

磁场辅助激光生长类金刚石膜的微结构及光学性能*

陆益敏 汪雨洁 徐曼曼† 王海 奚琳

(安徽工程大学机械工程学院, 芜湖 241000)

(2024 年 1 月 20 日收到; 2024 年 3 月 7 日收到修改稿)

在脉冲激光沉积技术中引入非均匀磁场, 探索磁场约束激光等离子体条件下生长类金刚石膜的特性, 为进一步提高类金刚石膜中 sp^3 键含量、增强微结构调控提供理论和实验基础. 计算了磁场的磁感应强度及其磁力线分布, 仿真了碳离子在磁场约束下的飞行轨迹, 显示出磁场限制了碳离子的自由膨胀, 使其螺旋前进并向永磁体中心区域聚集. 膜层表面干涉和椭圆测量的拟合参数显示, 磁场的磁感应强度越高, 激光生长类金刚石膜的厚度及光学性能越不均匀. 拉曼光谱及其拟合结果显示, 磁场有利于提高碳网络结构的局部压力、提高膜层中的 sp^3 键含量.

关键词: 类金刚石膜, 脉冲激光沉积, 磁约束等离子体, 微结构

PACS: 81.05.uj, 81.15.-z, 52.38.-r, 52.77.Dq

DOI: 10.7498/aps.73.20240145

1 引言

脉冲激光沉积 (pulsed laser deposition, PLD) 技术在薄膜制备领域的应用已经成为研究热点, 逐步成为优秀的薄膜制备技术之一^[1], 磁场约束激光等离子体是其典型的发展趋势^[2]. 早期, 在 PLD 中引入磁场的目的是为了去除激光等离子体中的大颗粒^[3,4], 与过滤阴极真空电弧沉积技术的目的相同; 但后期逐步转变为提升功能薄膜的其他性能, 涉及薄膜种类及应用领域广泛, 包括磁学、电学、光学、机械学及交叉领域. 该方面研究以 Zhang 等^[5,6]和 Wakiya 等^[7,8]为典型代表. 作为非接触驱动力, 磁场可以调控激光等离子体的空间膨胀特征^[9-11], 诱导动能粒子在基材 (浅) 表面的有序扩散、成键^[12-14], 引发膜层一系列有趣、实用的改变, 如微结构、微表面、晶态、膜层密度、厚度分布等各种微观和宏

观变化. 国内外研究表明, 磁场能够改变 PLD (采用不同激光) 制备 PbI_2 膜、 Fe_2O_3 膜、 $Mn_xFe_{3-x}O_4$ 膜、Co-ZnS 膜和 Ag 纳米线等功能材料的晶态结构, 改善光学、磁学、电学等性能^[15-18], 甚至可以通过改变磁感应强度来调控磁阻 $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$ 纳米棒的尺寸^[5,19].

在 PLD 沉积类金刚石 (diamond-like carbon, DLC) 膜的研究过程中, 磁场约束条件下激光等离子体的光谱分析可以帮助解释磁场辅助 PLD 中的一些现象. 与无磁场环境中的膨胀过程相比, 磁场 (磁感应强度 130 mT) 使得近红外 Nd:YAG 激光 (波长 1064 nm、脉宽 8 ns、脉冲能量 100 mJ) 产生的碳等离子体密度更高、持续时间更长^[20]; 在磁感应强度 15—30 mT 的磁场中, 纳秒激光 (1—8 J) 碳等离子体的离子脉冲主要参数 (脉冲总电荷量、峰值流强) 均呈现先上升后饱和的趋势, 表明磁场使得碳离子的含量和动能均有提高^[21]; 采用

* 国家自然科学基金 (批准号: 12205004)、安徽省高等学校科学研究重点项目 (批准号: 2022AH050982) 和安徽工程大学引进人才科研启动基金 (批准号: 2022YQQ001) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: manmxu@yeah.net

纳秒激光 (200 mJ) 在 0—0.87 T 磁场条件下烧蚀煤粉, 碳等离子体的电子密度随着磁感应强度的提高而增强, 意味着离子密度增大^[22]. 另外, 在 1 T 左右的磁场条件下, 自聚焦飞秒激光 (0.25—1.5 mJ) 离化空气产生的等离子体光谱变宽, 且光谱寿命最多可增加 30%^[23]. 可以预见, PLD 生长 DLC 膜过程引入磁场, 必定会提高激光等离子体中的碳离子密度和动能, 增强对激光等离子体的约束效率以及对粒子扩散、成键的诱导作用, 进而增强对 DLC 膜的微结构和宏观性能的调控能力.

本文讨论了磁场对 PLD 生长 DLC 膜的表面形貌、光学特性、微结构等方面的影响, 可以在技术上进一步指导增强附着、摩擦、光学等性能, 有望应用于微纳 (光) 电子器件保护, 促进其更深层次的微型化发展.

2 实验设置

矩形永磁体紧贴基材非镀膜面, 并与基材同步自转; 以永磁体下表面中心为原点、厚度方向为 z 轴、较短边为 x 轴, 建立笛卡尔坐标系, 如图 1 所示. 永磁体充磁方向为 z 轴方向; 采用尺寸为 80 mm×60 mm×5 mm, 80 mm×60 mm×10 mm 和 80 mm×60 mm×15 mm 的永磁体, 下表面均处于 xy 平面 ($z = 0$) 上, 形成磁感应强度不同的 3 种磁场 (分别命名为 B1, B2 和 B3), PLD 过程发生在 $z < 0$ 空间.

