

辉光放电辅助脉冲激光沉积 CN_x 薄膜的 价键结构及机械性能

郑晓华 宋建强 杨芳儿 陈占领

(浙江工业大学机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要 采用直流辉光放电辅助脉冲激光沉积(PLD)法,以不同的激光通量在单晶硅基底上沉积 CN_x 薄膜。利用扫描电镜(SEM)、拉曼光谱、X射线衍射(XRD)谱、X射线光电子谱(XPS)、纳米压入仪和球盘式微型摩擦磨损试验仪对薄膜的成分、微观结构、表面形貌、力学及摩擦学性能进行了系统分析。结果表明:所有薄膜处于非晶状态。当激光通量从 5.1 J/cm^2 提升至 7.5 J/cm^2 时,薄膜的含氮原子数分数由 27.7% 上升至 34.1%;膜中 sp^3C-N 键和 sp^2C-N 键的面积百分数上升, sp^3C-C 键的面积百分数降低,C 原子 sp^3 杂化程度增加,薄膜的石墨化程度下降;薄膜的硬度由 3.7 GPa 增加至 5.3 GPa,磨损率从 $3.8 \times 10^{-13} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 下降至 $7.9 \times 10^{-14} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,摩擦系数从 0.13 上升至 0.18。

关键词 薄膜;氮化碳;脉冲激光沉积;X射线光电子谱;摩擦与磨损

中图分类号 O484 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.1107002

Valence Bond Structure and Mechanical Properties of CN_x Films Prepared by Glow Discharge Assisted Pulsed Laser Deposition

Zheng Xiaohua Song Jianqiang Yang Fanger Chen Zhanling

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology,

Hangzhou, Zhejiang 310014, China)

Abstract The CN_x films are deposited on monocrystalline silicon by direct current glow discharge assisted pulsed laser deposition (PLD) technique under various laser fluxes. The composition, microstructure, surface morphology, mechanical and tribological properties of the films are characterized by scanning electron microscopy (SEM), Raman spectroscopy, X-ray diffraction (XRD), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), nano indenter and ball-on-disk tribometer, respectively. The results show that the films are of amorphous structure. The nitrogen atomic content of the CN_x film increases from 27.7% to 34.1% with the increase of laser flux from 5.1 J/cm^2 to 7.5 J/cm^2 . An increased area percentage of sp^3C-N bond, sp^2C-N bond, and a decreased area percentage of sp^3C-C bond are observed in the film. An increased degree of carbon sp^3 hybrid and a decreased degree of graphitization of the film are found. With the increasing of laser flux, the film hardness increases from 3.7 GPa to 5.3 GPa, the wear rate of the film decreases from $3.8 \times 10^{-13} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ to $7.9 \times 10^{-14} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, and the friction coefficient increases from 0.13 to 0.18, respectively.

Key words thin films; CN_x ; pulsed laser deposition; X-ray photoelectron spectroscopy; friction and wear

OCIS codes 310.1515; 310.1860; 310.6870; 350.3390

1 引言

氮化碳材料(CN_x)由于可能成为新一代超硬材

料而受到研究者的广泛关注^[1]。大量研究结果表明, CN_x 的性能强烈依赖于合成技术及制备参数,且单一

收稿日期: 2013-06-09; 收到修改稿日期: 2013-07-11

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(Y4110645)

