

# 磁控溅射 Al 靶功率对类金刚石薄膜结构和摩擦学性能的影响

周升国<sup>1,2</sup>, 王立平<sup>1\*</sup>, 薛群基<sup>1</sup>

(1. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;  
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 本文采用中频磁控溅射金属 Al 靶, 以 CH<sub>4</sub> 为反应气体, 通过调整 Al 靶溅射功率, 在 p(100) 单晶硅片和不锈钢基底上成功制备出不同 Al 含量的 Al/a-C:H 纳米复合薄膜. 并利用 HR-TEM、XPS、纳米压痕仪和摩擦磨损试验机等手段分析和研究了 Al/a-C:H 薄膜的结构、机械及摩擦学性能. 结果表明: 金属 Al 以纳米晶颗粒形式镶嵌在非晶碳网络中, 使得所制备 Al/a-C:H 薄膜呈现出典型的纳米晶/非晶复合结构; 同时, Al 掺杂促进了薄膜中 sp<sup>2</sup> 杂化碳形成, 且有效地释放残余内应力. Al 靶溅射功率为 800 W 时所制备的 Al/a-C:H 薄膜具有结构致密、内应力低、硬度高的特性; 在大气环境中, 该薄膜与 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷球干摩擦时显示出优越的摩擦学性能, 其摩擦系数约为 0.055, 磨损率约为  $2.9 \times 10^{-16} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ .

**关键词:** 磁控溅射; Al/a-C:H; 纳米复合薄膜; 摩擦学性能

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2011)05-0304-07

## Effect of Al Target Power of Magnetron Sputtering on the Structure and Tribological Properties of Diamond-like Carbon Films

ZHOU Sheng-Guo<sup>1,2</sup>, WANG Li-Ping<sup>1\*</sup>, XUE Qun-Ji<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China  
2. Graduate School, Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Aluminum/amorphous hydrogenated carbon (Al/a-C:H) nanocomposite thin films were deposited on silicon p(100) wafer and stainless steel substrates by magnetron sputtering of aluminum in an argon and methane atmosphere with different Al target power. The composition, microstructure, mechanical and tribological properties of composite films were systemically investigated by HR-TEM, XPS, nano-indenter and tribo-tester. The results showed that the Al nanocrystallites could be easily formed in the amorphous carbon matrix, the sp<sup>2</sup> hybrid carbon was increased as the Al was embedded into the films, and Al-doping could relax the internal stress whilst keeping high hardness of as-deposited films. The film containing 4.7% Al prepared by target power of 800 W exhibited a high hardness about 16.5 GPa, a low internal stress about 0.62 GPa, a low friction coefficient about 0.055 and a low wear rate about  $2.9 \times 10^{-16} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$  in the ambient atmosphere.

**Key words:** magnetron sputtering, Al/a-C:H, nanocomposite, tribological property

Received 21 July 2010, revised 2 September 2010, accepted 15 November 2010, available online 28 May 2011.

\* Corresponding author. E-mail: lpwang@licp.cas.cn, Tel: +86-931-4968080.

The project was supported by the National High-Tech Research and Development Program of China (863) (2009AA03Z105) and National Natural Science Foundation of China (50905178).

国家高技术研究发展计划(863)项目(2009AA03Z105)和国家自然科学基金项目(50905178)资助.

类金刚石碳(DLC)膜具有高硬度、低摩擦系数、高耐磨性以及良好的化学稳定性、导热性、电绝缘性、光透过性和生物相容性,作为新型功能薄膜材料在机械耐磨涂层、光学窗口、微电子机械系统(MEMS)以及半导体材料等方面具有广阔的应用前景<sup>[1-5]</sup>。目前,沉积类金刚石薄膜的方法很多,如离子束辅助沉积、磁控溅射、真空阴极电弧沉积、等离子体增强化学气相沉积以及离子注入等多种方法<sup>[6-8]</sup>。已有研究表明:由于制备方法和沉积工艺的不同,薄膜的结构和性能表现出很大差异,其中以等离子体密度和等离子体能量对薄膜的结构和性能影响最大。

