

2 英寸 MPCVD 光学级均匀金刚石膜的制备研究

产思义¹, 屠菊萍¹, 黄珂¹, 邵思武¹, 杨志亮¹, 刘鹏¹, 刘金龙¹,
陈良贤¹, 魏俊俊^{1,2}, 安康³, 郑宇亭^{1,2}, 李成明¹

(1. 北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083; 2. 北京科技大学 顺德创新学院, 佛山 528399; 3. 北方工业大学 机械与材料工程学院, 北京 100144)

摘要: 均匀生长大尺寸光学级金刚石膜一直是微波化学气相沉积(Microwave plasma chemical vapor deposition, MPCVD)金刚石研究领域的热点和难点, 沉积台的结构与位置对于金刚石膜均匀性以及厚膜生长的长期稳定性至关重要。本研究通过 COMSOL 模拟结合实验研究了沉积台高度对衬底表面电场均匀性、等离子体状态和温度均匀性的影响规律, 优化了光学级金刚石膜均匀生长的工艺参数, 在最佳沉积台高度(2 mm)下沉积得到的 2 英寸金刚石膜(最大厚度 337 μm), 厚度不均匀性 < 11%, 从膜中心到边缘的拉曼半峰全宽为 3~4 cm^{-1} , 可见光波段内最高透过率为 69%~70%, 10.6 μm 处红外透过率为 70%。结果表明: 金刚石膜的厚度和品质较为均匀, 实现了两英寸光学级金刚石膜的均匀沉积。沉积台高度对衬底表面的电场分布、等离子体形状和温度分布都有一定影响, 随着沉积台高度增加, 衬底表面电场分布均匀性和温度均匀性得到明显改善, 且衬底表面的等离子体分布更均匀, H 原子和含碳基团的浓度增加。

关键词: 光学级金刚石膜; 温度均匀性; 红外透过率; 沉积台高度; COMSOL 模拟

中图分类号: O484 文献标志码: A

Uniform Growth of Two-inch MPCVD Optical Grade Diamond Film

CHAN Siyi¹, TU Juping¹, HUANG Ke¹, SHAO Siwu¹, YANG Zhiliang¹, LIU Peng¹, LIU Jinlong¹,
CHEN Liangxian¹, WEI Junjun^{1,2}, AN Kang³, ZHENG Yuting^{1,2}, LI Chengming¹

(1. Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Shunde Innovation School, University of Science and Technology Beijing, Foshan 528399, China; 3. School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: The uniform growth of large-size optical grade diamond films has been one of the hot spots and difficulties in the field of microwave plasma chemical vapor deposition (MPCVD) diamond research, in which the structure and position of the deposition platform are crucial to the uniformity of diamond films and the long-term stability of thick film growth. Here, the effect of deposition platform height on the electric field uniformity, plasma state and temperature uniformity on the substrate surface was investigated by COMSOL simulation combined with experiments to optimize the process parameters for the uniform growth of optical grade diamond films. The 2-inch diamond film

收稿日期: 2023-04-24; 收到修改稿日期: 2023-05-25; 网络出版日期: 2023-09-12

基金项目: 国家磁约束核聚变发展研究专项基金(2019YFE03100200)

National MCF Energy R&D Program of China (2019YFE03100200)

作者简介: 产思义(1998-), 男, 硕士研究生. E-mail: g20209343@xs.ustb.edu.cn

CHAN Siyi (1998-), male, Master candidate. E-mail: g20209343@xs.ustb.edu.cn

通信作者: 刘金龙, 研究员. E-mail: liujinlong@ustb.edu.cn; 李成明, 教授. E-mail: chengmli@mater.ustb.edu.cn

LIU Jinlong, professor. E-mail: liujinlong@ustb.edu.cn; LI Chengming, professor. E-mail: chengmli@mater.ustb.edu.cn

with thickness of 337 μm and inhomogeneity <11% was obtained at the optimal deposition platform height of 2 mm. The full width of the Raman half-peak from the center to the edge of the film is in the range of 3–4 cm^{-1} , and the maximum transmittance is 69%–70% in the visible light band and 70% in the infrared light at 10.6 μm . This indicates that thickness and quality of the diamond film are relatively uniform, thus the uniform deposition of 2-inch optical grade diamond film is achieved. Above results show that the deposition platform height has a great influence on the electric field distribution and plasma state on the substrate surface, and the electric field uniformity on the substrate surface is significantly improved with the increase of the deposition height, but the influence on the temperature uniformity is smaller.