作者简介: 郑晓华(1971—),男,博士,副教授,主要从事材料摩擦与磨损、纳米涂层制备与应用等方面的研究。

E-mail: zhengxh@zjut.edu.cn

沉积技术在获得晶态超硬 CN_x 时存在较大困难。脉冲激光沉积(PLD)技术也不例外,虽已被广泛应用于沉积 CN_x 薄膜,但仅依靠激光烧蚀石墨靶产生的等离子体羽辉和氮气反应获得的前驱物来制备 CN_x 薄膜,其含氮量为 12%~25%(原子数分数)^[2]。为了提高薄膜的含氮量,Cheng 等^[3]采用直流辉光放电辅助的脉冲激光烧蚀石墨靶,在 1~20 Pa 氮气压强下制备 CN_x 薄膜,结果测得在 10 Pa 下 NC 原子比为 0.34,在 20 Pa 下 NC 原子比上升至 0.38。郑晋翔等^[4]采用脉冲激光烧蚀 CN_x 靶的技术路线制备 CN_x 薄膜,结果测得激光通量从 5.1 J/cm² 上升至 10.0 J/cm² 时,薄膜含氮量由 23.8%(原子数分数)上升至 29.9%(原子数分数),但薄膜中 sp^3 键含量还有待进一步提高。目前,采用复合技术制备 CN_x ^[5]、负偏压调控薄膜的原子成键结构和性能^[6]、促进非晶氮化碳($a-CN_x$)的结晶^[7]以及提高氮元素的掺入量^[8]等都是 CN_x 领域的研究热点。

由于氮气辉光放电能够提供大量氮离子^[9],因而采用直流辉光放电辅助 PLD 技术有助于提高氮气的电离率和 PLD 羽辉的含氮量,能为制备 CN_x 薄膜提供更多的诸如 N 、 N_2^+ 、 N^+ 等活性粒子^[10-11],从而提高 CN_x 薄膜含氮量并改变薄膜的组织结构。此外,辉光放电的直流电压还可起到负偏压的作用,从而对原子的成键结构产生影响。目前,关于直流辉光放电辅助 PLD 法制备 CN_x 薄膜的报道很少,且对应膜层的机械性能数据非常少。因此,本文将利用直流辉光放电辅助 PLD 法在 Si 基底上沉积 CN_x 薄膜,研究不同激光通量条件下 CN_x 薄膜的价键结构和机械性能,以阐明辉光放电辅助下薄膜的组织结构和性能演变规律,为丰富和发展 CN_x 薄膜制备技术以及性能数据起到积极意义。

2 实验部分

2.1 薄膜的制备方法

实验采用 PLD-3 型脉冲激光沉积设备烧蚀高纯石墨靶(纯度大于等于 99.99%),在单晶硅基底材料(<111>晶向,单面抛光)上沉积 CN_x 薄膜,所用激光器为德国产 KrF 准分子激光器(Lambda Physik COMPex pro-201,波长 $\lambda=248$ nm,脉冲宽度 $\tau=25$ ns)。实验用单晶硅片置于体积分数为 10% HF 中浸泡 15 min,并且依次用丙酮和无水酒精清洗,经真空干燥箱烘干后迅速装入真空沉积室;石墨靶清洗及烘干过程同上,随后用低能量激光脉冲对靶的工作区进行烧蚀清洗除杂,直至靶面露出

洁净的表面。将沉积室的底真空度抽至 2×10^{-4} Pa,再通入高纯氮气并使气压恒定在 12 Pa,然后在靶材和基底之间施加 500 V 直流电压(靶材接正极、基底接负极)并开始正式沉积,激光脉冲输出频率为 10 Hz,靶基距 37 mm,辉光放电功率密度为 30 mW/cm²。沉积时采用的激光通量分别为 5.1、5.9、6.7、7.5 J/cm²,沉积时间均为 2 h,共获得四组薄膜样品,膜厚均大于 1.2 μ m。此外,在激光通量为 7.5 J/cm² 及不加直流电压的条件下(传统 PLD)制备了一组 CN_x 薄膜,用于机械性能的对比。

2.2 薄膜的表征方法

CN_x 薄膜的晶体结构采用荷兰 PANalytical 公司生产的 X'Pert PRO 型 X 射线衍射仪(XRD)进行分析,探测器为 X'Celerator, Cu 靶, $K\alpha$ 射线($\lambda=0.154056$ nm),管电压 40 kV,电流 40 mA,步长 0.033°/s,扫描范围 20°~90°。薄膜的价键结构表征在 Kratos Axis Ultra DLD 型多功能电子能谱仪上进行,激发源为单色 Al $K\alpha$ 射线(1486.7 eV)。采用铜(Cu 2p_{3/2}, 932.67 eV)和银(Ag 3d_{5/2}, 368.26 eV)标样进行能量定标。薄膜的拉曼光谱分析在 LabRAM HR UV 激光显微拉曼光谱仪上进行,激光波长为 632.18 nm,设定检测波数范围为 200~2500 cm⁻¹。

