

铜上采用过渡层沉积类金刚石薄膜的研究

王 静¹⁾ 刘贵昌¹⁾ 汲大鹏¹⁾ 徐 军²⁾ 邓新禄²⁾

1) 大连理工大学化工学院, 大连 116012)

2) 大连理工大学三束改性国家重点实验室, 大连 116012)

(2005 年 10 月 30 日收到, 2006 年 1 月 13 日收到修改稿)

将等离子增强非平衡磁控溅射物理气相沉积 (PEUMS-PVD) 和电子回旋共振-微波等离子体增强化学气相沉积 (MW-ECRPECVD) 技术相结合, 通过制备不同的过渡层, 在铜基上成功地制备了类金刚石膜. 拉曼光谱分析表明, 所制备的碳膜具有典型的类金刚石结构特征. 检测结果表明, 随着沉积偏压的增大, D 峰和 G 峰均向高波数漂移, I_D/I_G 值增大, 表面粗糙度减小, 而平均硬度和弹性模量呈先增大后减小的趋势.

关键词: 铜基体, 类金刚石膜, 过渡层, 拉曼光谱

PACC: 8115H, 3320F, 0779

1. 引 言

类金刚石薄膜 (diamond-like carbon, DLC) 是一种性能与金刚石薄膜极为相似但往往含有大量 sp^2 杂化键的非晶碳膜. 类金刚石膜较之金刚石薄膜具备许多优异的性能, 包括高耐磨性、低摩擦系数、热稳定性、红外透光性、高电阻、低介电常数、高疏水性以及生物相容性, 是机械、电子、汽车、航空、医学、光学等领域的理想材料^[1-4], 因此引起了人们极大兴趣.

铜是工业中常见的一种金属, 具有优良的导热导电性、耐腐蚀性和美观的色泽, 广泛地用于电子材料、包装材料、仿金材料、仿古饰品、仿古工艺品、铜字、铜标牌、铜币和大型雕塑等^[5]. 铜是理想的导热材料, 而类金刚石的导热效率是铜的 6 倍, 在铜上沉积一层类金刚石薄膜, 不仅可以提高散热效率, 而且可以利用类金刚石薄膜的化学惰性^[6]. 未来的计算机将使用更高功率的芯片, 冷却系统需要完全采用铜, 还需要采用电阻率极高, 但又不影响系统冷却性能的薄膜, DLC 是最佳选择之一. 具有 DLC-a-Si:H-Ni-Cu 结构的单插片和组装冷却系统均已试验成功. 除获得理想的绝缘和冷却性能外, 还因 DLC 的抗划伤性能提高了插件的寿命^[7].

化学气相沉积法在铜基片上生长附着较好的类金刚石薄膜有较大的困难. 首先铜不是溶碳材料, 其次类金刚石薄膜和铜基体之间不可能形成金属碳化物中介层, 使得类金刚石薄膜和铜基体的结合力很

小. 另外, 类金刚石薄膜和铜基体的热膨胀系数相差较大. 因此, 在通常的沉积条件下, 由于较大的热膨胀系数差引起的较大的热应力与较小的附着力的不平衡, 将使得沉积结束后的冷却过程中发生类金刚石薄膜从铜基片上剥离开来, 碎裂成小块的现象. 鉴于此, 增强膜基间的结合力是在铜基片上沉积结合良好的类金刚石薄膜的关键^[8].

本文采用将等离子增强非平衡磁控溅射物理气相沉积 (PEUMS-PVD) 和电子回旋共振-微波等离子体增强化学气相沉积 (MW-ECRPECVD) 技术相结合的方法, 通过不同的过渡层, 成功的在铜基体上制备了类金刚石薄膜, 并对薄膜的微观结构, 表面形貌, 硬度及化学稳定性进行了研究.

2. 实验方法

薄膜的制备是在双放电腔微波 ECR 全方位离子注入系统中进行的, 该系统由大连理工大学三束材料改性国家重点实验室自行研制, 设备见图 1.

