸收峰,这些特征吸收峰均是由C—O和C=O键的

红外伸缩振动引起的^[14]。

根据单层减反膜理论,膜层的折射率越接近基底折射率的平方根,透射光谱的峰值就越接近单面镀膜样品的理论最大透过率。实验中采用的硅基底在中红外波段的折射率(忽略色散效应)约为 3.42,其平方根即为 1.85,单面镀膜可达到的理论最大透过率为 70.0%。从图 1 中可以看出:当氧气压为 2 Pa 时,透射光谱峰值最高(67.9%),接近理论最大值,说明此时的 O-DLC 膜的折射率接近 1.85;随着氧气压的进一步提高(比如 5 Pa 时),透射光谱峰值反而下降,说明折射率进一步降低,其平方根又开始远离 1.85。当然,如果在 0.5~5 Pa 之间进一步精确调整氧气压,有可能获得更接近 1.85 的折射率,从而得到更高的透射光谱峰值。氧气氛环境中制备的 O-DLC 膜折射率的降低,主要缘于膜层的多孔性^[16]。尽管氧气氛环境使 O-DLC 膜发生了特征吸收,但其中红外波段的透射大大增强,总体上提高了样品在中红外波段的透光性能。

在没有吸收的情况下,透射光谱极小值(谷值)恰好是未镀膜时基底的透过值;但由于吸收的存在,这个谷值会低于未镀膜时基底的透过值,且会随着吸收的增大而降低。由图 1 可知:氧气压低于 0.05 Pa 时,由于一般吸收过大,已无法显示出明显的谷;随着氧气压逐步增大,谷逐渐显现,且谷值随着氧气压的提高而慢慢接近未镀膜基底的透过值,即一般吸收逐渐降低。鉴于在氧气压为 0.05 Pa 时制备的 O-DLC 膜的红外透射光谱与本底真空条件下制备的 P-DLC 膜的相差不大,下文的微观测试将不再对此样品进行分析。

3.2 掺杂含量

图 2 所示为 P-DLC 膜和高掺杂 O-DLC 膜样品的 X 射线光电子能谱分析(XPS)全谱(测量精度为 1 eV)。

图 2 所示全谱中主要含有两个比较明显的峰,分别是位于 285 eV 附近的 C1s 峰和位于 530 eV 附近的 O1s 峰;前者由碳碳原子键和碳氧原子键引

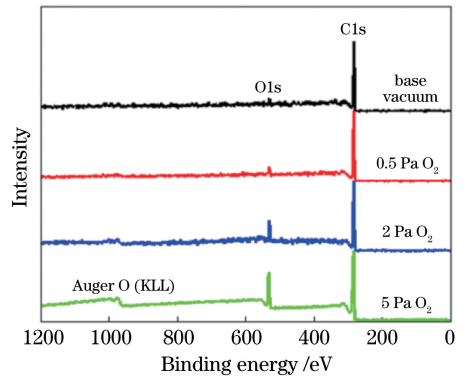


图 2 不同条件下制备的 DLC 膜的 XPS 全谱
Fig. 2 XPS surveys of DLC films prepared under different conditions

起,后者则由氧的原子键引起。其中,无氧气氛环境下制备的 P-DLC 膜也出现了 O1s 峰,其主要原因有二:一是样品表面接触空气后的氧污染;二是本底真空中的氧残留。不过对于具有红外增透保护功能的 P-DLC 膜来说,氧的影响很小,可以容忍。另外,当氧气氛气压增大到 2 Pa 以后,XPS 全谱在 1000 eV 附近出现了明显的峰,这是由氧的俄歇效应引起的^[21]。

针对 C1s 峰(282~292 eV)和 O1s 峰(528~532 eV)进行精细谱测量(测量精度为 0.05 eV),通过对比两峰的面积,可以获得组分含量 β_i (原子数分数),即

$$A_i = \frac{S_i}{\alpha_{SF_i} \cdot \alpha_{TF_i} \cdot \alpha_{ECF_i}}, \quad (1)$$

$$\beta_i = \frac{A_i}{A_{C1s} + A_{O1s}}, \quad (2)$$

式中:下脚标 i 表示 C1s 峰或 O1s 峰; S 表示精细谱中去除背景后特征峰的原始面积; A 表示特征峰的修正面积; α_{SF} 、 α_{TF} 和 α_{ECF} 分别表示测试的敏感因子、传递因子和能量校准因子,C1s 峰的上述三个因子分别为 1、1548.45、1,O1s 峰的分别为 2.38、1115.93、1。