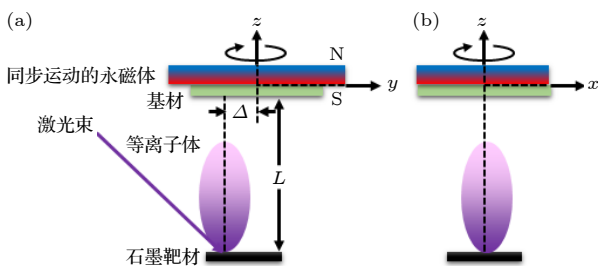


图 1 实验设置 (a) yo 平面; (b) xo 平面

Fig. 1. Experimental setup: (a) View of plane yo ; (a) view of plane xo .

磁场的引入使 DLC 膜变得不均匀. 每种磁场条件下, 激光发射 30000 个脉冲, 在基材表面形成 DLC 膜样品 S1, S2 和 S3. 针对 DLC 膜样品表面不同位置进行性能测试, 研究其表面形貌、光学性能、厚度分布及微结构等受到磁场大小的影响.

PLD 实验在本底真空 1×10^{-4} Pa 条件下进行,

真空罐为中科科美科技股份有限公司制造的定制款. 激光器为深圳盛方科技有限公司生产的 PLD20 型紫外准分子激光器, 波长 248 nm、脉宽 30 ns, 采用 20 Hz 发射频率; 激光束聚焦后以能量密度约为 5.2 J/cm^2 烧蚀石墨靶材, 形成碳等离子体. 基材为 $\Phi 60 \times 0.5 \text{ mm}$ 的单晶硅, 与石墨靶材 (纯度 99.99%) 平行, 两者间距 $L = 60 \text{ mm}$; 基材自转轴与激光等离子体的中轴线具有一定的偏离 ($\Delta = 7 \text{ mm}$), 这样的设置可以在无磁场条件下获得 40 mm 范围内较均匀的 DLC 膜^[24].

3 磁场约束等离子体仿真

3.1 磁场分布

基于安培分子电流假说, 采用毕奥-萨伐尔定律可以计算永磁体形成的磁场^[25], 即:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3}, \quad (1)$$

其中, I 为假设的表面极化电流, $d\mathbf{l}$ 为电流微小源矢量, $\mathbf{r}$ 为计算位置到电流微小源的距离矢量, μ_0 为真空磁导率.

计算磁场 B1 分布情况如图 2 所示, 图中的长条即永磁体 B1. 图 2(a) 为 xoz 平面上 ($y = 0$) 的磁感应强度及磁力线分布. 从图中可以看出, 矩形永磁体在其下方形成了一个磁力线向其收拢的磁场分布形式, 除了两端区域, 永磁体附近的磁场大致朝向 $+z$ 轴方向. 图 2(b), (c) 分别为 xoz 平面上不同纵向位置 (到永磁体下表面的距离 d) 的磁感应强度一维分布和不同纵向位置的磁感应强度二维分布. 从图中可以看出: 远离永磁体时, 磁感应强度较均匀; 但随着距离 d 的减小 (靠近永磁体), 磁感应强度增强的同时变得极为不均匀, 永磁体边缘具有最强的磁感应强度 (约 340 mT). 磁场 B2 和 B3 具有相似分布特性, 最高磁感应强度分别为 640 mT 和 840 mT.

3.2 碳离子飞行轨迹

忽略重力和离子之间互斥力的影响, 离子在磁场中受到洛伦兹力, 即:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{B} \times \mathbf{v}, \quad (2)$$

其中, q 为电子电量, $\mathbf{B}$ 为某点磁感应强度矢量, $\mathbf{v}$ 为带电粒子的速度矢量.