CN_x 薄膜的表面形貌在 Hitachi S-4700 场发射扫描电镜(SEM)上观察,加速电压为 15 kV。力学性能测试在 Ti-900 纳米压入测试系统上进行,采用标准的 Berkovich 压头,最大载荷为 1 mN,取 10 次测量结果的平均值。薄膜的摩擦磨损实验在 HT-500 型球盘式磨损试验机上进行,对偶材料为直径 4 mm 的 Si₃N₄ 陶瓷球,法向载荷 50 g,回转半径 5 mm,电机转速 336 r/min,室温,空气相对湿度 61%~64%,测试时长 10 min。薄膜的磨损率采用 Dektak 3 型台阶仪测定磨痕的截面轮廓并经过计算得到,计算方法与文献[4]相同。

3 结果与讨论

3.1 薄膜的 XRD 和光电子能谱分析

XRD 结果表明(图略),所有 CN_x 薄膜的衍射图谱中仅有 Si 基底(422)晶面的强烈衍射峰和(211)晶面的微弱衍射峰(对应的 2θ 角分别为 69.31°和 33.15°),未出现诸如石墨、金刚石、氮化碳、SiC 和 Si₃N₄ 等结晶相的衍射峰,因此可以推断薄膜处于微晶或非晶状态。

图 1 所示为不同激光通量下 CN_x 薄膜的 C_{1s} 和

N_{1s} 光电子能谱(XPS)图。参考相关文献可知^[12-14], CN_x 薄膜的 C_{1s} 谱图可采用 5 个峰来拟合, 分别位于 (284.5 ± 0.1) eV 的 sp^2C-C 键、 (285.4 ± 0.1) eV 的 sp^3C-C 键、 (286.2 ± 0.1) eV 的 sp^2C-N 键、 (287.5 ± 0.1) eV 的 sp^3C-N 键以及 $(288.8 \pm$

$0.2)$ eV 的 $C-O$ 键。同理, 薄膜的 N_{1s} 谱图可拟合 2 个峰, 分别位于 (398.7 ± 0.1) eV 的 $N-sp^3C$ 键和 (400.2 ± 0.1) eV 的 $N-sp^2C$ 键。谱图在拟合时先用 Shirley 法扣除背底, 然后用洛伦兹-高斯函数进行拟合。

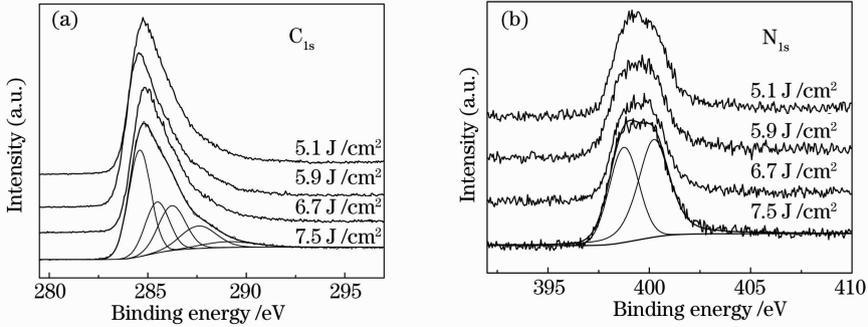


图 1 不同激光通量下 CN_x 薄膜的 (a) C_{1s} 和 (b) N_{1s} XPS 谱

Fig. 1 (a) C_{1s} and (b) N_{1s} XPS spectra of CN_x films with various laser fluxes