然而,高性能类金刚石碳膜的制备却受困于内部较大内应力,其内应力值可高达数个吉帕,不仅降低了其与基体之间的结合强度,同时也限制了薄膜的沉积厚度。大量研究表明:在类金刚石薄膜中掺入一定量的金属可以有效降低薄膜中的内应力,增强薄膜材料的韧性,从而有效地提高类金刚石薄膜的磨损寿命。掺杂的金属元素可分为两大类,一类是能与碳形成强化学键的金属元素,如:Ti、Mo、W等<sup>[9-11]</sup>;另一类是与碳形成弱化学键的金属元素,如:Al、Cu、Au、Ag等<sup>[12-14]</sup>。利用溅射技术或者多种技术相结合的方法,可以将一定量的金属掺入到DLC薄膜中,最终形成金属或金属碳化物纳米晶镶嵌在非晶碳网络中的复合结构,从而有效地提高类金刚石薄膜的力学和摩擦学性能。

本文采用中频磁控溅射技术,以CH<sub>4</sub>为反应气体,通过调整Al靶溅射功率,在单晶硅片p(100)和不锈钢基底上沉积不同Al含量的类金刚石(Al/a-C:H)薄膜,并研究和分析了所制备Al/a-C:H薄膜的结构、机械及摩擦学性能。

## 1 实验部分

采用多功能气相沉积系统,利用中频磁控溅射(中频磁控电源频40 kHz,输出为交流模式),以纯Al(纯度大于99.9%)为阴极溅射靶,工作气体为Ar和CH<sub>4</sub>(纯度99.999%),在p(100)单晶硅和不锈钢基底上沉积含Al类金刚石(Al/a-C:H)薄膜。在沉积之前,分别先将单晶硅片和不锈钢基底用丙酮和乙醇超声清洗25 min,之后置于真空腔体中,并将真空腔体的气压预抽至 $1.0 \times 10^{-3}$  Pa。薄膜的制备条件为:Ar流量为120 sccm,CH<sub>4</sub>流量为40 sccm,薄膜沉积过程中的气压为0.8 Pa,Al靶溅射功率为300~1300 W,基底偏压-1000 V(频率为40 kHz,

占空比为20%),靶与基底的距离为150 mm,沉积时间为90 min。

采用2206型表面轮廓仪测量所制备薄膜的厚度。利用JEOL 2010型高分辨透射电镜(HR-TEM)对所制备薄膜的微观结构进行分析。采用PHI 25702型多功能X射线光电子能谱仪(XPS)测定薄膜中碳元素的电子结合能和薄膜的成份(采用AlK $\alpha$ 激发源,通过能量为29.4 eV,结合能测量精度为 $\pm 0.3$  eV)。采用MTS公司制造的nano-indenter II型纳米压痕仪测定薄膜的硬度,为了减少基体对薄膜硬度测量的影响,选择纳米压入仪压入深度为50 nm,取5个点测量的平均值。在BGS6341型应力测试仪上测定DLC薄膜的内应力。利用UMT-2MT型往复摩擦磨损试验机(CETR, USA)对所制备的Al/a-C:H薄膜的摩擦学性能进行评价,测量参数为:频率为5 Hz,载荷为5 N,振幅为5 mm,温度为 $(25 \pm 3)$  °C,相对湿度RH为 $(40 \pm 3)$ %,对偶球为 $\phi 3$ 的氮化硅球。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Al/a-C:H薄膜的结构

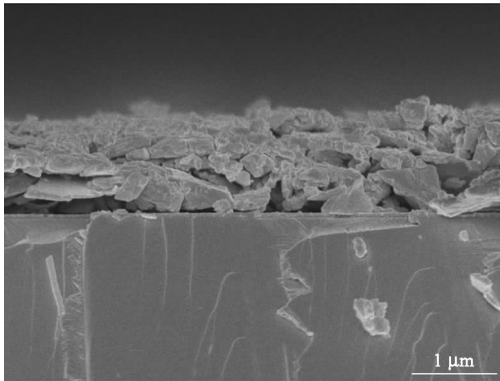
采用表面轮廓仪测量不同Al靶溅射功率所制备Al/a-C:H纳米复合薄膜的厚度,并利用X射线光电子能谱仪(XPS)测定薄膜的成份,结果如表1所示。可以看出,随着Al靶溅射功率的升高,薄膜的沉积速率增大。这主要归因于:一方面,溅射功率的增大会使得沉积气氛中反应气体CH<sub>4</sub>的离解率提高,从而离解出更多的活性粒子,如CH中性基团(CH、CH<sub>2</sub>和CH<sub>3</sub>)、CH离子基团(CH<sup>+</sup>、CH<sub>3</sub><sup>+</sup>和C<sub>2</sub>H<sub>5</sub><sup>+</sup>)以及H原子和H<sup>+</sup>离子,这样就增大了到达基体表面的离子流密度而增大薄膜的沉积速率<sup>[15]</sup>;另一方面,溅射功率的升高直接增大了金属Al的溅射量而增大薄膜的沉积速率,这也是所制备Al/a-C:H纳米复合薄膜中的Al原子百分数随之升高的原因。图1所示为300和800 W时所沉积Al/a-C:H薄膜的横截面电镜照片,可以看出300 W时所沉积的薄膜致密度差,当溅射功率增大至800 W时所沉积的薄膜结构均匀、致密度高。这主要是因为低溅射功率下反应气体CH<sub>4</sub>所离解出来的等离子体能量低,且到达基底表面的离子流密度小,从而使得在低功率下所制备的Al/a-C:H薄膜结构疏松、致密度低。