实验采用工业纯铜 (15mm × 15mm) 作为基体材料, 将样品用砂纸逐级水磨, 然后表面抛光到镜面效果, 用丙酮、酒精进行洗涤, 去除表面的油污、浮尘等杂质, 洗涤完立即吹干, 放入真空室. 沉积前用氩离子对基片进行溅射清洗 10min, 离子的轰击和溅射作用能去除基片表面的氧化层和吸附的气体杂质, 提高基片表面活性, 这样有利于薄膜生长和增强膜基结合力, 与此同时通过离子对表面的轰击, 可以加

热样品表面,有助于薄膜的生长以及降低生长应力。甲烷(CH_4)和氩气(Ar)作为反应气体,钛靶和硅靶作为溅射源来制备过渡层。衬底真空 $3 \times 10^{-5} \text{ Pa}$,微波功率 850W。

基体的结合力差,制备后的薄膜在短暂时间内会迅速剥离金属表面,导致制备薄膜失败。为了提高 CVD 制备的类金刚石膜与铜基体界面的结合力,在沉积类金刚石膜之前,需要预先沉积一层过渡层。本实验尝试分别采用两种不同的过渡层来沉积类金刚石薄膜。

实验 1 先用钛靶等离子增强非平衡磁控溅射物理气相沉积(PEUMS-PVD)一层钛,实验参数为氩气流量 30sccm,靶偏压 200V,靶功率 300W,溅射时间 90min;再磁控溅射加化学气相沉积(PEUMS-PVD+PECVD)制备一层含钛类金刚石,最后再化学气相沉积(CVD)制备类金刚石薄膜。PEUMS-PVD+PECVD 与 CVD 的具体的实验参数如表 1 所示。

实验 2 先用硅靶等离子增强非平衡磁控溅射物理气相沉积(PEUMS-PVD)一层硅,实验参数为氩气流量 30sccm,靶偏压 100V,靶功率 350W,溅射时间 30min;再磁控溅射加化学气相沉积(PEUMS-PVD+PECVD)制备氮化硅过渡层,实验参数为氩气与氮气流量比 $R=5$,基片偏压 100V,靶功率 350W,溅射沉积时间 60min,最后再化学气相沉积(CVD)制

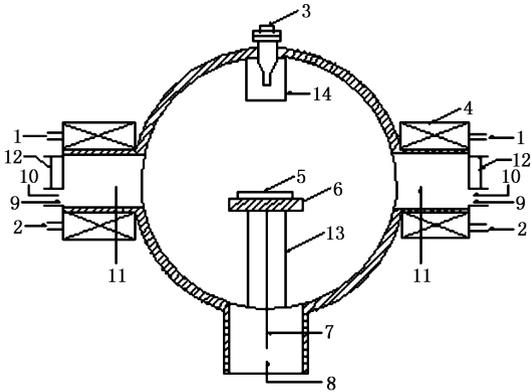


图 1 反应设备简图 1. 冷却水出口 2. 冷却水入口 3. 真空计 4. 电磁线圈 5. 基片 6. 样品台 7. 负偏压 8. 真空系统 9. 气体入口;10. 微波入口;11. 谐振腔;12. 窗口;13. 样品台支架;14. 磁控溅射靶

由于在铜基体上直接沉积类金刚石膜,薄膜和

表 1 制备 TiC 过渡层和沉积类金刚石薄膜的实验参数

编号	PEUMS-PVD+PECVD				CVD		
	Ar/CH ₄ 流量比 R	基片偏压/V	靶功率/W	时间/min	Ar/CH ₄ 流量比 R	沉积偏压/V	时间/min
1 [#]	3	200	200	30	0.33	100	30
2 [#]	3	200	200	10	0.33	100	30
	1			10			
	0.33			10			
3 [#]	3	200	200	10	0.33	200	30
	1			10			
	0.33			10			
4 [#]	3	200	200	10	0.33	50	30
	1			10			
	0.33			10			
	0.25			10			
5 [#]	3	200	200	10	0.33	100	30
	1			10			
	0.33			10			
	0.25			10			
6 [#]	3	200	200	10	0.33	200	30
	1			10			
	0.33			10			
	0.25			10			

备类金刚石薄膜. CVD 的实验参数如表 2 所示.

表 2 以 $\text{Si}/\text{Si}_x\text{N}_y$ 作过渡层时沉积类金刚石薄膜的实验参数

编号	Ar/CH ₄ 流量比 R	沉积偏压/V	时间/min
7 [#]	0.25	50	60
8 [#]	0.25	100	60
9 [#]	0.25	200	60

3. 实验结果及分析

本实验采用型号为 RENISHAW INVIA 的 Raman 谱仪对薄膜进行结构分析, 该谱仪的激发波长为 632.8nm (固体激光器), 功率为 35mW, 光谱扫描范围在 800—1800 cm^{-1} 之间, 扫描步长为 2 cm^{-1} . AFM 可以得到物质表面的形貌, 作为一种表面成像技术, AFM 是 STM (扫描隧道显微镜) 的主要拓展, 解决了 STM 不能观测非导电样品的缺点, 使导电和非导电材料均能成像. AFM 的纵向分辨率可达到原子数量级, 其分辨率要比电子显微镜高 1000 倍, 因此特别适合非晶薄膜表面形貌的表征. 本实验采用 Nanoscope III Scanning Probe Microscope 型原子力显微镜对试样进行微观形貌分析. 采用 MTS Nanoindenter XP 纳米压痕仪对薄膜的硬度和模量进行测试. 选用 XP 压痕组件, 压针为金刚石 Berkovichtip, 载荷量程为 500mN, 分辨力 50nN, 行程为 2nm, 分辨力 0.01nm.