Key words: optical grade diamond film; temperature uniformity; infrared transmittance; deposition platform height; COMSOL simulation

金刚石具有宽波段的高透过率^[1]、高热导率^[2]、高强度^[3]以及低微波损耗^[4]等,被广泛应用于红外光学窗口、高功率微波窗口、高功率 CO_2 激光窗口和 X 射线窗口等部件^[5-8]。微波化学气相沉积 (Microwave plasma chemical vapor deposition, MPCVD) 是制备高品质金刚石膜尤其是光学级金刚石膜最常用的方法^[9-12],但是随着沉积尺寸增大,光学级金刚石膜的制备工艺难度和成本也会随之上升,需要克服金刚石膜的沉积均匀性、内部缺陷和完整性等工艺方面的问题^[13-14]。通过 MPCVD 方法沉积大面积均匀的金金刚石薄膜仍然是金刚石研究领域的热点和难点^[15-16]。

已有大量采用各种类型的 MPCVD 设备进行金刚石薄膜沉积均匀性的研究。Weng 等^[17]和 Sedov 等^[18]通过改善衬底支架结构,沉积的高质量金刚石薄膜表现出极好的均匀性。张帅等^[19]利用衬底表面和衬底底部存在的弱空心阴极放电,提高温度均匀性,制备了 $\phi 100\text{ mm}$ 的厚度均匀性较好的自支撑金刚石膜。Wang 等^[20]和安康等^[21]采用新型的 MPCVD 装置,研究衬底周围气流模式对金刚石膜沉积的影响,通过改进的气流模式提供更合适的环境,改善反应气体在衬底表面的分布,从而提高高品质金刚石膜沉积均匀性。郑可等^[22]研究气体流量对金刚石膜均匀性的影响,发现适当的气体流量有利于提高薄膜均匀性。Li 等^[23]通过设计新型的 MPCVD 装置,制备的 2 英寸高品质金刚石膜厚度不均匀性 <10%。已有研究人员尝试各种方法(如钼托结构设计、改变气流模式、设计新型 MPCVD 设备等)来改善不同 MPCVD 设备中金刚石膜沉积均匀性,但这些方法都缺少沉积台位置对等离子体性状的系统研究,而实际上沉积台的位置对金刚石膜的品质和均匀性的影响很大。

本工作系统研究了沉积台高度对金刚石膜生长质量与均匀性的影响规律。研究沉积台高度对衬底

表面电场均匀性、等离子体的成分变化和温度均匀性的影响规律,优化光学级金刚石膜均匀生长的工艺参数,得到均匀的两英寸光学级金刚石膜。结果表明沉积台高度的变化对衬底表面温度均匀性的影响较小,但对衬底表面的电场强度分布和等离子体的分布影响很大,随着沉积台高度升高,衬底表面电场均匀性得到明显改善。

1 实验方法

1.1 衬底表面电场模拟

本研究采用 COMSOL 软件针对 2.45 GHz、6 kW 石英板式 MPCVD 装置进行多物理场的仿真模拟,计算腔内的电场分布,其中的唯一变量为沉积台的高度,输入功率为 4000 W。由微波发生器产生的频率为 2.45 GHz 的微波能量通过矩形波导以 TE 模式输送到同轴天线,经过下方石英介质窗口耦合进入反应腔室,以 TM_{01} 模式产生谐振,在沉积台上方形成强电场区域,激发反应气体(氢气、甲烷等),形成一个完整的半椭球形的等离子体区域。腔内电场分布可通过 Maxwell 方程求解:

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0 \quad (1)$$

其中, \mathbf{E} 为微波电场强度矢量, μ_r 为相对磁导率, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为相对介电常数, σ 为等离子体的电导率, ω 为微波的角频率, k_0 为真空中微波的波数。

在此 MPCVD 装置中,沉积台高度可通过电机进行实时调节。实际沉积过程中,在沉积台高度超过 2 mm 下进行长时间沉积会出现金刚石膜厚度增加,导致腔室内电场模式发生改变,顶部出现次生等离子体,烧蚀石英盖板。因此沉积台高度最高设置为 2 mm。图 1 为三种沉积台高度的示意图,沉积台高度 2 mm(图 1(a))即为衬底表面比屏蔽环的表面