采用高分辨透射电镜(HR-TEM)对所制备碳膜的微观结构进行分析。图2所示为800 W时所沉

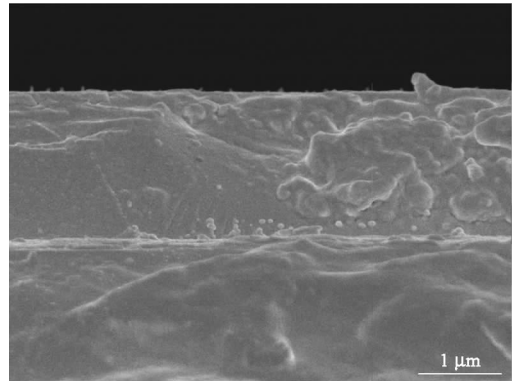
表1 薄膜的溅射功率、厚度及 Al 原子百分数

Table 1 The sputtering power, thickness and composition of as-deposited films

Sample	Sputtering power/W	Film thickness/ $\mu\text{m}$	Depositing rate/ $(\text{nm} \cdot \text{min}^{-1})$	Al content/%
1	300	1.21	13.6	0.7
2	500	1.45	16.1	1.3
3	800	1.79	19.9	4.7
4	1 000	2.03	22.6	7.9
5	1 300	2.15	23.9	15.4



(a) 300 W



(b) 800 W

Fig. 1 Cross section images of Al/a-C:H films deposited at different Al sputtering power

图1 不同 Al 靶溅射功率沉积薄膜的截面电镜照片

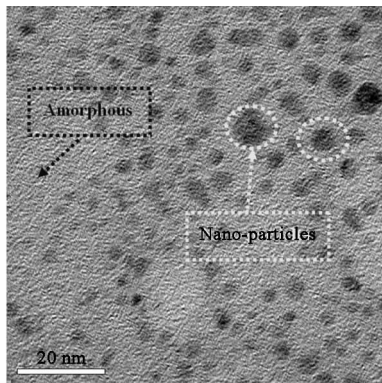


Fig. 2 HR-TEM bright field image of Al/a-C:H film with Al content of 4.7% deposited at 800 W of Al sputtering power

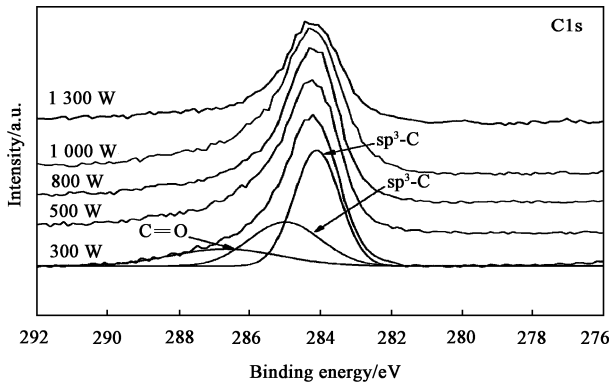
图2 铝原子百分含量为 4.7% 薄膜透射电镜明场照片

积的铝含量为 4.7% 薄膜的透射电镜明场照片,可以看出非晶碳膜中分散着黑色的小颗粒,尺寸约为 3~5 nm,显示所制备的含 Al 类金刚石薄膜具有典型的纳米晶/非晶结构. 本试验所制备的 Al/a-C:H 形成的纳米晶/非晶结构与文献[12, 16]中报道的磁控溅射金属 Cu 和 Ag 靶制备 Cu/a-C:H 和 Ag/a-C:H 所形成的结构相一致. 这主要是因为 Al、Cu、Au 和 Ag 等软质金属不能与碳相结合形成稳定的化学键,即这些软质金属不会与 C 形成碳化物,