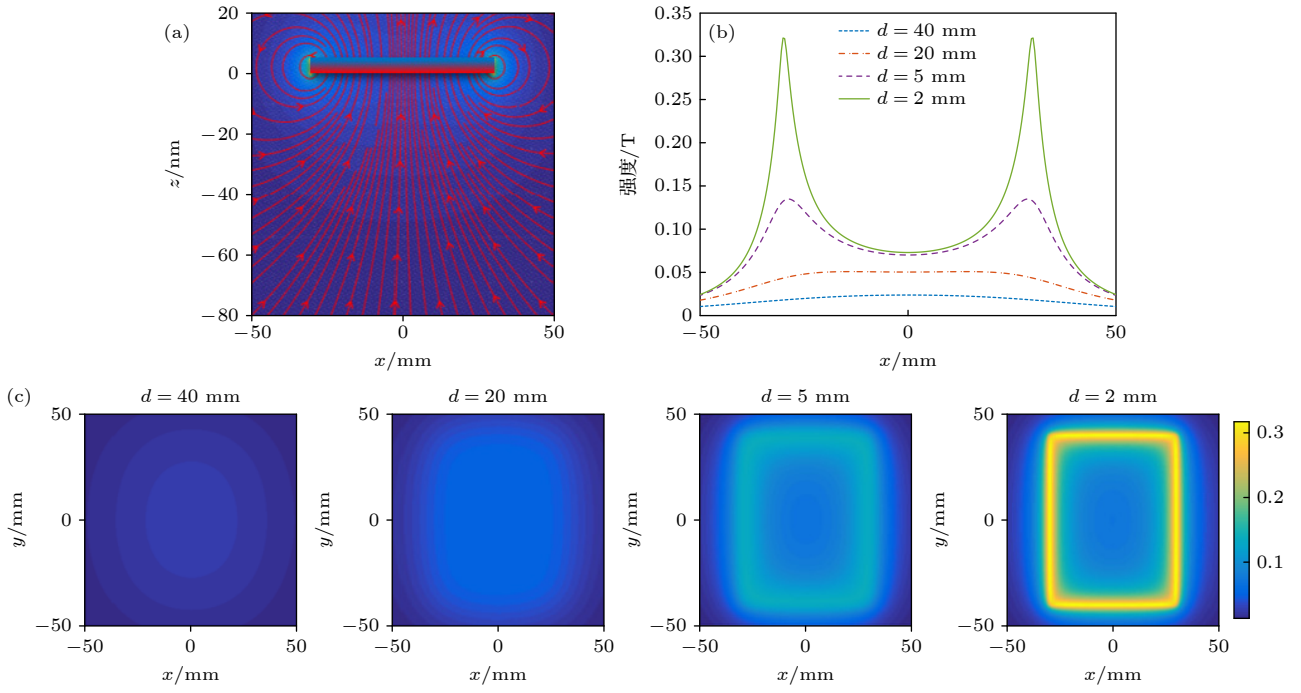


图 2 磁场 B1 仿真 (a) $y = 0$ 平面上的磁感应强度及磁力线分布; (b) $y = 0$ 平面上的磁感应强度 1D 分布; (c) 不同 z 距离上的磁感应强度 2D 分布

Fig. 2. Simulation of the magnetic field B1: (a) Distribution of magnetic strength and flux lines in plane xoz ; (b) 1D-distribution of magnetic strength in the plane $y = 0$; (c) 2D-distribution of magnetic strength at different distance in z axis.

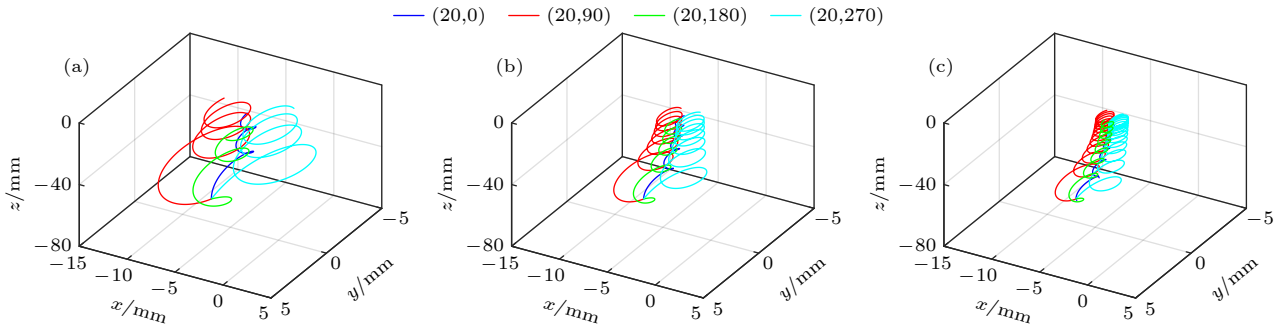


图 3 碳离子 C^{2+} 飞行轨迹仿真 (a) B1; (b) B2; (c) B3

Fig. 3. Simulation of the C^{2+} flying path: (a) B1; (b) B2; (c) B3.

尽管实验设置的磁感应强度不是均匀分布的, 但如果假设带电粒子在某个极短的时间 Δt 内受到的洛伦兹力不变, 则在 $p\Delta t$ 时刻的坐标 s_p 及运动方向变化 $\Delta\theta$ 可简化为

$$s_p \approx s_{p-1} + v\Delta t, \quad (3a)$$

$$\Delta\theta \approx \frac{qB}{m} \Delta t, \quad (3b)$$

其中, m 为电子质量, 初始时刻 s_0 的坐标为 (0 mm, 7 mm, -60 mm).

迭代 (3a) 式直至离子的 z 轴坐标大于基材下表面的 z 轴坐标, 即完成某个碳离子的飞行轨迹.

图 3 为磁场 B1, B2 和 B3 约束下碳离子 C^{2+} 的典型飞行轨迹. 图中的数字表示粒子被激发时的初始飞行方向, 分别为俯仰角和方位角. 从图 3 的飞行轨迹中可以看出, 初始速度侧向飞行的碳离子在磁场的约束下, 呈现螺旋前进的趋势, 而不是向外自由发散, 激光等离子体的膨胀形态发生改变. 越靠近基材 (永磁体), 由于磁感应强度逐渐增强, 因洛伦兹力产生的离子拉莫尔回旋半径变小, 因此, 被约束在某区域范围内 (放置基材). 3 种磁场条件下的离子飞行轨迹对比明显表明, 随着磁感应强度的增大, 离子拉莫尔回旋半径减小, 基材表面在相同时间内能够获得更多的碳离子参与成膜.

4 测量结果及讨论

4.1 表面形貌

3 种磁场条件下生长的 DLC 膜 S1, S2 和 S3 的光学图像如图 4(a) 所示. 从表面色环判断, 随着磁感应强度的增大, DLC 膜的不均匀性越发明显. 图中显示, 在最大磁感应强度 840 mT (B3) 环境中生长出来的 DLC 膜最不均匀, 且中心区域已脱落. 这是由内、外两个原因造成的: 一是该区域膜层厚度过大导致内应力过高, 同时磁场造成膜层的过度不均匀导致该区域的应力集中加剧; 二是随着磁感应强度的提高, 离子拉莫尔回旋半径减小, 因此对膜层中心部分的局域轰击增大. 应力集中、粒子轰击这两个内、外因素共同作用使得该区域的膜-基结合力无法承受, 从而导致膜层脱落.