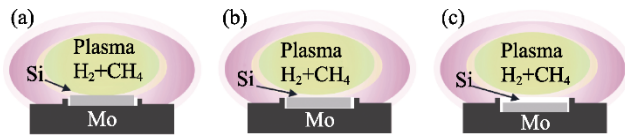


图 1 不同沉积台高度的衬底放置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of substrate placement for different deposition platform heights

(a) 2 mm; (b) 0 mm; (c) -2 mm

高出 2 mm, 同理沉积台高度 0 和 -2 mm 分别为衬底表面与屏蔽环表面持平和下凹 2 mm。沉积台高度 2 mm 时, 样品更靠近等离子球的中心, 预计衬底表面的等离子体分布更加均匀。沉积台高度 -2 mm (图 1(c)) 时, 可以作为“保护环”来防止样品边缘过热, 还可以防止在硅衬底上形成“包边”, 有利于金刚石膜的后处理。

1.2 多晶金刚石膜生长实验

本研究采用直径 50.8 mm、厚度 4 mm 单面抛光的商用 N 型(100)硅晶片作为衬底, 实验前先对硅片进行预处理, 首先用 5、10 和 20 μm 金刚石粉混合机械研磨 30 min, 旨在硅片表面形成均匀的划痕, 然后用 0.5 μm 的金刚石粉研磨 5 min, 最后在丙酮和酒精中分别超声清洗 15 min。将预处理的 Si 衬底放入带凹槽的钼(Mo)基座中, 圆形凹槽的深度与 Si 衬底匹配良好, 深度略小于衬底厚度。通过控制钼托与水冷基台间的接触面积来控制散热, 从而调节整个 Si 衬底的温度均匀性。随后放入 2.45 GHz、6 kW MPCVD 系统中进行金刚石膜沉积。所使用的反应气体为纯度 99.9999% 的 H_2 、99.999% 的 CH_4 和

99.999% 的 O_2 。保持腔压 21 kPa、功率 4800 W、氢气流量 500 sccm, 经过前期的工艺优化, 采用形核时 CH_4 35 sccm 和 H_2 500 sccm, 生长时 CH_4 25 sccm 和 O_2 5 sccm 的实验参数, 如表 1 所示。用红外测温计(CS31-MB14ALD)测得金刚石的表面温度。

采用 FLAME-S 光谱仪(Ocean Optics, FLMS01242)测量等离子体光发射光谱(Optical emission spectrum, OES), 测量范围为 350~1000 nm。采用 X 射线衍射仪(XRD, Rigaku Smart Lab 9 kW)研究样品的晶体结构。采用拉曼光谱(LabRAM HR Evolution, 532 nm)确定金刚石的质量。采用 UV-VIS-NIR 分光光度计(Agilent Cary 7000)测量金刚石膜在 200~800 nm 范围内的透过率, 以及傅里叶变换红外光谱(Excalibur 3100)测试金刚石膜在红外波段 2.5~20 μm 范围内的透过率。

2 结果与讨论

2.1 沉积台高度对电场的影响规律

沉积台高度会影响衬底表面的电场分布, 进而影响等离子体的分布, 合适的沉积台高度有助于提高薄膜均匀性。首先采用 COMSOL 软件模拟衬底表面的电场强度分布, 如图 2 所示。当沉积台高度低于 0 mm, 衬底边缘的等离子体会被屏蔽掉而抑制边缘放电, 此时计算得到的电场不均匀性超过 30%, 且随着沉积台高度降低而逐渐升高, 如图 3(a) 所示。研究发现沉积台高度不应小于 -2 mm, 因为在

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

Nucleation					Growth				
Power/ kW	Pressure/ kPa	Gas: CH_4/H_2	Time/ min	Temperature/ $^\circ\text{C}$	Power/ kW	Pressure/ kPa	Gas: $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{H}_2$	Temperature/ $^\circ\text{C}$	Height/ mm
4.7	21	35/500	40	880	4.7-4.9	21-22	25/5/500	870-880	2