C1s 和 O1s 特征峰的原始面积、修正面积以及碳、氧组分含量的计算结果如表 1 所示。

表 1 XPS 测试结果

Table 1 Results for XPS measurement

Parameter	P-DLC		O-DLC(0.5 Pa)		O-DLC(2 Pa)		O-DLC(5 Pa)	
	C1s	O1s	C1s	O1s	C1s	O1s	C1s	O1s
S / eV	42268.43	4106.03	39630.89	7327.89	3557.38	10440.76	33976.05	14135.53
A / eV	27.30	1.55	25.59	2.76	22.97	3.96	21.94	5.32
$\beta / \%$	94.64	5.36	90.27	9.73	85.39	14.61	80.48	19.52

无氢 DLC 膜的氧掺杂量随氧气气压的变化规律如图 3 所示,可以看出,氧掺杂含量随着氧气环境气压的增大而提高,当氧气环境气压为 5 Pa 时,氧掺杂含量(原子数分数)达到 19.5%。

3.3 原子键组分

采用 XPS 分析 DLC 膜样品的微观组分。图 4 所示为 P-DLC 膜和 O-DLC 膜(2 Pa)的 C1s 精细谱及其拟合情况。去除背景后的 C1s 精细谱可分解为 3 个或 4 个高斯特征峰,分别位于 284.4, 285.2 eV 附近以及 286.1 ~ 287.0 eV、288.0 ~ 289.0 eV 范围内,它们依次由 sp² 杂化键、sp³ 杂化键、C—O 键和 C=O 键引起^[22-23]。

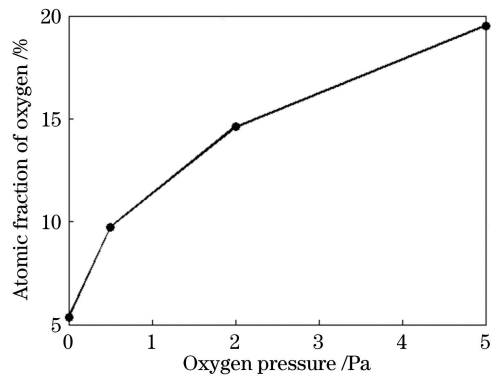


图 3 DLC 膜的氧掺杂含量

Fig. 3 Oxygen contents in DLC films

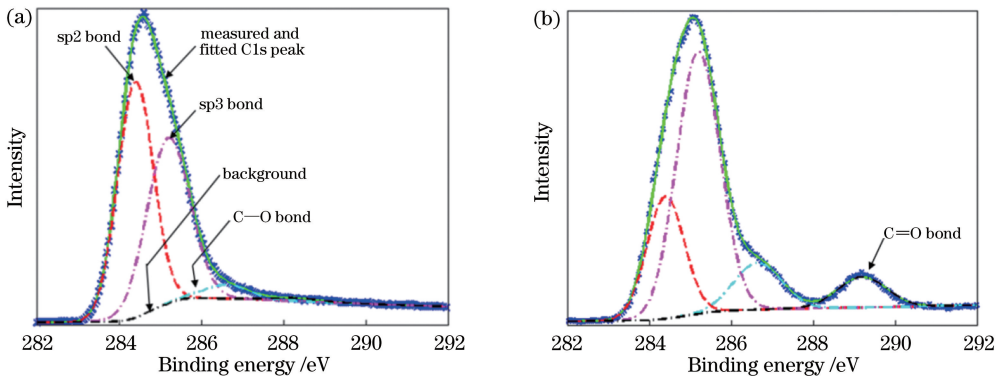


图 4 DLC 膜的 C1s 精细谱及其拟合。(a)本底真空中沉积的 P-DLC 膜;(b) 2 Pa 氧气氛环境下沉积的 O-DLC 膜

Fig. 4 Deconvoluted C1s spectra of DLC films and their fitting. (a) P-DLC film prepared in base vacuum;