图 2 所示为 CN_x 薄膜的 C_{1s} 谱图拟合结果。由图 2(a) 可知, sp^2C-N 键的含量(谱峰卷积分面积的百分数,下同)随着激光通量的提高而增加,并逐渐趋于饱和。注意到图 2(b)中 sp^3C-N 键的含量也随激光通量的提高而增加,因此可以断定薄膜的含氮量随激光通量的提高而增加。这是因为薄膜中的氮元素主要存在于 $C-N$ 键中,而 $C-N$ 键的含量可以用 sp^2C-N 键和 sp^3C-N 键的含量之和来表示。计算结果表明,薄膜的含氮量从 27.7% 升高至 34.1% (原子数分数),明显高于对比组薄膜(含氮量

为 23.2%, XPS 法),这主要归功于高的激光通量使得烧蚀出的粒子(或团簇)数量增多、动能增大,在辉光放电的作用下与氮分子的相互作用增强,提高了等离子体中碳和氮的反应活性,从而形成了更多的 CN 基团^[3,10-11,15]。此外,偏压驱动下的氮离子注入效应可能也是薄膜含氮量提高的原因。图 2(b)中 sp^3C-C 键的含量随着激光通量的提高而有所降低,但薄膜中 sp^3 键的总含量(sp^3C-C 键和 sp^3C-N 键的含量之和)从 30.1% 上升到 34.2%,这表明激光通量的提升有助于 sp^3 键的形成^[16]。

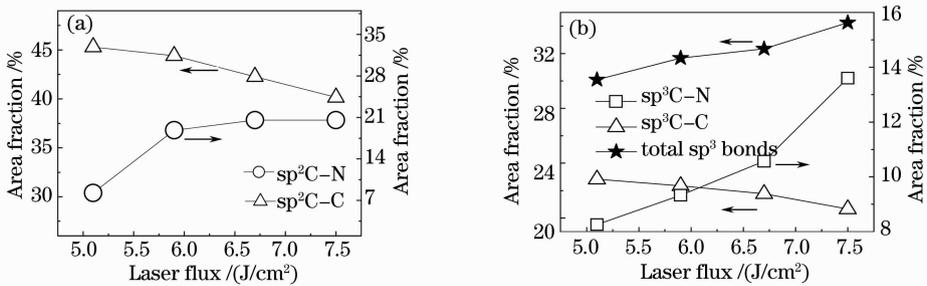


图 2 CN_x 薄膜的 C_{1s} 谱图拟合结果。(a) sp^2C-C , sp^2C-N 含量;(b) sp^3C-C , sp^3C-N 含量

Fig. 2 Fitting results of C_{1s} spectra of CN_x films. (a) Area fraction of sp^2C-C , sp^2C-N ;

(b) area fraction of sp^3C-C , sp^3C-N

图 3 所示为 CN_x 薄膜的 N_{1s} 谱图拟合结果。可以看出,随着激光通量的提高,薄膜中 $N-sp^3C$ 键的原子数分数从 35.5% 逐渐上升到 42.7%,也即 $N-sp^3C$ 键在 $C-N$ 键中的比例增加而 $N-sp^2C$

键的比例减少,这一结果与图 2 C_{1s} 谱图中 sp^3C-N 键含量的快速增加以及 sp^2C-N 键含量的逐渐饱和趋势相佐证。

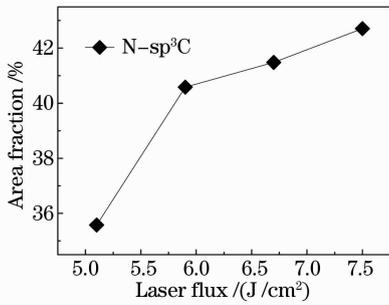


图3 CN_x 薄膜的 N_{1s} 谱图拟合结果

Fig. 3 Fitting results of N_{1s} spectra of CN_x films

3.2 薄膜的拉曼光谱分析

图 4(a)所示为不同激光通量下 CN_x 薄膜的拉曼

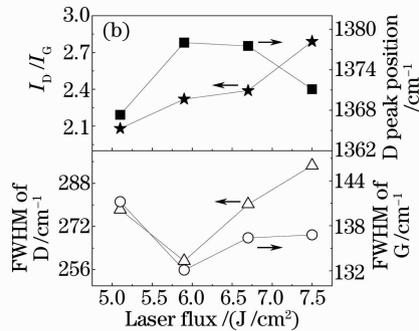
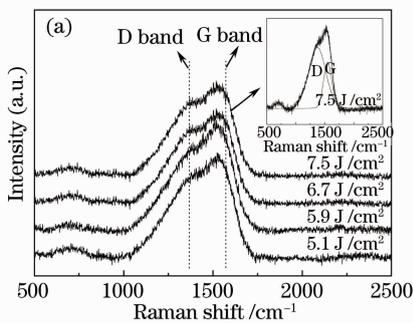