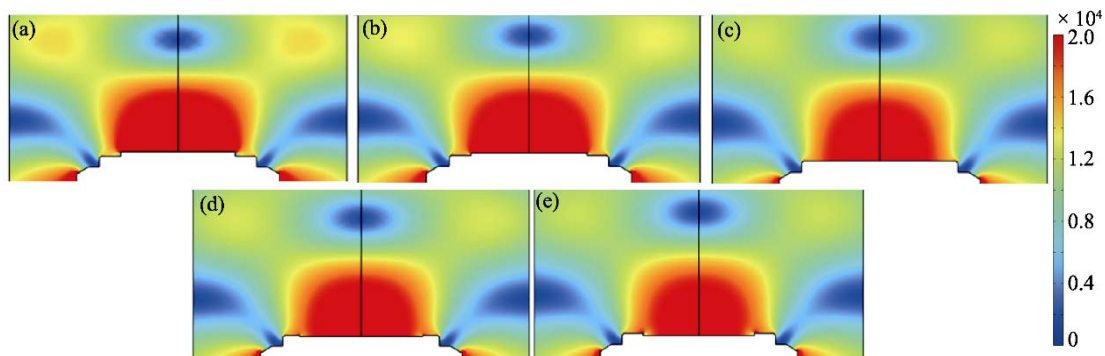


图 2 不同沉积台高度下的衬底上方电场模拟

Fig. 2 Electric field simulations above the substrate for different deposition platform heights
(a) 2 mm; (b) 1 mm; (c) 0 mm; (d) -1 mm; (e) -2 mm

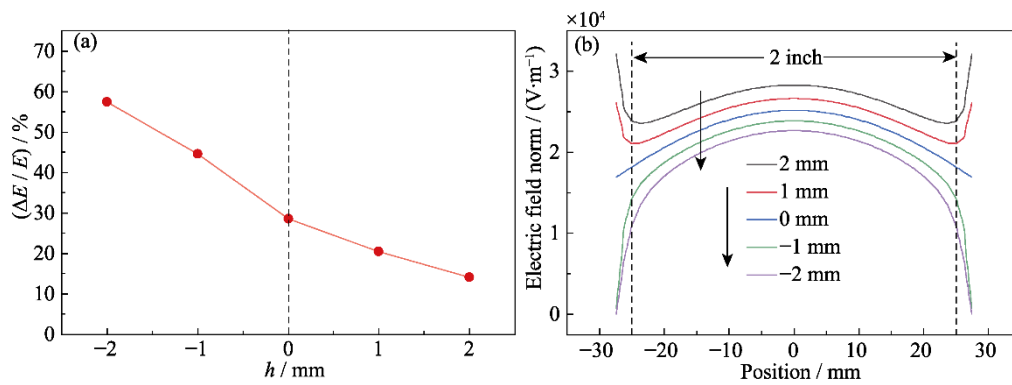


图 3 不同沉积台高度下衬底上方电场不均匀性(a)和电场强度分布(b)

Fig. 3 Electric field inhomogeneity (a) and electric field intensity distributions (b) above the substrate at different deposition platform heights

1 inch=25.4 mm

较深的凹槽中, 衬底边缘的电场强度较低, 计算得到的电场不均匀性可能超过 50%。与之相反, 沉积台高度在 0 mm 以上时, 衬底上方的电场均匀性得到明显的改善, 电场不均匀性减小到 30%以下。随着沉积台高度升高到 1 mm, 衬底边缘附近的电场增加, 电场不均匀性降到 20.4%, 沉积台高度为 2 mm, 电场不均匀性为 14.1%。图 3(b)显示三种高度下衬底表面的电场分布, 发现沉积台高度为-2 mm 时, 衬底边缘的电场强度较低, 可以很好地保护衬底边缘, 但是在衬底上方的电场分布很不均匀, 其电场不均匀性达到 57.4%。沉积台高度为 0 和 2 mm 时, 衬底边缘的电场强度显著增加, 与中心的电场强度差也减小, 电场均匀性增加。通过调整工艺参数如功率、腔压等, 也可以将衬底边缘的电场强度的突变点移到衬底之外, 从而减小电场分布不均匀性。通过这种方法, 即使沉积台高度为 0 mm, 也可以得到较好的电场均匀性。但结合设备的特性, 需