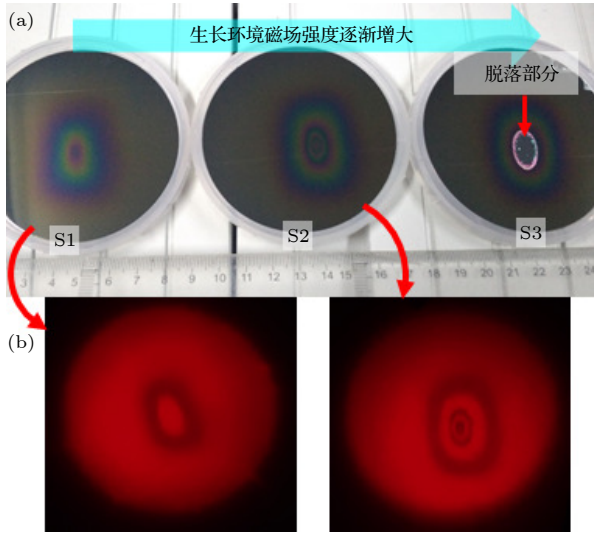


图 4 不同磁场强度下生长 DLC 膜的光学图像 (a) 及其表面干涉 (b)

Fig. 4. Images (a) and surficial interference (b) of DLC layers grown in magnetic field.

采用波长 632.8 nm 的氦氖激光器照射完好的 DLC 膜样品 S1 和 S2, 形成的激光干涉条纹如图 4(b) 所示. 根据干涉理论, 相邻亮纹 (或暗纹) 之间的厚度差为

$$\Delta d = \lambda / (2n), \quad (4)$$

其中 λ 为激光波长, n 为膜层在该波长处的折射率.

氦氖激光器的波长为 632.8 nm, 根据下文的测试, DLC 膜在该波长处的折射率约 2.5—2.6. 因此, 激光干涉条纹显示, 相邻亮纹 (或暗纹) 之间的

厚度差粗估约为 120 nm, 表明磁场下 PLD 生长的 DLC 膜不均匀性极其明显. 如前文所述, 由于永磁体向中心收拢的磁力线分布 (图 2(a)), 约束碳粒子更容易向中心区域膨胀.

4.2 椭圆特性

以 DLC 膜样品的色环中心为起点, 色环短轴方向上分别取 0 mm, 6 mm, 12 mm 和 18 mm, 测试椭圆特性, 在估算膜层厚度的同时, 也能反映膜层可见光波段的光学特性. 磁场条件下生长 DLC 膜在最厚 (0 mm) 和最薄 (18 mm) 位置的椭圆参数 (Δ 和 Ψ) 曲线如图 5 中符号 (∇ , $\diamond$, $\square$, $\circ$) 所示. DLC 膜在可见光波段具有一定的吸收, 因此采用 GenOsc 模型实施光学常数 (折射率 n 、消光系数 k 及厚度 h) 的拟合 [26], 拟合结果以虚线和点划线分别标示于图中.

根据椭圆特性曲线的拟合结果, 磁场条件下 PLD 生长 DLC 膜的膜厚分布及其在 1000 nm 处的光学常数如图 6 所示. 根据图 6(a) 中的拟合厚度显示, 与前期无磁场环境下 PLD 生长 DLC 膜均匀分布的膜厚 [24] 相比, 磁场环境明显改变了 DLC 膜厚度分布状态, 使得膜厚由中心向边缘快速降低, 且磁感应强度越高, 膜厚降低的程度越大. 膜厚不均匀性 δ 表示为

$$\delta = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{h_{\max} + h_{\min}}, \quad (5)$$

式中, $h_{\max}$ 和 $h_{\min}$ 分别表示测量范围内最大和最小膜厚.

根据 (5) 式计算, 在半径 18 mm 范围内, 磁场 B1 和 B2 条件下生长的 DLC 膜厚度不均匀性分别达到 17.6% 和 52.9%. 从图 6(b) 可以看出, 磁场对 DLC 膜的折射率影响不大 (2.56—2.63), 但对其消光系数影响非常明显 (0.008—0.227), 且随着偏离中心位置越远, 其消光系数越高, 主要考虑以下三点原因.

1) 磁场分布特性对碳离子起到约束作用, 使得后者向中心聚集, 而对分子、原子、原子团簇没有明显影响, 从而导致越往中心区域, 其离子参与成膜的比例越高, 相当于稀释了原子团簇、大颗粒引起的散射和吸收.