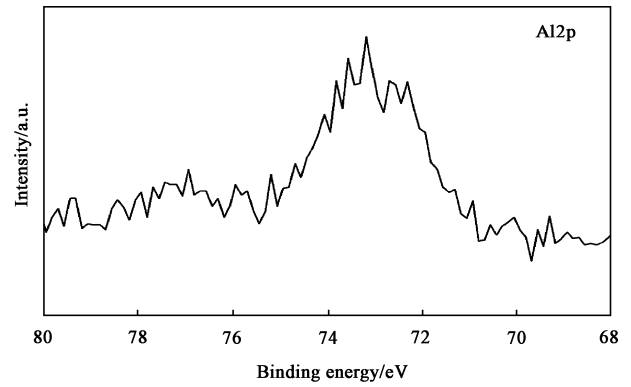
而是以金属纳米晶的形式均匀镶嵌到所制备的非晶碳膜中.

为研究所制备的 Al/a-C:H 薄膜中碳元素的化学状态,我们对薄膜进行了 XPS 测试. 图 3(a) 所示为 XPS 的 C1s 图谱. 由图 3(a) 可以看出:所制备薄膜的 C1s 电子结合能在 284.3 eV 左右,为典型的类金刚石薄膜的结合能. 根据文献[13]报道:铝与碳形成铝碳化物(aluminum carbide)的 C1s 结合能为 281.5 eV, 铝碳氧化物(aluminum oxycarbide)的 C1s 结合能为 282.5 eV. 薄膜 C1s 谱图中没有出现 Al 形成碳化物的结合能状态,且薄膜的 Al2p 电子结合能在 73.0 eV 左右,如图 3(b) 所示. 因此,可直接证明在本试验的制备条件下,Al 与碳没有发生键合形成碳化物,而是以单质或者部分氧化物的形态存在于非晶碳膜中.

影响类金刚石薄膜性能最重要参数为  $\text{sp}^2$  和  $\text{sp}^3$  杂化键的相对含量,我们可以通过 XPS 的 C1s 谱图的高斯拟合计算得出. 利用“计算机曲线拟合技术”将 DLC 薄膜的 C1s 峰拟合成分别由  $\text{sp}^2$  碳原子和  $\text{sp}^3$  碳原子组成的 2 个峰. 在拟合结果中,位于低结合能区的为  $\text{sp}^2$  峰,位于高结合能区的为  $\text{sp}^3$  峰. 通过计算 2 个峰的面积,可以得出薄膜中  $\text{sp}^3/(\text{sp}^3 + \text{sp}^2)$  的比值. 在本文中,我们对制备的 Al/a-



(a) C1s



(b) Al2p

Fig. 3 XPS C1s spectra of Al/a-C:H films deposited at different sputtering power and Al2p spectra corresponding to 800 W

图3 不同 Al 靶溅射功率沉积薄膜的 C1s 和 800 W 时溅射薄膜 Al2p 的 XPS 谱图

C:H 薄膜 XPS 的 C1s 谱进行拟合,拟合为 3 个峰位,分别位于 284.0、284.9 和 286.7 eV,其中位于 284.0 eV 的峰对应于  $sp^2$  碳峰,位于 284.9 eV 的峰对应于  $sp^3$  碳峰,强度非常弱且位于高结合能区域的 286.7 eV 的峰是薄膜表面碳原子和氧原子键合形成 C—O 键或 C=O 键<sup>[17]</sup>,这主要是由于薄膜制备过程中真空室内残留的氧或者暴露于空气中吸附氧与碳原子键合造成的。

通过计算 XPS 的 C1s 谱图拟合峰的面积可以得出所制备 Al/a-C:H 薄膜中  $sp^3/(sp^3+sp^2)$  的比值,如图 4 所示,可以看出随着 Al 靶溅射功率的增

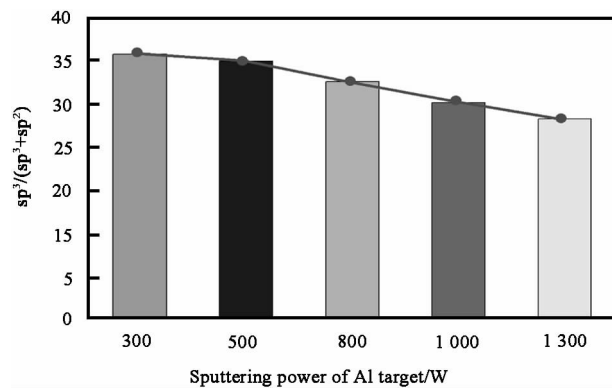


Fig. 4 The  $sp^3/(sp^3+sp^2)$  of Al/a-C:H films deposited at different sputtering power of magnetic Al target