要在高功率密度下, 并且等离子体要完全覆盖到 2 英寸衬底上, 所以只能采取调节沉积台高度的方法来改善电场均匀性。

2.2 沉积台高度对等离子体特征的影响规律

图 4 显示在添加甲烷的情况下, 不同沉积台高度下衬底上方等离子体的照片, 衬底上方最亮的绿色发光体即为等离子体的区域。可以观察到, 等离子体都显示出相似的半球状对称地集中在衬底上方, 这些等离子体是由从微波电源进入腔室的微波能量激发腔室中的气体混合物而形成的。从图中可以看出, 随着沉积台高度上升, 衬底上方等离子体球的弧度逐渐减小, 最终趋近与衬底表面平行, 即衬底边缘的位置与上方等离子体的距离越来越近, 这使得边缘和中心所处的等离子体环境差异减小, 导致沉积的金刚石膜均匀性提高。其中最佳的沉积距离为 2 mm, 此时衬底与等离子体球的底面几乎平行, 这种状态下才会大幅度提高金刚石膜的沉积均匀性。

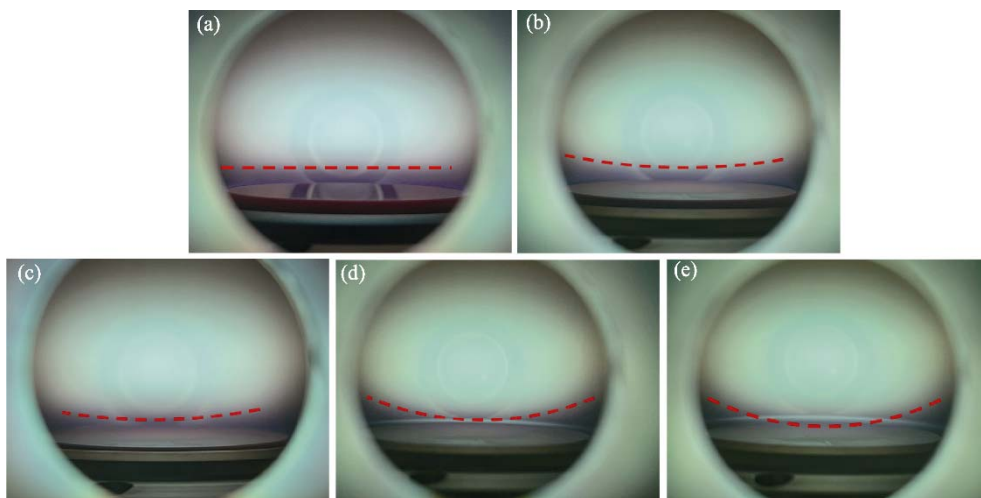


图 4 不同沉积台高度下的等离子体球的形状图

Fig. 4 Shape diagrams of the plasma spheres at different deposition platform heights
(a) 2 mm; (b) 1 mm; (c) 0 mm; (d) -1 mm; (e) -2 mm

不同沉积台高度下 $H_2/CH_4/O_2$ 气氛中的等离子体成分变化如图 5 所示, 在 OES 测量的过程中, 始终保持着测量点与衬底的相对位置不变, 即测量位置也随着沉积距离升高而增加相同数值。研究发现随着沉积位置升高, H_α 和 C_2 峰强度是逐渐增大, 且增加幅度较大, H_β 和 CH 强度也呈现增大趋势。其中, I_{C_2}/I_{H_α} 和 I_{CH}/I_{H_α} 谱线强度比值则分别用以表征气相环境中的 C_2 和 CH 活性基团的相对浓度。 I_{H_β}/I_{H_α} 则代表等离子体电子温度(T_e)变化的近似值。 I_{C_2}/I_{H_α} 和 I_{CH}/I_{H_α} 呈现上升趋势, 原因在于随着沉积台高度的上升, 衬底上方的等离子体形状越来越扁平, 在距离衬底相同位置处的电场强度更高, H 原子和含碳基团可以从微波电场中获取更多能量, 从而促进 H 原子(H_α 、 H_β)和碳相关基团(CH 、 C_2)的激活, 得到高强度的 H 原子和含碳基团的发射线, 同时也使得含碳基团(C_2 、 CH)的相对浓度上升。 I_{H_β}/I_{H_α} 随沉积台高度升高而稍有增加, 说明沉积台高度升高有利于提高电子平均温度。因此适当升高衬底的沉积位置可以提高 H 原子和碳活性基团在衬底表面附近的相对浓度。