图 4 不同激光通量下 CN_x 薄膜的(a)拉曼光谱及(b)拟合结果

Fig. 4 (a) Raman spectra and (b) fitting results of CN_x films with various laser fluxes

3.3 薄膜的表面形貌

图 5(a)所示为激光通量为 7.5 J/cm² 的 CN_x 薄膜样品的表面形貌,样品表面由众多尺寸位于 50~200 nm 的微粒堆积而成,仅有少量 200~300 nm 的大颗粒,其他通量下样品的表面形貌与此十分相似。图 5(b)所示为相同通量条件下对比组薄膜的表面形貌,表面微粒的尺寸比前者要大得多,显得更为粗糙。这说明辉光放电辅助 PLD 法可以

显著改善 CN_x 薄膜的表面质量,其原因可理解为:薄膜处于 500 V 直流负偏压环境中,产生的正离子得到负偏压的加速从而具有更高动能并轰击薄膜,起到了对薄膜表面的刻蚀作用,使得大颗粒或结合不牢固的微粒脱落^[20]。此外,离子轰击会导致薄膜温度的升高,有利于原子的扩散和迁移^[21-22],也会弱化激光通量对薄膜表面形貌的影响。

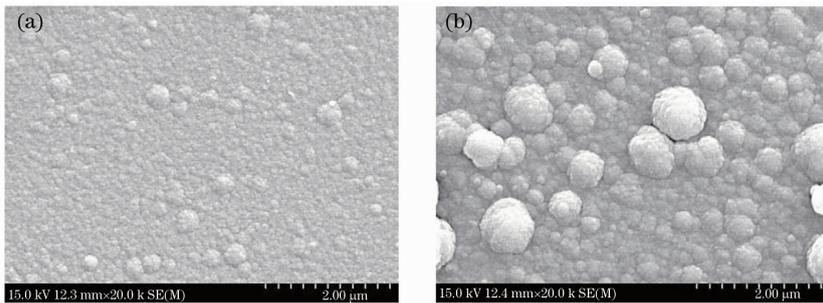


图 5 CN_x 薄膜的表面形貌 SEM 照片。(a) 辉光放电辅助 PLD; (b) 传统 PLD

Fig. 5 Morphology SEM images of CN_x films. (a) Glow discharge assisted PLD; (b) conventional PLD

3.4 薄膜的机械性能分析

在实验室条件下(相对湿度为 61%~64%)对 CN_x 薄膜样品进行了摩擦磨损试验,获得样品的瞬

时摩擦系数,并取瞬时摩擦系数的平均值作为薄膜的摩擦系数。结果表明,随着激光通量的提高,样品的摩擦系数逐渐升高,分别为 0.127, 0.142, 0.168

和 0.179。一般地说,薄膜的摩擦系数与其表面形貌、组织结构、硬度、摩擦机理及环境因素间存在明显关联。 CN_x 薄膜样品摩擦系数升高的主要原因可归结为:1) 随着激光通量的提高,薄膜内部的 sp^2 杂化结构逐渐向 sp^3 杂化结构转变,薄膜的石墨化程度降低,具有低摩擦系数的类石墨相的含量减少;2) 薄膜中碳原子的 sp^3 杂化程度增强,导致薄膜的硬度升高(薄膜硬度测试结果见图6),弹性模量增