图4 不同 Al 靶

溅射功率沉积薄膜中的  $sp^3/(sp^3+sp^2)$  的比值

大,所制备薄膜中  $sp^3$  杂化碳的含量单调减少。根据文献<sup>[18]</sup>的报道,增大溅射功率有助于薄膜中  $sp^3$  杂化碳的形成,当功率高过一定的数值,高能离子对

薄膜的轰击又会导致部分  $sp^3$  杂化碳转变为  $sp^2$  杂化碳。但是,本试验结果显示溅射功率与薄膜中  $sp^2$  杂化碳的含量成单调递增的变化关系,这表明 Al 掺杂是抑制薄膜中  $sp^3$  杂化碳形成的重要因素。根据前面分析,随着 Al 靶溅射功率增大,薄膜中 Al 含量明显增加,高含量 Al 就会更加抑制  $sp^3$  杂化碳形成而导致薄膜中  $sp^3$  杂化碳含量的减少,这与文献<sup>[12, 16]</sup>中所得到的结果相一致。

## 2.2 Al/a-C:H 薄膜的机械性能

调整溅射功率对 Al/a-C:H 薄膜的机械性能有着明显的影响。图 5 所示为所制备的 Al/a-C:H 薄膜的硬度及杨氏弹性模量值随 Al 靶溅射功率的变化情况,可以看出,Al 靶溅射功率为 300 W 时薄膜的硬度为 13.7 GPa,当功率增加为 800 W 时,薄膜的硬度增加到 16.5 GPa 并达到最大硬度值,之后继续增大溅射功率,所制备薄膜的硬度出现单调下降。DLC 薄膜中  $sp^3$  杂化键对硬度起着重要的贡献作用,由前面 XPS 测试分析结果可以知道,当 Al 靶为 300 W 时所溅射的薄膜中  $sp^3$  杂化碳含量最高,随着溅射功率的增大薄膜中  $sp^3$  杂化键随之降低, $sp^3$  杂化键的减少会导致所制备薄膜的硬度降低。但是,测试结果表明 800 W 时所制备的 Al/a-C:H 薄膜具有最大的硬度值。这主要归因于两个方面:一方面,在低溅射功率下,由于等离子体的能量低以及等离子流密度小,导致所沉积薄膜的致密度较低,当溅射功率从 300 W 增大到 800 W 时所制备的 Al/a-C:H 薄膜致密度增大而使硬度得到提高。当功率继续增大,溅射到薄膜中的 Al 量将大幅增加,由于金属 Al 本身硬度非常低,直接导致了薄膜的硬度降

低;另一方面,800 W 时所制备的 Al/a - C: H 薄膜能获得高硬度,也应得益于适量的金属 Al 纳米晶颗粒均匀镶嵌到非晶碳膜中所起到的增韧作用。

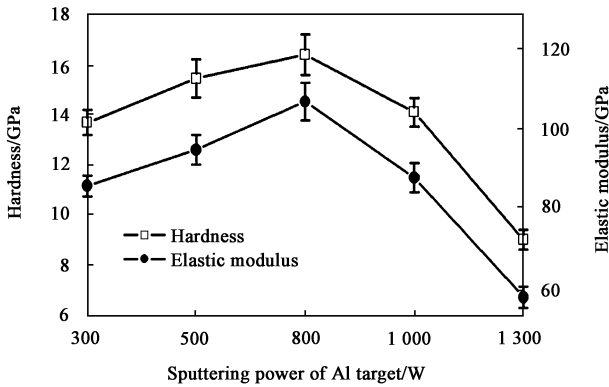


Fig. 5 The hardness and elastic modulus of Al/a - C: H films deposited at different sputtering power of magnetic Al target

图5 不同磁控 Al 靶

溅射功率沉积薄膜的硬度和弹性模量变化曲线

利用应力测试仪对所制备 Al/a - C: H 薄膜的内应力进行了分析,图 6 所示为薄膜内应力随 Al 靶溅射功率的变化关系.可以看出:随着 Al 靶溅射功率的增大,薄膜中的残余内应力呈明显降低趋势.这主要是由于随着功率的增大,溅射到 Al/a - C: H 薄膜中 Al 量的变化所导致的.前面的分析结果说明薄膜中 Al 含量增加使得 sp<sup>3</sup> 杂化键的形成受到抑制,也即促使 sp<sup>2</sup> 杂化键的含量增大.由于薄膜中残余内应力主要来源于 sp<sup>3</sup> 杂化键,因此,sp<sup>3</sup> 杂化键含量减少就使得薄膜的内应力得到有效的降低;另一方面,根据高分辨透视镜的测试结果,本试验所制备的 Al/a - C: H 薄膜具有典型的纳米晶/非晶结