2.3 沉积台高度对温度均匀性的影响规律

温度均匀性是影响薄膜沉积均匀性的重要因素,

温度均匀是保证金刚石膜整体均匀的关键。为确保衬底温度良好的均匀性, 经过测试不同沉积台高度下两英寸硅衬底表面的温度, 分析不同沉积台高度(2、0 和-2 mm)下的温度均匀性, 如图 6 所示。随着沉积台高度的上升, 温度差有所下降, 由 $29^\circ C$ (-2 mm)降低到 $25^\circ C$ (沉积台高度为 0 mm), $21^\circ C$ (沉积台高度为 2 mm)。实验中硅衬底表面的温度主要依靠等离子体对衬底加热和衬底底面与沉积台散热的共同作用, 因此在保持衬下方冷却能力不变的情况下, 表面温度主要由等离子体的加热能力决定, 由前面分析可知, 沉积台高度增大的过程中, 衬底表面的电场均匀性升高, 等离子体的外部轮廓逐渐趋于与衬底表面平行, 对衬底中心和边缘的加热能力的差距越来越小, 从而使温度差越来越小。说明通过升高沉积台高度, 引起衬底边缘的尖端效应而提高边缘的温度, 减小温度差, 有利于提高沉积薄膜的均匀性。

综上所述, 本研究通过 COMSOL 软件模拟不同沉积台高度下衬底表面的电场分布均匀性, 确定最佳沉积台高度为 2 mm, 并且通过等离子体诊断技术分析等离子体性状和衬底表面的温度测量验证了模拟结果。

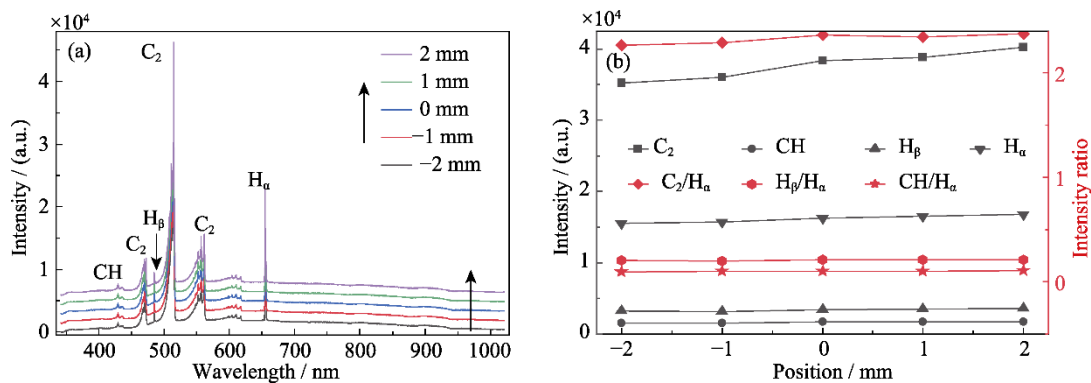


图 5 不同沉积台高度下光发射光谱(a), C_2 、 H_α 、 H_β 、 CH 峰强度和 I_{C_2}/I_{H_α} 、 I_{CH}/I_{H_α} 、 I_{H_β}/I_{H_α} 变化趋势(b)
Fig. 5 Optical emission spectra (a), relative C_2 , H_α , H_β , CH emission intensities and variations in I_{C_2}/I_{H_α} , I_{CH}/I_{H_α} , I_{H_β}/I_{H_α} ratio (b) at different deposition platform heights