2) 中心区域聚集的高动能碳离子在形成的碳网络结构中产生更高的局部压力, 在 DLC 膜的压缩变形过程中, 小团簇中的 sp^2C 原子转变为 sp^3

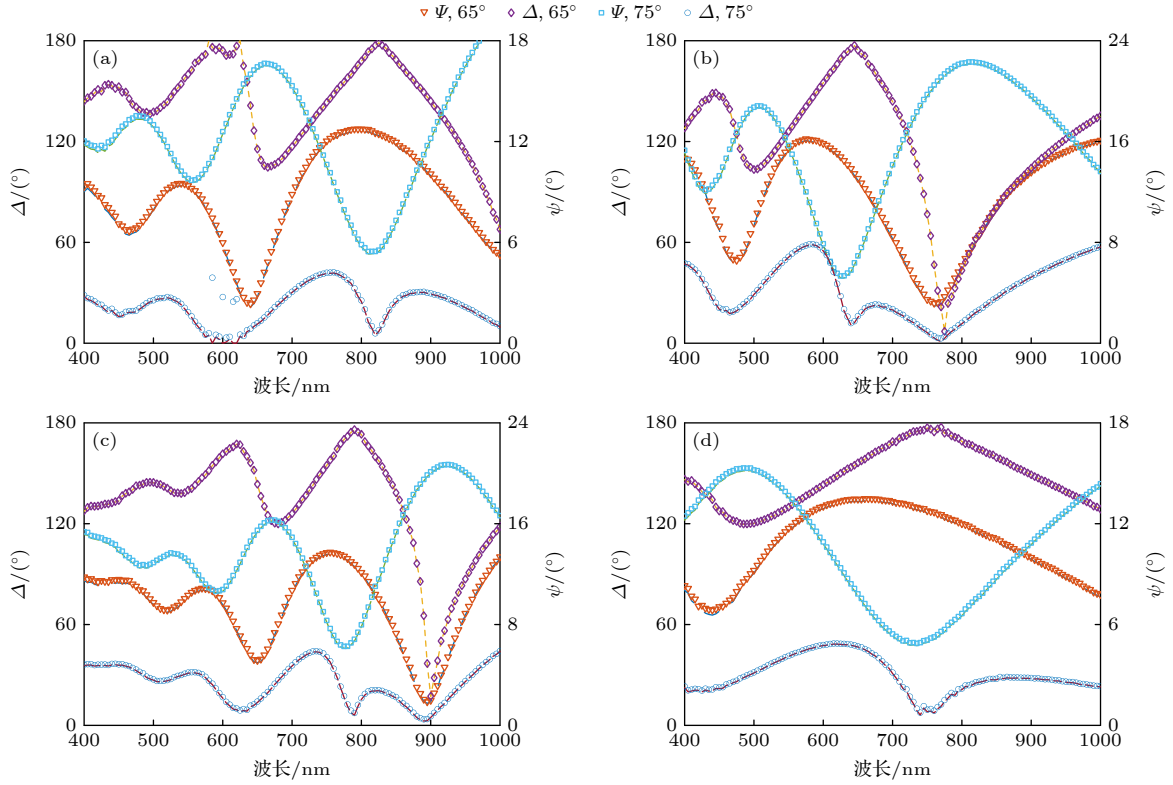


图 5 PLD 生长 DLC 膜的椭圆特性曲线 (a) B1-0 mm; (b) B1-18 mm; (c) B2-0 mm; (d) B2-18 mm

Fig. 5. Ellipsometry properties of of PLD grown DLC layers: (a) B1-0 mm; (b) B1-18 mm; (c) B2-0 mm; (d) B2-18 mm.

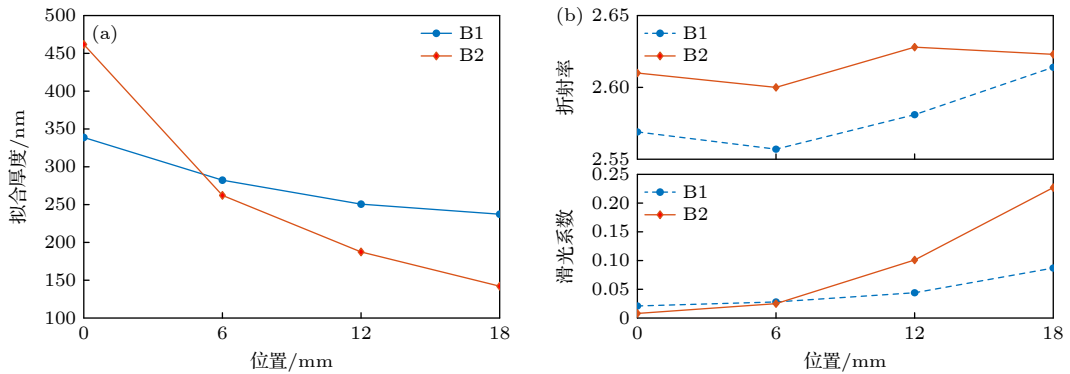


图 6 磁场条件下生长 DLC 膜的厚度及光学常数变化趋势 (a) 厚度分布; (b) 折射率与消光系数

Fig. 6. Thickness and optical constant of DLC layers grown in magnetic field: (a) Thickness distribution; (b) refractive index and extinction coefficient.

键, 并且很有可能与相邻的 sp^3C 团簇结合, 从而促进了 sp^2 键向 sp^3 键的转变^[27]. DLC 膜中 sp^3 杂化碳原子的 4 个价电子形成了强 σ 键, 构成控制空间网络结构的骨架, 光学带隙大, 不易吸收光子; 而 sp^2 杂化碳原子只有 3 个价电子形成 σ 键, 第 4 个价电子则形成垂直于 σ 键平面的弱 π 键, 光学带隙小, 容易吸收光子^[28]. 因此, sp^3/sp^2 比例很大程度上决定了 DLC 膜的消光系数 (或吸收系数), 后者随着前者的增大而降低.

3) 激光等离子体本身具有特性, 即发射角越

大, 粒子的动能越低、团簇与大颗粒含量越高^[29], 这些不受磁场约束的粒子仍旧向远离中心的区域飞行, 并参与成膜, 而远离中心的区域又由于磁场对碳离子的约束, 其离子比例进一步降低、即团簇与大颗粒比例增大. 因此, 导致 DLC 层中含有大量的吸收因素, 造成消光系数迅速恶化.

基于上述分析, 如果要获得膜厚均匀、光学吸收小的 DLC 膜, 则需要改进实验设置, 至少做到两点: 一是将矩形永磁体固定, 而不与基材同步旋转, 并摸索基材自转轴与激光等离子体中轴线的

偏离量 Δ , 获得较均匀的膜层; 二是对激光等离子体做一定遮挡, 滤除发射角较大的部分, 降低原子团簇和大颗粒的总体比例. 这些将在下一步研究中实施.