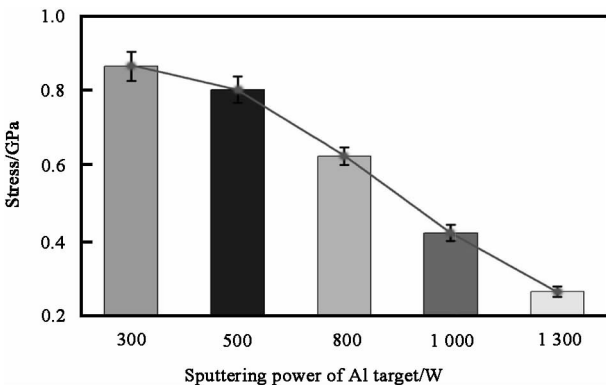


Fig. 6 Internal stress of Al/a - C: H films deposited at different sputtering power of magnetic Al target

图6 不同 Al 靶溅射功率沉积薄膜的内应力变化

构,金属 Al 的纳米晶颗粒镶嵌到非晶碳的网络中,可以有效释放薄膜中的内应力,这也与文献[12 - 14]中报道的金属 Cu 和 Ag 掺入到含氢的 DLC 薄膜中可以有效释放残余内应力的结果相一致.因此,综合以上对所制备 Al/a - C: H 薄膜的硬度和应力分析,可以得出 800 W 时所制备 4.7% Al 含量的含氢非晶碳膜具有高硬度(16.5 GPa)以及较低内应力(0.62 GPa)的良好机械性能。

### 2.3 Al/a - C: H 薄膜的摩擦学性能

Al 靶的溅射功率对所制备薄膜的摩擦系数有着很明显的影 响.图 7 所示为不同溅射功率所制备 Al/a - C: H 薄膜与 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷球对摩时摩擦系数随滑动时间的变化关系.可以看出:800 W 时所制备的 Al/a - C: H 薄膜具有最低摩擦系数,约为 0.055 左

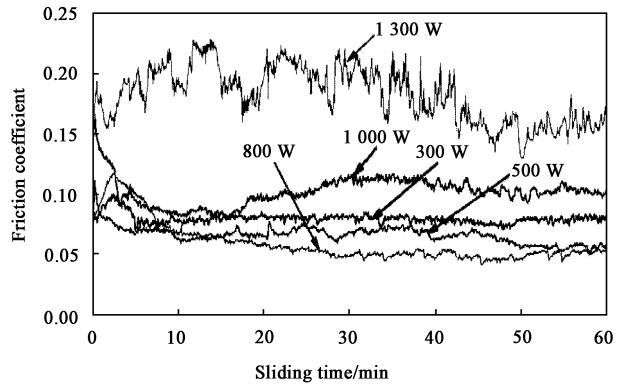


Fig. 7 Friction coefficient versus sliding distance for Al/a - C: H films deposited at different sputtering power of magnetic Al target

图7 不同 Al 靶溅射功率

沉积薄膜的摩擦系数随滑动时间的变化曲线

右;低于 800 W 时所制备的薄膜,其摩擦系数偏高,这主要是薄膜致密度差引起的低硬度所导致的.当功率大于 800 W 后,高 Al 量掺入到薄膜中直接导致了低硬度,从而导致薄膜的摩擦学性能变差;另外,高 Al 含量的薄膜由于软质金属 Al 会在摩擦过程中产生严重的黏着作用也会使得摩擦系数升高,这就是 1300 W 时所制备的高 Al 含量薄膜(15.4%)的摩擦系数非常高且不稳定的重要原因.综上所述,Al 靶溅射功率为 800 W 时所制备 Al/a - C: H 薄膜能获得低摩擦特性主要归因于所制备薄膜本身的致密结构,高硬度以及低内应力。

我们对所制备 Al/a - C: H 薄膜在摩擦试验过程中的磨损率进行了计算,图 8 所示为 Al 靶的不同溅射功率所制备薄膜与 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷球对摩时薄膜磨