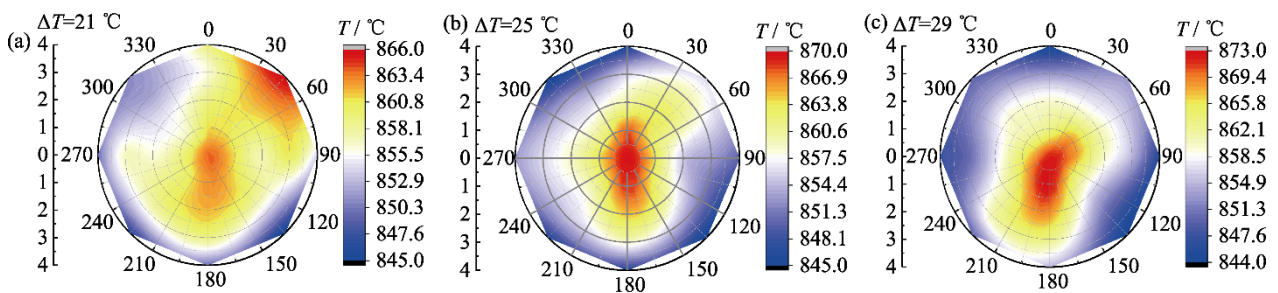


图 6 不同沉积台高度下的温度分布均匀性
Fig. 6 Uniformity of temperature distributions at different deposition platform heights
(a) 2 mm; (b) 0 mm; (c) -2 mm

2.4 最佳高度下 2 英寸光学级金刚石膜的生长与表征

采用表 1 所示的实验参数, 在确定的最佳沉积台高度 2 mm 下沉积 200 h 得到如图 7(a)所示的金刚石膜。图 7(c)显示经过测量得到的最小厚度 300 μm , 最大厚度 337 μm , 厚度均匀性 < 11.0%, 说明其厚度均匀性较好, 生长速率为 1.5 $\mu\text{m}/\text{h}$ 。生长面抛光过程中产生裂纹, 但从双面抛光样品中仍可以看出其光学质量较好(图 7(b))。图 8(a)为金刚石膜的

XRD 图谱, 图中只存在金刚石(220)和(111)峰, 二者峰面积之比 $S_{(220)}/S_{(111)}=76.62$, 表明此膜为高度的(220)择优取向。图 8(b)显示从膜中心到边缘三个位置处的拉曼光谱, 中心的金刚石峰 FWHM 为 3.27 cm^{-1} , 边缘为 3.91 cm^{-1} , 说明整个膜的结晶质量较好。图 9(a)为中心到边缘的紫外-可见波段透过率光谱图, 其最高透过率分别为 69.8%、69.4%和 69.4%, 在 480~800 nm 范围内的透过率均在 60%以上。红外波段的透过率光谱图(图 9(b))显示中心到边缘在 10.6 μm 处的透

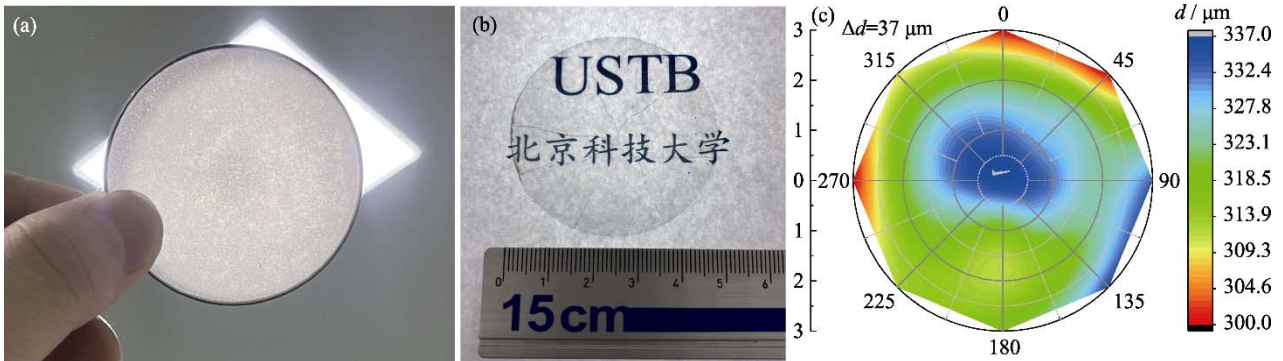


图 7 金刚石膜沉积态(a)和抛光态(b)的照片及沉积态的厚度分布图(c)

Fig. 7 Photographs of deposited state of the sample (a), polished state on both sides (b), and thickness distribution of the deposited state (c)