3.1. 拉曼光谱

由于拉曼光谱对样品的无破坏性, 已被广泛用于金刚石、石墨、类金刚石等的结构表征. 这主要是因为石墨和其他具有 sp^2 碳结构无序碳的 Raman 散射效应非常明显, 并且金刚石及其相关材料也具有较弱的容易被区分的 Raman 峰. 对于金刚石, 拉曼特征峰出现在 1332 cm^{-1} 处; 对于单晶石墨, 拉曼特征峰出现在 1575 cm^{-1} 处; 而对于类金刚石, 其拉曼特征峰为 1550 cm^{-1} 处的 G 峰以及在 1350 cm^{-1} 处的 D 峰, G 峰对应于与结晶石墨的 E_{2g} 振动模式相联系的 G 线, D 峰大致对应于与石墨无序振动模式相联系的 D 线^[9,10]. 目前的研究表明, DLC 膜 G 峰的峰位与 sp^2 团簇的尺寸有关, G 峰的半高宽与 sp^2 团簇的尺寸、 sp^2 团簇的尺寸分布以及膜中的内应力有关, D 峰和 G 峰的积分强度比 I_D/I_G 与 sp^2 团簇的数量和尺寸有关, 反映着 sp^2 键和 sp^3 键的比值

变化^[11].

图 2 是 1[#] 样品表面类金刚石薄膜的拉曼光谱图. 从图中可以看出, 在 1100 cm^{-1} 和 1800 cm^{-1} 之间拉曼峰明显是由两个展宽峰组成, 是典型的类金刚石膜结构, 用高斯拟和法将其分为两个峰. 表 3 给出的是该样品的拉曼谱峰解谱结果.

表 3 1[#] 样品 Raman 光谱解谱结果

样品	峰位/ cm^{-1}		半峰宽/ cm^{-1}		积分强度比 I_D/I_G
	D	G	D	G	
1 [#]	1344.50	1537.62	283.01	207.10	1.12

在 1[#] 样品的基础上, 我们在制备 TiC 过渡层的时候, 固定钛靶的溅射功率, 逐渐减小氩气与甲烷的流量比, 使碳逐渐在过渡层中富积, 形成梯度过渡, 从而减小过渡层与外层类金刚石膜的差异, 提高它们之间的结合力.

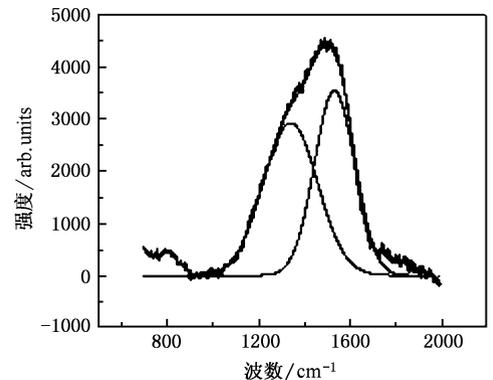


图 2 1[#] 样品的拉曼光谱图

2[#]—6[#] 样品就是该变氩气与甲烷流量比的条件下制备的, 图 3—图 7 分别是它们的拉曼光谱图, 表 4 给出的是 2[#]、3[#] 样品的拉曼谱峰解谱结果, 表 5 给出的是 4[#]—6[#] 样品的拉曼谱峰解谱结果.

表 4 2[#]、3[#] 样品 Raman 光谱解谱结果

样品	峰位/ cm^{-1}		半峰宽/ cm^{-1}		积分强度比 I_D/I_G
	D	G	D	G	
2 [#]	1376.86	1572.44	271.63	161.96	1.63
3 [#]	1393.97	1577.07	282.35	128.60	2.40

表 5 4[#]—6[#] 样品 Raman 光谱解谱结果

样品	峰位/ cm^{-1}		半峰宽/ cm^{-1}		积分强度比 I_D/I_G
	D	G	D	G	
4 [#]	1380.22	1575.07	314.05	137.06	2.45
5 [#]	1387.33	1575.74	334.57	136.61	3.02
6 [#]	1386.22	1575.87	363.26	133.03	3.60

由表 4 和表 5 给出的数据可以看出,随着沉积偏压的增大,D 峰和 G 峰均向高波数漂移,D 峰的半峰宽增大而 G 峰的半峰宽减小, I_D/I_G 值增大.说明随着沉积偏压的增大,薄膜中的 sp^3 键的含量减少, sp^2 键的含量增加^[12].而且薄膜中的石墨团簇的尺寸变小,石墨相的含量增加.