(b) O-DLC film prepared in oxygen atmosphere of 2 Pa

利用杂化 sp² 和 sp³ 键引起的特征峰面积换算两者的含量以及 sp³ 与 sp² 的比例,结果如图 5 所示。由图 5 可知,氧气氛环境对 DLC 膜中 sp² 和 sp³ 键含量的影响很大:sp² 键含量随氧气氛环境气压的增大而先减后增,在 2 Pa 时最低(23.3%);sp³ 键含量则恰好相反,随氧气氛环境气压的增大而先增后减,在 2 Pa 时最高(57.9%);sp³ 与 sp² 的比例也随着氧气氛环境气压的增大而先增后减,在 2 Pa 时最高(2.49)。这一结果与前文膜层红外透射光谱的变化趋势一致。

这些变化的主控因素是氧元素。激光激发出来的碳粒子(包含碳离子、碳原子、碳原子团等)以高动能撞击氧分子,使其分解为氧原子甚至离化,一些高动能氧原子破坏了 sp²-C 中的 C=C 键,与其中的一个或两个碳原子形成共价 C—O 键,导致 sp²-C 键变为 sp³(C—O)键;或破坏 sp²-C 中的 C=C 键后,与其他悬挂键结合,而被破坏的 C=C 键与其他碳结构重新组成 sp³-C 键。该过程如图 6(a)所示,图中未注明的原子为氧或碳原子。

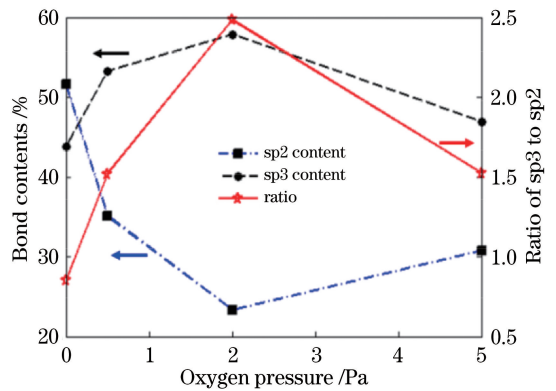


图 5 DLC 膜中的 sp² 和 sp³ 键的含量

Fig. 5 Contents of sp² bond and sp³ bond in DLC films

同时,也有一些高动能氧原子破坏了 sp³-C 中两个 C—C 键,与其中的一个碳原子形成共价 C=O 键,导致 sp³-C 键变为 sp²(C=O)键,如图 6(b)所示;另一个碳原子与其他悬挂键结合或其他氧原子形成 CO₂后被排出真空。由于 sp²-C 的键能(3.6 eV)低于 sp³-C 的键能(7.02 eV),因此,相比于 sp³-C 键,sp²-C 键更容易被高动能氧原子破坏,即

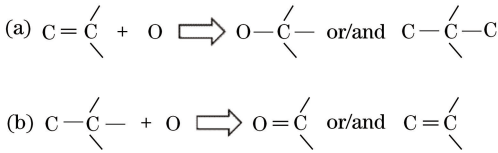


图 6 O-DLC 膜中原子键之间的结构转变。

(a) sp² 向 sp³ 转变; (b) sp³ 向 sp² 转变

Fig. 6 Configuration transforms between the atomic bonds in O-DLC film. (a) Transformation from sp² to sp³; (b) transformation from sp³ to sp²

sp²-C 键向 sp³(C—O)键的转变程度高于其逆向转变。也就是说,在一定条件下,sp³ 键的含量会随着氧原子的增加而增大。sp³ 与 sp² 比例的提高意味着红外吸收的降低,这与红外透射光谱中谷值的变化规律一致。此外,折射率的降低也会导致红外透射性能的提升。

但是,当氧气氛环境气压达到一定程度时,如大于 2 Pa 时,频繁的碰撞使氧分子(或氧原子)对碳粒子的阻碍作用成为主导因素,就会极大地降低了碳粒子的动能,从而更倾向于形成较低键能的 sp² 键,进而导致红外吸收增大,即红外透射性能降低;这种阻碍甚至会使碳粒子无法到达基底,以至于无法成膜。