4.3 拉曼光谱

采用北京卓立汉光技术有限公司的 Omin- λ 2005i 型拉曼光谱仪, 检测 DLC 膜不同位置处的拉曼光谱, 以分析磁场对 DLC 膜微结构的影响. 拉曼光谱仪的发射激光源为波长 532 nm 的可见光, 积分时间 20 s, 测试范围为 1000—2000 cm^{-1} . 磁场 B1 和 B2 条件下生长 DLC 膜表面 (不同位置) 的拉曼光谱如图 7 所示, 峰值波数随着远离色环中心 (最

厚位置) 而蓝移; 与磁场 B1 条件下生长的 DLC 膜相比, 磁场 B2 条件下生长的 DLC 膜拉曼光谱强度变化更加剧烈, 这与膜层厚度分布规律存在直接关系.

将 DLC 膜拉曼光谱分解为 1360 cm^{-1} 附近的 D 峰和 1530 cm^{-1} 附近的 G 峰, 拟合过程如图 8 所示, 经过拟合得到表 1 的各项参数. 从表 1 可以看出, 随着偏离中心区域, 磁场条件生长 DLC 膜的 G 峰半高宽度逐渐变窄、 I_D/I_G 比例逐渐增大, 意味着 DLC 膜中 sp^3/sp^2 比例逐渐降低^[30]. 这仍然是由于受到磁场对碳离子约束作用的原因, 拉曼光谱反映的 DLC 膜微结构变化规律与消光系数变化规律一致, 从膜层微结构方面很好地解释了消光系

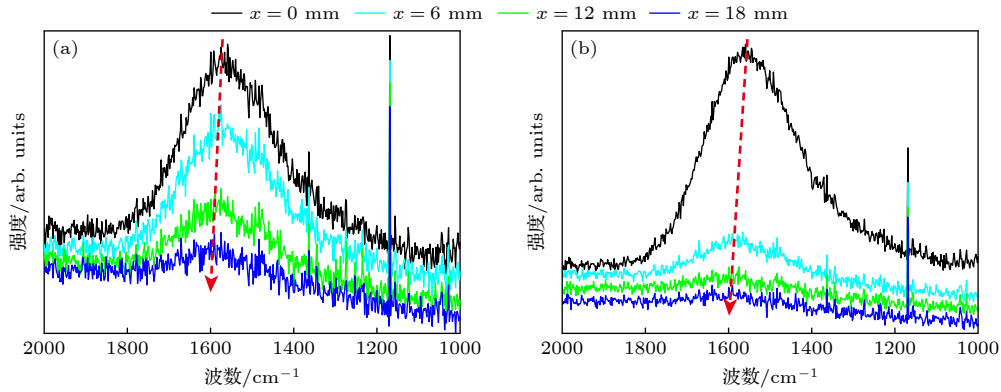


图 7 DLC 膜的拉曼光谱 (a) 磁场 B1 生长条件; (b) 磁场 B2 生长条件

Fig. 7. Raman spectroscopies of DLC layers: (a) Growth condition of magnetic field B1; (b) growth condition of magnetic field B2.

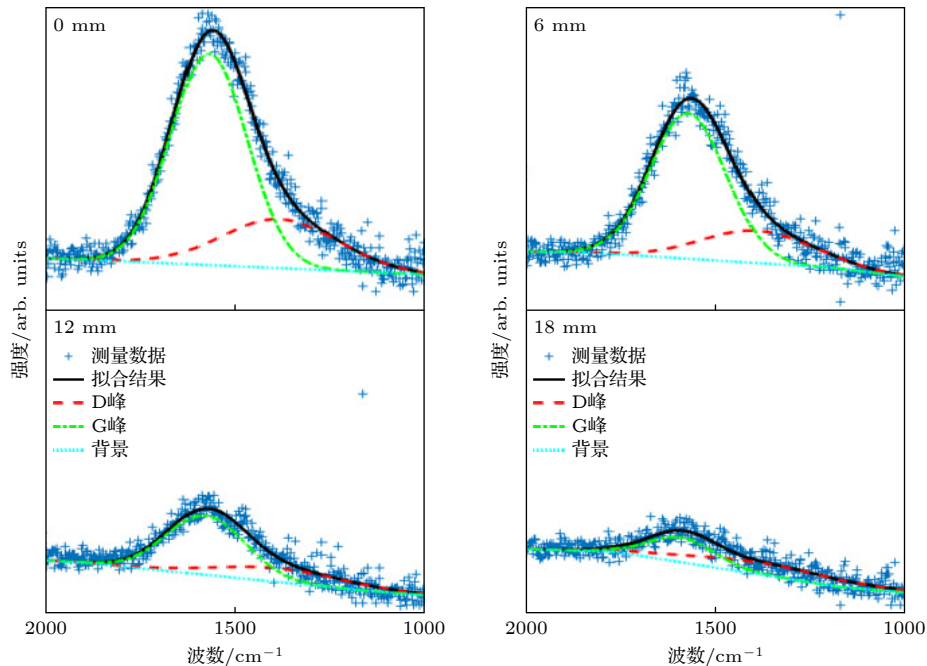


图 8 磁场 B1 生长条件下的 DLC 膜拉曼光谱拟合

Fig. 8. Deconvoluted Raman spectroscopies of DLC layers in magnetic field B1.

表 1 DLC 膜拉曼光谱特性的拟合参数
Table 1. Fitted Raman parameters of DLC layers.