随着偏压的增大,活性氢和氦离子的轰击能量也随之增强,离子轰击能量的增大会促使部分亚稳 sp^3 键向 sp^2 键转化,使得 I_D/I_G 值增大;同时离子的轰击会导致沉积系统温度升高,也会促使 sp^3 键向 sp^2 键转化,从而使得 I_D/I_G 值增大;温度升高也会促使膜中的氢逸出,从而使氢含量降低,薄膜中存在的氢有利于 sp^3 键的稳定,氢含量的降低进一步减少了 sp^3 键的含量^[13].

另外也有研究发现,Ti 易与无定型碳网络中的 C 原子结合形成 TiC. TiC 的形成减少了无定型碳网络中配位 C 原子.配位原子数量的减少以及局域碳原子密度的降低导致了无定型碳网络中 sp^3 键向 sp^2 键弛豫,从而使薄膜中 sp^2 键含量增加.该结果与上述的拉曼光谱分析结果相符合,过渡层的 Ti 离子引起了无定型 DLC 膜的石墨化,增加了 sp^2 键的含量^[14-16].

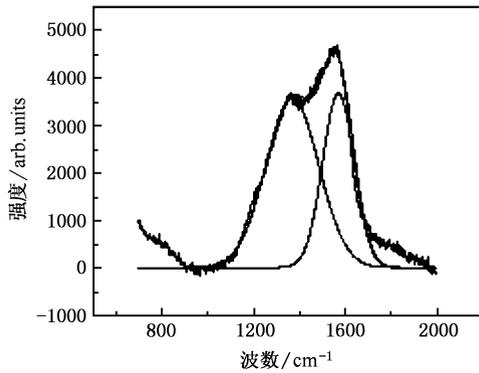


图 3 2# 样品的拉曼光谱图

7#—9# 样品是通过在铜上制备氮化硅(Si/Si_xN_y)过渡层沉积类金刚石膜的.图 8 至图 10 分别是它们的拉曼光谱图,表 6 给出的是拉曼谱峰的解谱结果.从解谱结果可以看出,随着沉积偏压增大,D 峰和 G 峰也是均向高波数漂移的,拉曼峰的半峰宽减小, sp^2 键含量增大, sp^3 键含量减少, I_D/I_G 值增大.该结果与 2#—6# 样品的拉曼光谱分析结果也是相符合.

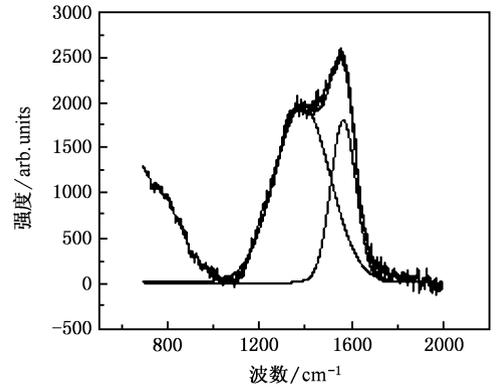


图 4 3# 样品的拉曼光谱图

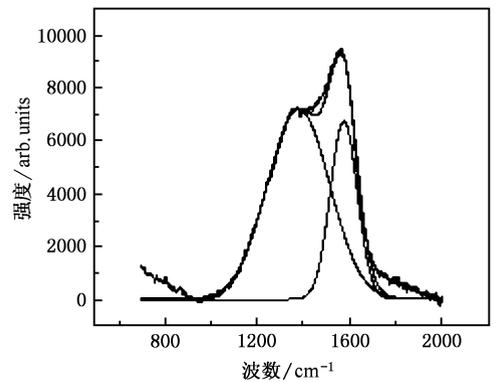


图 5 4# 样品的拉曼光谱图

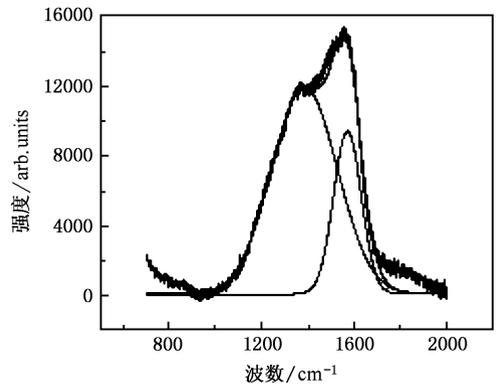


图 6 5# 样品的拉曼光谱图

表 6 7#—9# 样品 Raman 光谱解谱结果

样品	峰位/ cm^{-1}		半峰宽/ cm^{-1}		积分强度比 I_D/I_G
	D	G	D	G	
7#	1310.99	1509.10	295.20	201.45	0.65
8#	1311.39	1509.23	294.26	201.20	0.76
9#	1344.43	1523.87	290.21	185.60	0.94