损率的变化情况。低功率下所制备 Al/a - C: H 薄膜的磨损率偏大,这主要是因为薄膜本身致密度差所引起的低硬度而使得抗磨性能降低;当溅射功率为 800 W 时,薄膜的磨损率最低,表现出良好的抗磨性能,磨损率仅为  $2.9 \times 10^{-16} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ,这主要归因于薄膜较好的致密性,高硬度以及低内应力特性;当溅射功率大于 800 W 后所制备薄膜的磨损率呈现出明显的增大趋势,溅射功率为 1 300 W 时所制备薄膜的抗磨性能非常差,相比于 800 W 其磨损率约大 1 个数量级,达到  $2.6 \times 10^{-15} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ,这主要是由于高功率时所制备 Al/a - C: H 薄膜中含有大量的铝引起硬度降低,从而导致在摩擦过程中薄膜的承载能力变差。

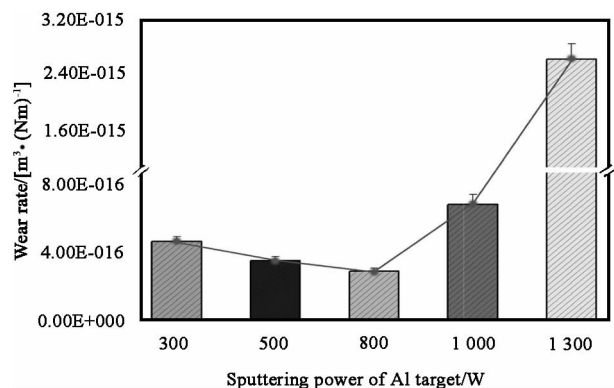


Fig. 8 Wear rate of Al/a - C: H films deposited at different sputtering power of magnetic Al target  
图 8 不同 Al 靶溅射功率沉积薄膜的磨损率变化

### 3 结论

a. 利用中频磁控溅射技术在 p(100) 单晶硅片和不锈钢基底上成功制备出含 Al 的类金刚石 (Al/a - C: H) 薄膜。

b. 所制备 Al/a - C: H 薄膜具有典型纳米晶/非晶结构,金属 Al 纳米晶颗粒镶嵌到非晶碳中抑制了薄膜中  $\text{sp}^3$  杂化碳的形成,且在保持薄膜高硬度条件下能够有效释放残余内应力。

c. Al 靶溅射功率为 800 W 时所制备 4.7% Al 含量的 Al/a - C: H 薄膜具有结构均匀、致密高的特性,且表现出低内应力和高硬度的良好机械性能。在大气环境中,该薄膜与  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷球干摩时显示出优越的摩擦磨损性能,其摩擦系数约为 0.055,磨损率仅为  $2.9 \times 10^{-16} \text{ m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

### 参考文献:

[ 1 ] Baranov A M, Varfolomeev A E, Nefedov A M, *et al.*

Development of DLC film technology for electronic application [J]. *Diamond and Related Materials*, 2000, 9: 649 - 653.

[ 2 ] Robertson J. Diamond - like amorphous carbon [J]. *Materials Science and Engineering*, 2002, R37: 129 - 281.

[ 3 ] A Matthews, S S Eskildsen. Engineering applications for diamond - like carbon [J]. *Diamond and Related Materials*, 1994, 3: 902 - 911.

[ 4 ] J Choi, S Nakao, M Ikeyama, *et al.* Effect of deposition pressure on the properties of DLC coatings deposited by bipolar - type PBII&D [J]. *Surface and Interface Analysis*, 2008, 40: 806 - 809.

[ 5 ] A Grill. Diamond - like carbon coatings as biocompatible materials - an overview [J]. *Diamond and Related Materials*, 2003, 12: 166 - 170.

[ 6 ] Yuan Z H, Xie Z W, Luo G N, *et al.* Study on the process, properties and structure of DLC films deposited by VCAD method [J]. *Journal of Guangdong Non - ferrous Metals*, 1997, 7: 131 - 136 (in Chinese) [袁镇海, 谢致薇, 罗广南, 等. 真空阴极电弧沉积法沉积类金刚石膜的研究 [J]. *广东有色金属学报*, 1997, 7: 131 - 136].

[ 7 ] H Y Chan, B S Teo. Investigation into the influence of direct current (DC) power in the magnetron sputtering process on the copper crystallite size [J]. *Microelectronics Journal*, 2007, 38: 60 - 62.