样品	位置 /mm	D峰位置 /cm ⁻¹	D峰半高宽度/cm ⁻¹	G峰位置/cm ⁻¹	G峰半高宽度/cm ⁻¹	I _D /I _G 比值
S1	0	1385.4	219.4	1570.8	138.6	0.366
	6	1388.1	228.9	1570.3	133.1	0.381
	12	1387.0	251.3	1580.3	127.2	0.459
	18	1381.2	266.0	1588.0	123.5	0.868
S2	0	1391.7	201.3	1563.7	146.1	0.331
	6	1386.1	253.1	1576.7	130.3	0.495
	12	1382.6	287.4	1588.2	122.5	0.838
	18	1387.8	308.0	1592.8	114.3	1.020

数变化的本质. 与磁场 B1 环境相比, 磁场 B2 环境中生长 DLC 膜 sp^3/sp^2 比例降低的速率增大, 说明高强度的磁场对碳离子的约束更加明显. 这也从另一个角度反映出紫外准分子激光产生的碳等离子体中含有丰富的碳离子, 否则不可能因为磁感应强度的改变而引起如此巨大的 sp^3/sp^2 比例差异.

5 结 论

磁场对激光碳等离子体产生巨大的影响. 首先, 从仿真结果来看, 由于磁场对碳离子具有的洛伦兹力, 迫使其不能像自由环境中那样发散膨胀, 而是改变为螺旋飞行, 使得碳离子向永磁体中心区域聚集 (放置基材). 其次, 从膜层表面干涉图像及椭圆特性分析, 碳离子在磁场约束下向中心的聚集具有不均匀性, 且磁感应强度越大, 不均匀性越显著. 最后, 由膜层的拉曼光谱分析可知, 在磁场约束下聚集的碳离子在基材表面具有较高的局部压力、降低了原子团簇和大颗粒比例, 有利于形成更高含量的 sp^3 键.

研究工作显示出, 磁场对 PLD 生长 DLC 膜微结构的改善, 提高了膜层中 sp^3 键含量, 有利于增强 DLC 膜的耐蚀、耐磨、光学等性能. 不过, 磁场造成的膜层厚度不均匀性问题需要在下一步工作中解决, 并设计对激光等离子体的边缘遮挡, 降低原子团簇和大颗粒在激光碳等离子体中的比例.

感谢陆军工程大学程勇教授和黄国俊老师的讨论.

参考文献

[1] Deng Z Y, Jia Q, Feng B, Liu L 2021 *Chin. J. Lasers* **48** 0802010 (in Chinese) [邓钟扬, 贾强, 冯斌, 刘磊 2021 中国激光

48 0802010]
[2] Lu Y M, Yang C L, Wang H, Ma L F, Xu M M, Xi L 2023 *Vacuum* **211** 111912
[3] Hiroharu K, Kazuya D, Satoshi H, Yoshiaki S 2000 *Thin Solid Films* **374** 278
[4] Fernandez C J, Vassent J L, Givord D 1999 *Appl. Surf. Sci.* **138–139** 150
[5] Zhang K J, Dai J M, Zhu X B, Zhu S J, Yin L H, Tang X W, Sun Y P 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116** 053103
[6] Dai J M, Zhang K J, Zou J, Liu Q Z, Sheng Z G, Zhu X B, Wu W B, Sun Y P 2014 *China Patent* 201410033519. X (in Chinese) [戴建明, 张科军, 邹建, 刘亲壮, 盛志高, 朱雪斌, 吴文彬, 孙玉平 2014 中国专利 201410033519. X]
[7] Wakiya N, Kawaguchi T, Sakamoto N, Das H, Shinozaki K, Suzuki H 2017 *J. Ceram. Soc. Jpn.* **125** 856
[8] Ayano I, Takahiko K, Naonori S, Hisao S, Naoki W 2023 *J. Ceram. Soc. Jpn.* **131** 275
[9] Hu Y, Luo J Y, Cai Y Y, Lu X P 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 130501 (in Chinese) [胡杨, 罗婧怡, 蔡雨烟, 卢新培 2023 物理学报 **72** 130501]
[10] Sukhmander S, Hitendra K M 2023 *J. Astrophys. Astr.* **44** 3
[11] Zhang Y W, Zhao H L 2023 *Adv. Space Res.* **71** 3281
[12] Ali M, Parviz K, Mehdi R, Hadi S, Rouholah A 2015 *Carbon* **94** 485
[13] Modabberasl A, Sharifi M, Shahbazi F, Kameli P, Ranjbar M 2022 *Diam. Relat. Mater.* **128** 109261
[14] Cheng Y, Lu Y M, Huang G J, Mi C W, Li W, Tian F T, Wang S 2019 *Infrared Laser Eng.* **48** 1117002 (in Chinese) [程勇, 陆益敏, 黄国俊, 米朝伟, 黎伟, 田方涛, 王赛 2019 红外与激光工程 **48** 1117002]
[15] Ismail R A, Suaad S S, Ali M M 2021 *Opt. Laser Technol.* **140** 107042
[16] Nikov R G, Dikovska A O, Avdeev G V, Amoroso S, Ausanio G, Nedyalkov N N 2019 *Appl. Surf. Sci.* **471** 368
[17] Gao D W, Wang L, Su X Q, Jin Wang, Chen R X 2021 *Opt. Mat.* **114** 110877
[18] Debnath N, Kawaguchi T, Das H, Suzuki S, Kumasaka W, Sakamoto N, Shinozaki K 2018 *Sci. Technol. Adv. Mat.* **19** 507
[19] Zhang K J, Dai J M, Wu X B, Zhu X G, Zuo X Z, Zhang P, Hu L, Lu W J, Song W H 2016 *Sci. Rep.* **6** 1
[20] Behera N, Kumar A, Singh R K 2021 *Plas. Res. Exp.* **3** 025011
[21] Wang G C 2021 *Ph. D. Dissertation* (Lanzhou: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [王桂才 2021 博士学位论文 (兰州: 中国科学院大学)]
[22] Li H M, Gong R K, Zhou G Q 2021 *Modern Electron. Techn.*