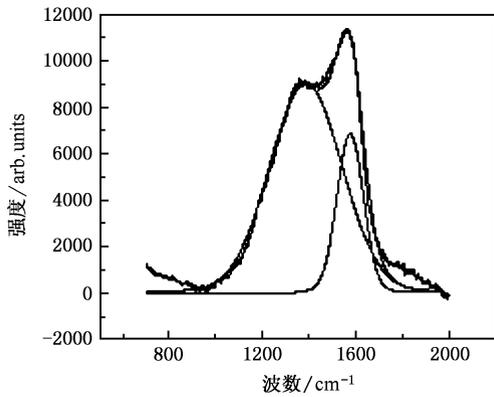


图 7 6# 样品的拉曼光谱图

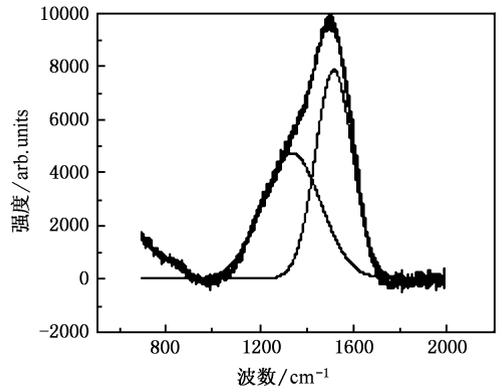


图 10 9# 样品的拉曼光谱图

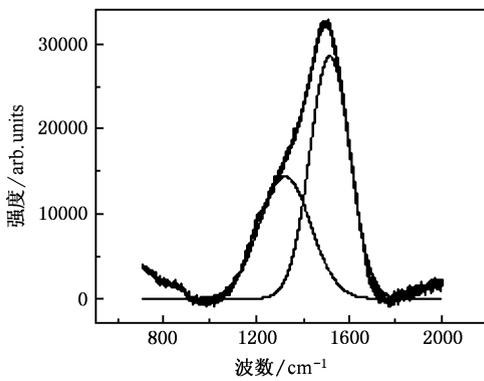


图 8 7# 样品的拉曼光谱图

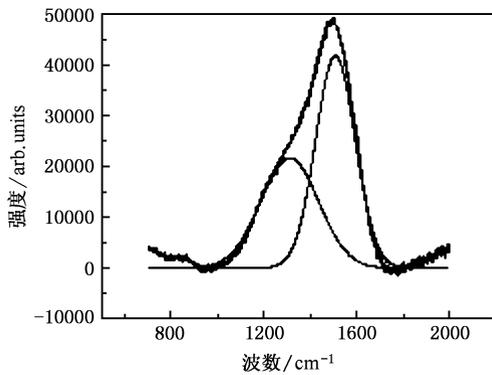


图 9 8# 样品的拉曼光谱图

结构上的空间平均值. 样品的表面平滑 均方根粗糙度(RMS) < 0.3nm.

5# 6# 样品上制备的类金刚石薄膜表面均方根粗糙度 RMS 分别为 0.36nm 和 0.246nm. 从图像和粗糙度数值的变化可以看出, 随着沉积偏压的增大, 薄膜的表面粗糙度降低. 主要是因为, 偏压较低时, 活性氢和氩离子的能量比较低, 对膜的刻蚀和溅射作用比较小, 因此得到的膜的有机相比较多, 膜的表面也比较疏松粗糙, 偏压升高以后, 离子的轰击能量增强, 促进成膜过程中表面原子的扩散和对表面疏松结构的刻蚀, 使得到的膜表面光滑致密.

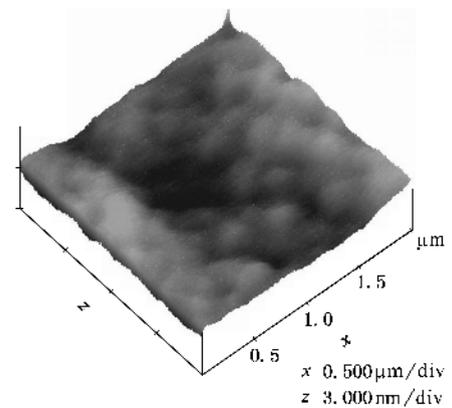


图 11 沉积偏压为 100V 时以 Ti/TiC 为过渡层制备的 DLC 膜的 AFM 图像

3.2. 薄膜的表面形貌

图 11, 图 12 分别是 5# 6# 样品表面在不同的沉积偏压下沉积的类金刚石膜的 AFM 图像. 通常膜的表面均方根粗糙度 σ 由以下的公式决定:

$$\sigma = Z(x, y)^2)^{1/2}, \quad (1)$$

$$Z(x, y) = h(x, y) - h(x, y). \quad (2)$$

这里 $h(x, y)$ 是高度函数, $h(x, y)$ 是在参考平面

图 13, 图 14 分别是 8# 9# 样品表面沉积的类金刚石膜的 AFM 图像, 其相应表面均方根粗糙度 RMS 分别为 0.201nm 和 0.184nm. 同样, 从图像和粗糙度数值的结果可以看出, 随着沉积偏压增大, DLC 膜的表面粗糙度仍然是降低的, 且比 5# 6# 样品的表面更加平整. 原因除了随着沉积偏压的增大, 加快了薄膜表面原子和基团的扩散, 使薄膜平整外, 硅原子掺

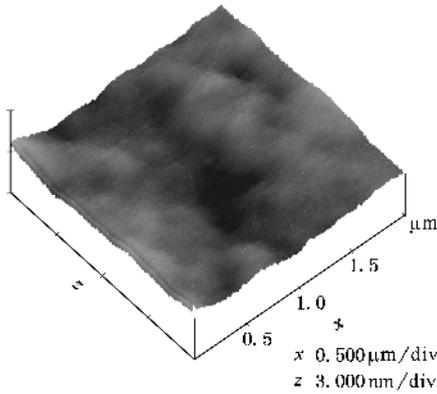


图 12 沉积偏压为 200V 时以 Ti/TiC 为过渡层制备的 DLC 膜的 AFM 图像

入类金刚石薄膜内部,降低了内应力,减弱了薄膜的畸变,也导致薄膜的表面变得更加平滑^[17]。

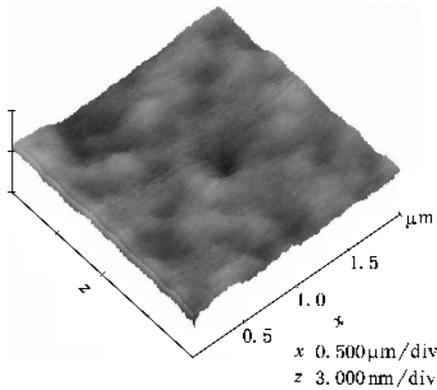


图 13 沉积偏压为 100V 时以 Si/Si_xN_y 为过渡层制备的 DLC 膜的 AFM 图像

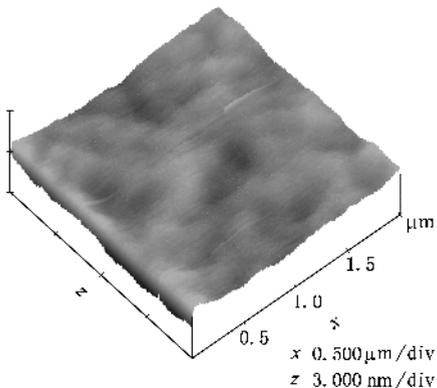


图 14 沉积偏压为 200V 时以 Si/Si_xN_y 为过渡层制备的 DLC 膜的 AFM 图像

3.3. 薄膜的硬度

纳米压痕仪(nanoindentation)是一类先进的材料表面力学性能测试仪器.该类仪器具有高分辨率的致动器和传感器,可以控制和监测压头在材料中的压入和退出,能提供高分辨率连续载荷和位移的测量.可直接从载荷-位移曲线中实时获得接触面积,大大减小误差.能完成多种力学性能的测试,最直接测量的是硬度(H)和弹性模量(E).

表 7 给出的是不同工艺制备的样品在不同沉积偏压下的平均硬度和平均弹性模量.从表 7 的数据可以看出,随着沉积偏压的增大,样品的平均硬度和平均弹性模量都是先增大后减小的.随着沉积偏压的增大,离子轰击的能量增大,使制备的膜更加均匀致密,硬度增大.但是随着偏压的增大,薄膜中的 sp^3 键的含量将随之减少,硬度呈下降的趋势.所以整体上呈现出硬度和弹性模量随偏压的增大出现先增大后减小的趋势.