3.4 非晶 DLC 膜

图 7 所示为 P-DLC 膜和 O-DLC 膜样品的 X 射线衍射(XRD)图样,可见:XRD 图样在 27.8°附近均出现了强烈的衍射峰,这是单晶硅(111)基底引起的。除此之外,没有其他衍射峰出现,这说明所有 DLC 膜中均不存在晶体结构,即实验所制备的是非晶 DLC 膜或非晶氧掺杂 DLC 膜。这表明氧气氛环境对脉冲激光沉积 DLC 膜的晶态结构没有影响。此外,非晶态不存在晶体的散射效应,因此,不会妨害红外透射性能。

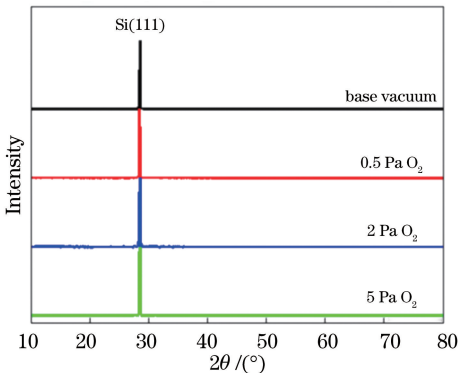


图 7 DLC 膜的 XRD 衍射图样

Fig. 7 XRD patterns of DLC films

4 结 论

采用飞秒激光制备了无氢 O-DLC 膜,研究了环境气压对膜层红外透射性能以及掺杂含量、原子键、晶态结构的影响。结果表明:随着氧气氛环境气压的增大,DLC 膜中 sp³ 键与 sp² 键的比例由纯 DLC 膜时的 0.84 提高至 2.49,有效降低了类金刚石膜的红外吸收;同时,由于氧气氛中制备的 O-DLC 膜具有多孔性,故其折射率较低。综合来看,虽然制备的无氢 O-DLC 膜在中红外波段出现了特征吸收,但红外透射性能仍得到了很大增强。此外,氧气氛的引入未改变脉冲激光沉积 DLC 膜的非晶结构,不会降低其红外透射性能。

致谢 感谢武汉安扬激光技术有限责任公司提供 FemtoYL-100 光纤飞秒激光器。

参 考 文 献

[1] Cheng Y, Lu Y M, Huang G J, et al. Experimental research on Ge-doped diamond-like carbon films prepared by double laser beams deposition [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0303001. 程勇, 陆益敏, 黄国俊, 等. 双激光沉积掺杂类金刚石膜的实验研究[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0303001.

[2] Wang Y, Xie X H, Wang Y L, et al. Latest progress in the preparation of cemented carbide tool coatings [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2019, 10(1): 60-66. 王云, 谢小豪, 汪艳亮, 等. 硬质合金刀具涂层的研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2019, 10(1): 60-66.

[3] Zhao M M, Sang L J, Zhou M L, et al. Study on deposition of DLC coating by the multi-cavity coupling microwave surface-wave PECVD technique [J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2018, 38(3): 368-372. 赵曼曼, 桑利军, 周美丽, 等. 多腔耦合微波表面波 PECVD 法沉积 DLC 薄膜研究[J]. 核聚变与等离子体物理, 2018, 38(3): 368-372.

[4] Ling X, Yu S R, Zhang J Y. Influence of working pressure on structure and properties of diamond-like carbon films [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(6): 1878-1882. 凌晓, 俞树荣, 张俊彦. 沉积气压对类金刚石薄膜结构和性能的影响[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1878-1882.