[ 8 ] Chang H B, Xu T, Li H X, *et al.* Friction and wear behavior of diamond - like carbon film prepared by plasma enhanced chemical vapor deposition [J]. *Tribology*, 2005, 25 (4): 298 - 302 (in Chinese) [常海波, 徐洮, 李红轩, 等. 用等离子体增强化学气相沉积技术制备类金刚石碳薄膜的摩擦磨损性能研究 [J]. *摩擦学学报*, 2005, 25 (4): 298 - 302].

[ 9 ] V Y Kulikovskiy, F Fendrych, L Jastrabik, *et al.* The mechanical and tribological properties of magnetron sputtered Ti - C: H coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1998, 102: 81 - 89.

[ 10 ] Shi B, Meng W J. Intrinsic stresses and mechanical properties of Ti - containing hydrocarbon coatings [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94: 186 - 194.

[ 11 ] C Corbella, M Vives, A Pinyol, *et al.* Preparation of metal (W, Mo, Nb, Ti) containing a - C: H films by reactive magnetron sputtering [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2004, 177 - 178: 409 - 414.

[ 12 ] Y Pauleau, F Thiery, P B Barna, *et al.* Nanostructured copper/hydrogenated amorphous carbon composite films prepared by microwave plasma - assisted deposition process from acetylene - argon gas mixtures [J]. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2004, 6: 140 - 149.

[ 13 ] Zhang S, Bui X L, Zeng X T, *et al.* Towards high adherent and tough a - C coatings [J]. *Thin Solid Films*, 2005, 482: 138 - 144.

[ 14 ] Zhang G A, Wang P, Chen Y M, *et al.* Structure and tribological properties of Al - DLC films prepared by medium frequency magnetron sputtering [J]. *Tribology*, 2008, 28 (2):

118-122 (in Chinese) [张广安, 王鹏, 陈友民, 等. 中频磁控溅射沉积含铝类金刚石碳膜结构及其摩擦磨损性能研究 [J]. 摩擦学学报, 2008, 28 (2): 118-122].

- [15] Li H X, Xu T, Chen J M, *et al.* Effect of RF power on the structure and properties of diamond-like carbon films [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54: 1 885-1 889 (in Chinese) [李红轩, 徐洸, 陈建敏, 等. 射频功率对类金刚石薄膜结构和性能的影响 [J]. 物理学报, 2005, 54: 1 885-1 889].
- [16] F R Marciano, L F Bonetti, R S Pessoa, *et al.* The

improvement of DLC film lifetime using silver nanoparticles for use on space devices [J]. *Diamond and Related Materials*, 2008, 17: 1 674-1 679.

- [17] J Filik, P W May, S R J Pearce, *et al.* XPS and laser Raman analysis of hydrogenated amorphous carbon films [J]. *Diamond and Related Materials*, 2003, 12: 974-978.
- [18] D Beeman, J Silverman, R Lynds, *et al.* Studies of amorphous carbon [J]. *Physics Review B*, 1984, 30: 870-875.

## 订 阅 指 南

本刊为中国科学院兰州化学物理研究所主办、科学出版社出版并向国内外公开发行的覆盖摩擦学各分支学科的综合性学术期刊(双月刊)。本刊为中国科学院文献评价中心《中国科学引文数据库统计源期刊》和科技部中国科学技术信息研究所《中国科技论文统计源期刊》,已连续四版列入《中文核心期刊要目总览》,已被美国《工程索引(EI)》、《金属文摘》、《化学文摘(CA)》、《剑桥科学文摘(CSA)》以及《日本科技文献速报(JST)》等国际知名检索系统收录。

本刊主要报道摩擦学设计、摩擦力学、摩擦化学、摩擦学材料、摩擦学表面工程、特殊工况下的摩擦学、摩擦学测试技术与设备及摩擦学系统工程与应用等重要的基础研究和应用研究新成果。设有研究简报、研究论文、工程应用、专家论坛、评述与进展、回顾等栏目。

读者对象主要是从事摩擦学研究和新材料研制的科研技术人员及高等院校相关专业的教师和研究生以及工业领域的技术人员等。

### 订 阅 方 式

#### 1 邮局订阅

全国各地邮局均可订阅,邮发代号:54-42,2011年定价:30.0元/期,180.0元/年(全年6期)

#### 2 直接汇款至编辑部订阅(可随时订阅)

方式一:邮局寄汇

地 址:兰州市天水中路18号中国科学院兰州化学物理研究所《摩擦学学报》编辑部收。

邮 编:730000

方式二:银行汇款

开 户 行:中国工商银行兰州市开发区支行

户 名:中国科学院兰州化学物理研究所

帐 号:2703000909026405762(银行汇款请注明“《摩擦学学报》编辑部”)