表 7 不同工艺条件下制备的类金刚石膜的硬度和弹性模量

样品	沉积偏压/V	平均硬度/GPa	平均弹性模量/GPa
4 [#]	50	11.596	243.08
5 [#]	100	12.195	294.583
6 [#]	200	10.697	209.475
7 [#]	50	13.728	128.778
8 [#]	100	17.827	134.264
9 [#]	200	12.858	100.463

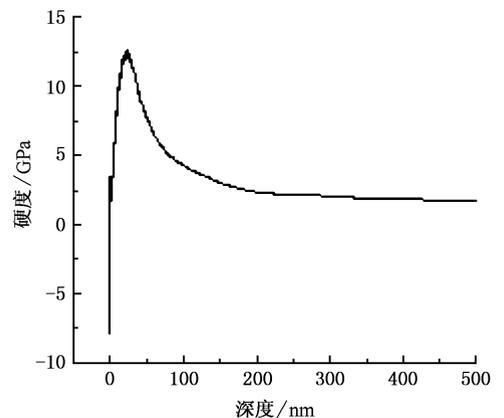


图 15 5[#] 样品硬度随压入深度变化曲线

图 15,图 16 分别是 5[#] 样品的硬度和弹性模量随压入深度变化的曲线.图 17,图 18 是 8[#] 样品的硬度和弹性模量随压入深度变化的曲线.根据薄膜硬

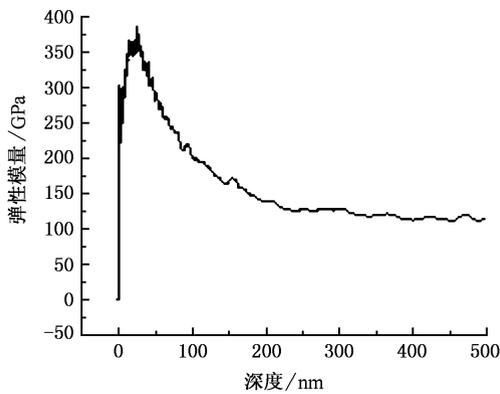


图 16 5# 样品弹性模量随压入深度变化曲线

度测量的一般规律,最大载荷时的压入深度 h 约为 $1/10$ — $1/7$ 薄膜厚度时,基材对膜力学性能测试结果的影响可忽略^[18].本次测试压入深度为 500nm,而薄膜厚度约为 50nm,压头已经深入基体,故硬度和弹性模量都随压入深度出现先增大后减小,最后趋于平缓的趋势.由于压入的深度远远大于薄膜厚度,所以最后输出的平均硬度和弹性模量值是薄膜与基体的复合强度.

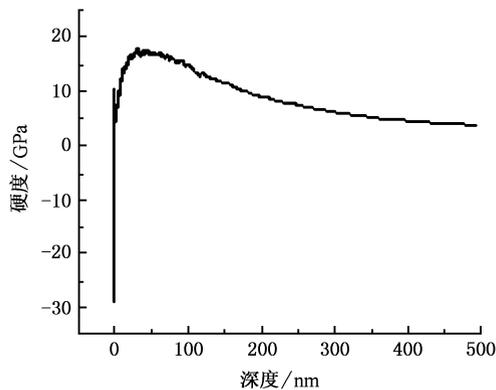


图 17 8# 样品硬度随压入深度变化曲线

3.4. 薄膜的化学稳定性

将样品放在有机溶剂丙酮、酒精中浸泡 72h,膜层没有任何变化.用 1ml/L 的盐酸溶液和氢氧化钠

溶液对样品进行点滴实验,膜层没有出现腐蚀、脱落的现象.这说明两种工艺所制备的类金刚石膜均有良好的化学稳定性,可以对铜基体起到良好的保护作用.

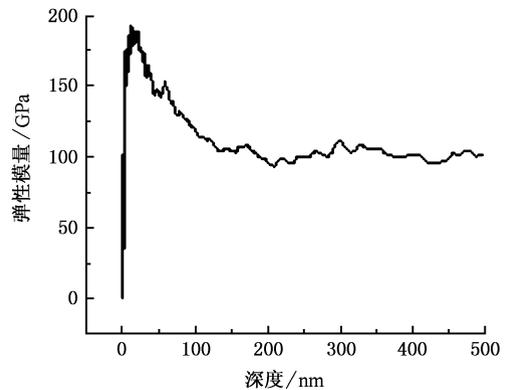


图 18 8# 样品弹性模量随压入深度变化曲线

4. 结 论

1. 采用等离子增强非平衡磁控溅射物理气相沉积(PEUMS-PVD)和电子回旋共振-微波等离子体增强化学气相沉积(MW-ECRPECVD)技术相结合,通过制备 Ti/TiC, Si/Si_xN_y 过渡层,在铜基体上可以成功地沉积类金刚石膜.