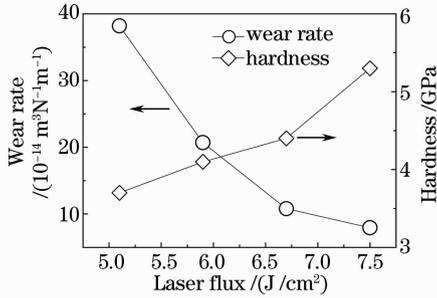


图6 不同激光通量下 CN_x 薄膜的磨损率及硬度
Fig. 6 Wear rate and hardness of CN_x films with various laser fluxes

大,从而引起摩擦副界面间的剪切力增大。实验也测得了对比组薄膜的摩擦系数为 0.184,高于辉光放电辅助 PLD 法制备的薄膜。

图7所示为薄膜样品经磨损测试之后的 SEM 照片。激光通量为 $7.5 J/cm^2$ 的薄膜[图7(a)],其磨痕边缘极不光滑且粘附有大量磨损产物,磨痕的中心区域有深浅程度不同的犁沟。激光通量为 $6.7 J/cm^2$ 和 $5.9 J/cm^2$ 的薄膜的磨损形貌与此极为相似(图略),且随着激光通量的降低磨痕宽度不断加大;而通量为 $5.1 J/cm^2$ 的薄膜[图7(b)]已经被磨穿,亮白色条带(黑色虚线框所示)为裸露的硅基底。相反,图7(c)中对比组薄膜的磨痕边缘较为光滑,磨损产物很少,其磨损形式以粘着磨损为主,薄膜在磨损过程中能形成碳质转移膜,与多数 CN_x 薄膜一致^[4,23]。由此可以推断,辉光放电辅助 PLD 法制备的 CN_x 薄膜的磨损机制并非粘着磨损,而是以陶瓷球的犁削效应为主要特征的磨粒磨损为主;由于薄膜硬度较低,在磨损时受较小的挤压力就产生明显变形并堆积在磨痕边缘。

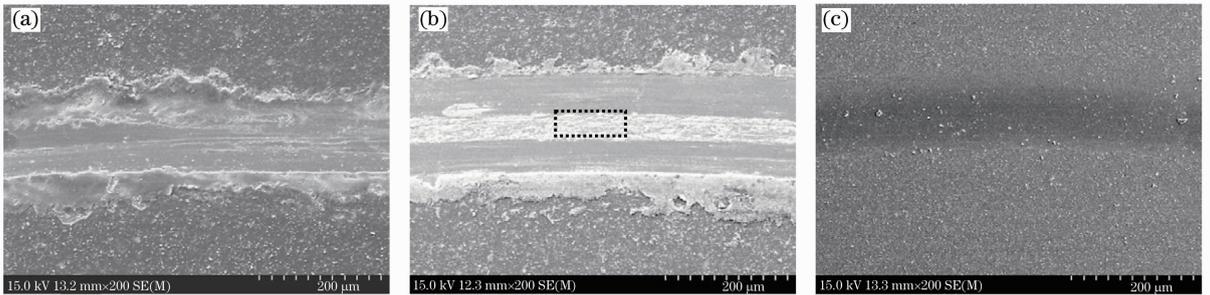


图7 CN_x 薄膜磨损后的表面形貌。(a) $7.5 J/cm^2$ 时,辉光放电辅助 PLD; (b) $5.1 J/cm^2$ 时,辉光放电辅助 PLD; (c) $7.5 J/cm^2$ 时,传统 PLD

Fig. 7 Morphology of wear tracks of CN_x films. (a) $7.5 J/cm^2$, glow discharge assisted PLD; (b) $5.1 J/cm^2$, glow discharge assisted PLD; (c) $7.5 J/cm^2$, conventional PLD

由图6可知, CN_x 薄膜样品的磨损率随着激光通量的提高而成倍降低, $7.5 J/cm^2$ 时具有最小值 $7.94 \times 10^{-14} m^3 \cdot N^{-1} \cdot m^{-1}$,但这几乎是对比组薄膜磨损率($4.37 \times 10^{-15} m^3 \cdot N^{-1} \cdot m^{-1}$)的 18 倍。因此,尽管辉光放电辅助 PLD 法制备的薄膜具有较高的含氮量和较低摩擦系数,但薄膜的硬度和耐磨性显著低于传统 PLD 薄膜(对比组薄膜的硬度为 11.3 GPa)。推测可能的原因是薄膜受到高能离子的轰击而使其致密性降低以及薄膜内应力的性质发生改变,这有待进一步深入研究。