[5] Aoqui S I, Ikegami T, Yamagata Y, et al. Optical

- emission study of the laser plasma plume produced during diamondlike carbon thin film preparation [J]. *Thin Solid Films*, 1998, 316(1/2): 40-44.
- [6] Martinez-Martinez D, de Hosson J T M. On the deposition and properties of DLC protective coatings on elastomers: a critical review [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 258: 677-690.
- [7] Gupta P, Williams G V M, Vajandar S, et al. Positioning of cobalt atoms in amorphous carbon films by pre-selecting the hydrogen concentration [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2017, 409: 116-120.
- [8] Wu X Y, Ge Z, Ruan J J, et al. Edge-profiling effect on the tribological properties of protrusion textured N-Si-DLC films in air [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2018, 52(5): 554-560.
吴行阳, 葛宙, 阮敬杰, 等. 边缘修形织构化 N、Si 共掺杂类金刚石碳膜在空气中的摩擦磨损性能 [J]. *上海交通大学学报*, 2018, 52(5): 554-560.
- [9] Wufanbieke B, Ma J P, Mira B, et al. The research of preparation and biocompatibility of nitrogen-doped diamond-like carbon films [J]. *Orthopaedic Biomechanics Materials and Clinical Study*, 2017, 14(3): 9-12.
吾凡别克·巴合提, 马嘉平, 米拉·巴合提, 等. 氮掺杂类金刚石薄膜的制备及生物相容性研究 [J]. *生物骨科材料与临床研究*, 2017, 14(3): 9-12.
- [10] Ray S C, Pong W F, Papakonstantinou P. Iron, nitrogen and silicon doped diamond like carbon (DLC) thin films: a comparative study [J]. *Thin Solid Films*, 2016, 610: 42-47.
- [11] Usman A, Rafique M S, Shaukat S F, et al. Impact of argon gas on optical and electrical properties of carbon thin films [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2016, 503: 157-161.
- [12] Hevia S A, Guzmán-Olivos F, Muñoz I, et al. Nanostructured substrate effects on diamond-like carbon films properties grown by pulsed laser deposition [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 312: 55-60.
- [13] Manikandan E, Kennedy J, Kavitha G, et al. Hybrid nanostructured thin-films by PLD for enhanced field emission performance for radiation micro-nano dosimetry applications [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 647: 141-145.
- [14] Safaie P, Eshaghi A, Bakhshi S R. Optical properties of oxygen doped diamond-like carbon thin films [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 672: 426-432.
- [15] Nakamura T, Ohana T. Photochemical modification of DLC films with oxygen functionalities and their chemical structure control [J]. *Diamond and Related Materials*, 2013, 33: 16-19.
- [16] Adamopoulos G, Godet C, Zorba T, et al. Electron cyclotron resonance deposition, structure, and properties of oxygen incorporated hydrogenated diamondlike amorphous carbon films [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 96(10): 5456-5461.
- [17] Yoshitake T, Nishiyama T, Nagayama K. The role of hydrogen and oxygen gas in the growth of carbon thin films by pulsed laser deposition [J]. *Diamond and Related Materials*, 2000, 9: 689-692.
- [18] Lu Y M, Huang G J, Guo Y L, et al. Experiment research on the double-layer diamond-like carbon film prepared by double laser beams [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1121003.
陆益敏, 黄国俊, 郭延龙, 等. 双激光制备双层结构类金刚石膜的实验研究 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(11): 1121003.
- [19] Wang S Y, Guo Y L, Liu X, et al. Preparation of anti-reflective and protective diamond-like carbon film on Si substrate by femto-second pulsed laser deposition [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(8): 1705-1708.
王淑云, 郭延龙, 刘旭, 等. 飞秒激光制备硅窗口增透保护类金刚石膜 [J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(8): 1705-1708.
- [20] Lu Y M, Huang G J, Guo Y L, et al. Improved design and experiment for preparing uniform optical DLC film by large area PLD [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(3): 555-560.
陆益敏, 黄国俊, 郭延龙, 等. 激光沉积大面积均匀类金刚石膜的设计改进及实验 [J]. *兵工学报*, 2017, 38(3): 555-560.
- [21] Xue Q J, Wang L P. Thin film materials of carbon-base diamond-like carbon [M]. Beijing: Science Press, 2012: 16.
薛群基, 王立平. 类金刚石碳基薄膜材料 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 16.
- [22] Modabberasl A, Kameli P, Ranjbar M, et al. Fabrication of DLC thin films with improved diamond-like carbon character by the application of external magnetic field [J]. *Carbon*, 2015, 94: 485-493.
- [23] Kumar P, Gupta M, Deshpande U P, et al. Density and microstructure of a-C thin films [J]. *Diamond and Related Materials*, 2018, 84: 71-76.