2. 拉曼光谱、原子力显微镜结果表明,随着沉积偏压的增大,拉曼峰均向高波数漂移, I_D/I_G 值增大,薄膜中的 sp^3 键的含量减少, sp^2 键的含量增加,表面的粗糙度降低.纳米压痕测试结果表明,薄膜的硬度和弹性模量是随偏压的增大,先增大而后减小的.综合上述两种效果,可以认为在本次实验中, 100V 是最佳沉积偏压.

3. 实验制备的类金刚石膜具有良好的化学稳定性.

4. 以 Ti/TiC 为过渡层沉积的类金刚石薄膜与以 Si/Si_xN_y 为过渡层沉积的类金刚石薄膜相比较,以 Si/Si_xN_y 为过渡层的类金刚石薄膜更为均匀稳定,硬度更大.

[1] Yuan Z H, Deng Q S, Luo G N et al 1994 *Material Science & Engineering* 12 35 (in Chinese) [袁镇海、邓其森、罗广南等 1994 材料科学与工程 12 35]

[2] Cheng Y H, Wu Y P, Chen J G et al 1997 *Journal of the Chinese Ceramic Society* 25 452 (in Chinese) [程宇航、吴一平、陈建国等 1997 硅酸盐学报 25 452]

- [3] Kosterki R ,Tomas King ,Alexander H *et al* 2001 *Thin Solid Films* **396** 30
- [4] Zhang Q ,Yoon S F ,Zhgoon S *et al* 2001 *Thin Solid Films* **396** 276
- [5] Li F ,Liu J ,Chen H 2004 *Electroplating & Finishing* **24** 15 (in Chinese)[李 锋、刘 俊、陈 颢 2004 电镀与涂饰 **24** 15]
- [6] Liang F ,Yan X J 1999 *Acta . Phys . Sin .* **48** 1095 (in Chinese) [梁 风、严学俭 1999 物理学报 **48** 1095]
- [7] Narayan J ,Godbole V P ,Matera G *et al* 1992 *J. Appl. Phys.* **71** 966
- [8] Ma Z B ,Wu Q C ,Wang J H *et al* 2000 *Journal of Inorganic Materials* **15** 943 (in Chinese)[马志斌、邬钦崇、汪建华等 2000 无机材料学报 **15** 943]
- [9] Robertson J 1986 *Adv. In Phys.* **35** 4317
- [10] Qi J , Luo J B , Wen S Z *et al* 2000 *Surface and Coatings Technology* **128-129** 324
- [11] Reinke S ,Kulisch W 1997 *Surface and Coatings Technology* **97** 23
- [12] Robertson J 2002 *Materials Science & Engineering R* **37** 129
- [13] Chang H B ,Xu T ,Zhang Z J 2005 *Chemical Research* **16** 1 (in Chinese)[常海波、徐 洮、张治军 2005 化学研究 **16** 1]
- [14] Voevodin A A ,Capano M A ,Laube S J P *et al* 1997 *Thin Solid Films* **298** 107
- [15] Baba K ,Hatada R 2002 *Surface and Coatings Technology* **158-159** 373
- [16] Wei Q , Narayan R J , Narayan J 1998 *Materials Science and Engineering B* **53** 262
- [17] Ban M ,Hasegawa T 2002 *Surface and Coatings Technology* **162** 1
- [18] Moody N R ,Strojny A ,Nedlin D L *et al* 1999 *Journal of Materials Research* **14** 2306

Diamond-like carbon (DLC) films deposited on copper substrate through preparation of intermediate layers

Wang Jing¹⁾ Liu Gui-Chang¹⁾ Ji Da-Peng¹⁾ Xu Jun²⁾ Deng Xin-Lu²⁾

1 *✉ School of Chemical Engineering , Dalian University of Technology , Dalian 116012 , China*

2 *✉ State Key Laboratory of Surface Modification by Laser , Ion , and Electronic Beams , Dalian University of Technology , Dalian 116012 , China*

(Received 30 October 2005 ; revised manuscript received 13 January 2006)

Abstract

Diamond-like carbon (DLC) films were prepared on copper substrate through preparation of intermediate layers by combined plasma enhanced sputtering physical vapor deposition and microwave electron cyclotron resonance plasma enhanced chemical vapor deposition techniques. Raman spectroscopy indicated that the films had amorphous structure and typical characteristic of DLC film. With the increase of deposition bias voltage , D and G band both shifted to high wave-number and I_D/I_G increased gradually. The morphology was characterized by atomic force microscopy (AFM) and the results indicated that the films were dense and homogeneous , and the roughness of the films decreased with the increase of the deposition bias voltage. Hardness and modulus of DLC were measured by the nanoindentation.

Keywords : copper substrate , diamond-like carbon , intermediate layers , Raman spectroscopy

PACC : 8115H , 3320F , 0779