量条件下制备了非晶态 CN_x 薄膜,可实现薄膜含氮量的提升。激光通量对薄膜的成分、组织结构、价键状态及摩擦学性能影响显著,随着激光通量从 $5.1 J/cm^2$ 提高至 $7.5 J/cm^2$,薄膜的含氮量从 27.7% 上升至 34.1% (原子数分数),膜层中 sp^3 杂化键含量得到了显著增加, I_D/I_G (D 峰与 G 峰的强度之比)从 2.08 上升至 2.79,薄膜石墨化程度降低、无序化程度逐渐增加。在直流辉光放电条件下,激光通量对薄膜的表面颗粒尺度影响不大,但有助于提高薄膜的硬度和耐磨性能,薄膜的摩擦系数介于 0.13~0.18 之间。

4 结 论

使用直流辉光放电辅助 PLD 法在不同激光通

参 考 文 献

1 A Y Liu, M L Cohen. Prediction of new low compressibility

- solids[J]. Science, 1989, 245(4920):841-842.
- 2 Y Aoi, K Ono, K Sakurada, *et al.*. Effects of heat treatment on structure of amorphous CN_x thin films by pulsed laser deposition [J]. Thin Solid Films, 2001, 389(1-2): 62-67.
 - 3 Y H Cheng, Z H Sun, B K Tay, *et al.*. Influence of deposition pressure on the composition and structure of carbon nitride films deposited by direct current plasma assisted pulsed laser ablation [J]. Applied Surface Science, 2001, 182(1-2): 32-39.
 - 4 Zheng Jinxiang, Zheng Xiaohua, Shen Tao, *et al.*. Microstructure and tribological behavior of CN_x films deposited by iterative pulsed laser deposition[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0607001.
郑晋翔, 郑晓华, 沈涛, 等. 递进式脉冲激光沉积 CN_x 薄膜的组织结构与摩擦学特性[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0607001.
 - 5 E Cappellia, S Orlandob, D M Truchia, *et al.*. Carbon nitride films by RF plasma assisted PLD: spectroscopic and electronic analysis [J]. Applied Surface Science, 2011, 257 (12): 5175-5180.
 - 6 Guo Jian, Yang Yimin. Influence of DC biasing on amorphous carbon deposited by pulse laser ablation [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2002, 13(10): 1044-1047.
郭建, 杨益民. 直流偏压对脉冲激光烧蚀沉积非晶碳膜的影响[J]. 光电子 • 激光, 2002, 13(10): 1044-1047.
 - 7 Xiao Xingcheng, Jiang Weihui, Tian Jingfen, *et al.*. Effect of high-temperature treatment on the crystallization of CN_x thin films[J]. Acta Physica Sinica, 2000, 49(1): 173-176.
肖兴成, 江伟辉, 田静芬, 等. 高温处理对 CN_x 薄膜晶化的影响[J]. 物理学报, 2000, 49(1): 173-176.
 - 8 X F Xu, N Xu, W Hu, *et al.*. Self-assembled growth of carbon nitride nanocones using abnormal glow discharge [J]. Applied Physics A-Materials Science and Processing, 2009, 96 (2): 415-421.
 - 9 Zhang Lianzhu. Creation rates of active species (N^+ , N) in a nitrogen direct current glow discharge[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2003, 23(2): 113-118.
张连珠. 氮直流辉光放电活性粒子(N^+ , N)的产生率[J]. 核聚变与等离子体物理, 2003, 23(2): 113-118.
 - 10 Y H Cheng, X L Qiao, J G Chen, *et al.*. Synthesis of carbon nitride films by direct current plasma assisted pulsed laser deposition [J]. Applied Physics A-Materials Science and Processing, 2002, 74(2): 225-231.
 - 11 K Kutasi, Z Donko, M Mohai, *et al.*. Formation of CN_x layers in a nitrogen glow discharge with graphite electrodes[J]. Vacuum, 2002, 68(4): 311-319.