- 44 150 (in Chinese) [李慧敏, 龚瑞昆, 周国庆 2021 现代电子技术 44 150]
- [23] Meng Y 2020 *M. S. Thesis* (Baotou: Baotou Teachers' College) (in Chinese) [孟燕 2020 硕士学位论文 (包头: 包头师范学院)]
- [24] Lu Y M, Wang H, Mi C W, Yang C L, Huang G J, Xu M M 2023 *Infrared Phys. Techn.* **131** 104708
- [25] Tang Y, Shu Y P, Guo Z H 2022 *J. Donghua Univ. (Natural Science)* **48** 126 (in Chinese) [唐雨, 束永平, 郭振杭 2022 东华大学学报 (自然科学版) **48** 126]
- [26] Cui C C, Li H H, Chen X, Zhou Z H, Hu Z W 2023 *Chin. J. Sci. Instrum.* **44** 37 (in Chinese) [崔长彩, 李慧慧, 陈希, 周志豪, 胡中伟 2023 仪器仪表学报 **44** 37]
- [27] Bobzin K, Kalscheuer C, Thiex M, Sperka P, Hartl M, Reitschuster S, Maier E, Lohner T, Stahl K 2023 *Tribol. Lett.* **71** 2
- [28] Xue Q J, Wang L J 2012 *Carbon-based Diamond-like Thin Film Materials* (Beijing: Science Press) p6 (in Chinese) [薛群基, 王立军 2012 类金刚石碳基薄膜材料 (北京: 科学出版社) 第 6 页]
- [29] Seong S Y, Chen H N, Seong L Y, Teck Y T 2015 *J. Nanomater.* **2015** 731306
- [30] Jang S, Kim S H 2023 *Carbon* **202** 61

Micro-structural and optical properties of diamond-like carbon films grown by magnetic field-assisted laser deposition*

Lu Yi-Min Wang Yu-Jie Xu Man-Man[†] Wang Hai Xi Lin

(School of Mechanical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

(Received 20 January 2024; revised manuscript received 7 March 2024)

Abstract

Inhomogeneous magnetic field is introduced into pulsed laser deposition process, in order to find new properties of diamond-like carbon film grown under magnetic field, thereby offering the theoretical and experimental basis for further enhancing sp³-bond content in this film. Distribution of the magnetic strength and flux lines induced by a rectangular permanent magnet is calculated. And then, flying trace of the carbon ions in the magnetic field is also simulated by the iterative method, which indicates that the carbon ions cannot expand freely and they are confined and accumulate around the center region of the magnet source. Beside the surface interference, the measurement and the fitted results of ellipsometry parameters show that magnetic field exerts an important influence on layer-thickness distribution and optical constant of the pulsed laser deposition-grown diamond-like carbon film. Meanwhile, it is indicated that the inhomogeneity of the layer-thickness distribution and optical constant increase when the magnetic strength is higher. Micro-structure of diamond-like carbon film is affected seriously by magnetic field, which is indicated by Raman spectra. Magnetic field can enhance the local stress in the carbon matrix net, increasing the sp³-bond content. Theoretical research and experimental research both show that a suitable magnetic strength can excite micro-structure of diamond-like carbon film significantly, and the high-quality diamond-like carbon coating with practical application value will be obtained by technological adjustment.

Keywords: diamond-like carbon film, pulsed laser deposition, magnetic field-restrained plasma, micro-structure

PACS: 81.05.uj, 81.15.-z, 52.38.-r, 52.77.Dq

DOI: 10.7498/aps.73.20240145

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12205004), the Scientific Research Project of Universities of Anhui Province, China (Grant No. 2022AH050982), and the Start-up Fund for Introductions of Anhui Polytechnic University, China (Grant No. 2022YQQ001).

[†] Corresponding author. E-mail: manmxu@yeah.net



磁场辅助激光生长类金刚石膜的微结构及光学性能

陆益敏 汪雨洁 徐曼曼 王海 奚琳

Micro-structural and optical properties of diamond-like carbon films grown by magnetic field-assisted laser deposition

Lu Yi-Min Wang Yu-Jie Xu Man-Man Wang Hai Xi Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 108101 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240145

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240145>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

脉冲激光沉积无氢钨掺杂类金刚石膜的摩擦与机械性能

Tribological and mechanical properties of non-hydrogenated W-doped diamond-like carbon film prepared by pulsed laser deposition

物理学报. 2021, 70(4): 046801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201505>

硫离子注入纳米金刚石薄膜的微结构和电化学性能

Microstructural and electrochemical properties of sulfur ion implanted nanocrystalline diamond films

物理学报. 2019, 68(14): 148101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190394>

外延BaMoO₃, BaMoO₄薄膜的生长行为

Growth behaviors of epitaxial barium molybdate (BaMoO₃, BaMoO₄) film

物理学报. 2022, 71(17): 178103 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220736>

高质量FeSe单晶薄膜的制备及相关性能表征

Preparation and characterization of high-quality FeSe single crystal thin films

物理学报. 2018, 67(20): 207416 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180940>

高功率脉冲磁控溅射技术制备掺氮类金刚石薄膜的磨蚀性能

Tribocorrosion performance of Nitrogen-doped diamond like carbon coating by high power impulse magnetron sputtering technique

物理学报. 2020, 69(10): 108101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200021>

金刚石晶界辅助石墨烯沉积的成核机理仿真

Simulation research on nucleation mechanism of graphene deposition assisted by diamond grain boundary

物理学报. 2022, 71(8): 086103 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211981>