 - 12 M Aono, S Aizawa, N Kitazawa, *et al.*. XPS study of carbon nitride films deposited by hot filament chemical vapor deposition using carbon filament [J]. Thin Solid Films, 2008, 516 (5): 648-651.
 - 13 J T Titantah, D Lamoen. Carbon and nitrogen 1s energy levels in amorphous carbon nitride systems: XPS interpretation using first-principles[J]. Diamond and Related Materials, 2007, 16 (3): 581-588.
 - 14 Zheng Xiaohua, Tu Jiangping, Song Renguo. Microstructure and tribological behavior of pulsed laser deposited a- CN_x films [J]. Applied Surface Science, 2010, 256(10): 3211-3215.
 - 15 Stephen Muhl, Juan Manuel Méndez. A review of the preparation of carbon nitride films [J]. Diamond and Related Materials, 1999, 8(10): 1809-1830.
 - 16 Luo Le, Zhang Junfang, Fang Xiaodong, *et al.*. Influence of the laser pulsed energy upon the diamond-like carbon film and its infrared property [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37 (12): 3121-3126.
罗乐, 张君芳, 方晓东, 等. 激光脉冲能量对类金刚石薄膜及其红外光学特性的影响 [J]. 中国激光, 2010, 37 (12): 3121-3126.
 - 17 Tan Manlin, Zhu Jiaqi, Han Jiecai, *et al.*. Raman characterization of boron doped tetrahedral amorphous carbon films[J]. Materials Research Bulletin, 2008, 43(2): 453-462.
 - 18 Bai Ting, Ye Jingfeng, Liu Jingru, *et al.*. Pulsed excimer laser deposited diamond like carbon film on ZnS with wide-spectral transmission[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34 (7): 992-997.
白婷, 叶景峰, 刘晶儒, 等. 利用脉冲准分子激光在 ZnS 上沉积类金刚石薄膜[J]. 中国激光, 2007, 34(7): 992-997.
 - 19 Li Junjie, Cao Peijiang, Zheng Weitao, *et al.*. Influence of bombarding ions energy on the content of sp^2C-N bonds in carbon nitride films [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2003, 5(24): 880-883.
李俊杰, 曹培江, 郑伟涛, 等. 轰击离子能量对 CN_x 薄膜中 SP^3 型 C-N 键含量的影响[J]. 高等学校化学学报, 2003, 24(5): 880-883.
 - 20 Li Tiejun, Liu Jingru, Wang Lige. Pulsed laser deposition of diamond like carbon film with XeCl (308 nm) laser [J]. Acta Optica Sinica, 1997, 17(3): 331-337.
李铁军, 刘晶儒, 王丽戈. XeCl(308 nm)脉冲准分子激光沉积类金刚石薄膜[J]. 光学学报, 1997, 17(3): 331-337.
 - 21 Chen Jiangbo, Wang Li, Su Xueqiong, *et al.*. Affect of ZnO thin film of pulsed laser deposition by substrate temperatures [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(6): 1539-1544.
陈江博, 王丽, 苏雪琼, 等. 基片温度对脉冲激光沉积 ZnO 薄膜性质的影响[J]. 中国激光, 2009, 36(6): 1539-1544.
 - 22 Luo Le, Zhao Shumi, Qiu Jihong, *et al.*. Influence of the substrate temperature upon the diamond-like carbon films deposited by pulsed laser [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2063-2067.
罗乐, 赵树弥, 仇冀宏, 等. 衬底温度对脉冲激光沉积类金刚石薄膜的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2063-2067.
 - 23 T Tokoroyama, M Goto, N Umehara, *et al.*. Effect of nitrogen atoms desorption on the friction of the CN_x coating against Si_3N_4 ball in nitrogen gas [J]. Tribology Letters, 2006, 22 (3): 215-220.

栏目编辑: 韩峰