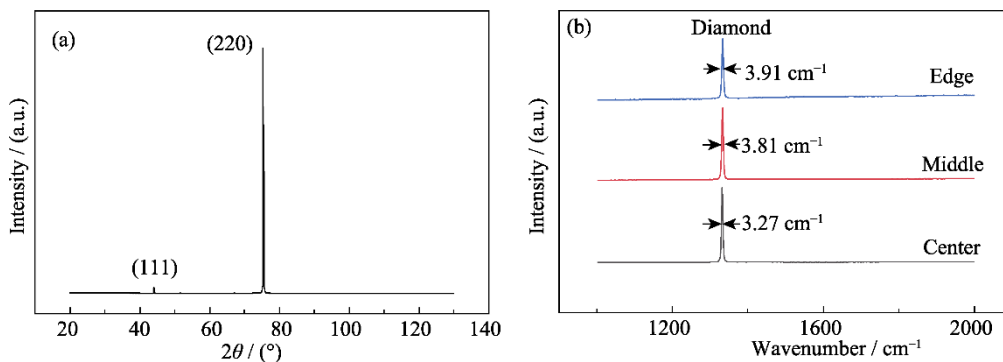


图 8 金刚石膜的(a)XRD 谱图和(b)拉曼光谱图

Fig. 8 XRD pattern (a) and Raman spectra (b) of the diamond films

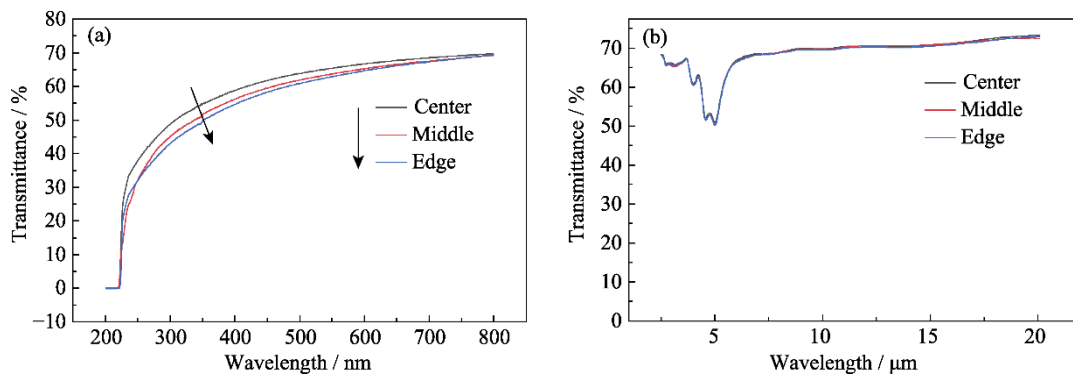


图 9 金刚石膜的(a)紫外-可见透过光谱图和(b)红外透过光谱图

Fig. 9 UV-Vis transmission spectra (a) and IR transmission spectra (b) of the diamond film

Colorful figures are available on website

过率分别为 70.1%、69.9%、69.7%，在 8~12 μm 范围的平均透过率分别为 69.9%、69.7%、和 69.5%，以上结果表明此金刚石膜的厚度和品质都较为均匀，实现了两英寸光学级金刚石膜的均匀沉积。

3 结论

本研究采用微波化学气相沉积法制备 2 英寸光学级金刚石膜，研究沉积台高度对电场均匀性、等离子体状态和温度均匀性的影响，优化工艺参数，确定最佳沉积台高度为 2 mm，最终沉积得到的 2 英寸金刚石膜的中心、中间和边缘的拉曼半峰全宽为 3.27、3.81 和 3.91 cm^{-1} ，可见光波段内最高透过率分别为 69.8%、69.4%和 69.4%，10.6 μm 处的透过率分别为 70.1%、69.9%、69.7%，说明此金刚石膜具有较好的均匀性和品质。结果表明沉积台高度对衬底表面的电场强度分布、等离子体状态和温度分布都有所影响，随着沉积台高度升高，衬底表面的电场均匀性得到了很大的改善，等离子体的形状越来越扁平，衬底表面的 H 原子和含碳基团浓度上升，且温度分布更为均匀。

参考文献:

- [1] GICQUEL A, HASSOUNI K, SILVA F, *et al.* CVD diamond films: from growth to applications. *Current Applied Physics*, 2001, **1(6)**: 479.
- [2] SHEN H J, WANG L J, HUANG J, *et al.* Research for (100)-oriented diamond film radiation detector. *Journal of Inorganic Materials*, 2010, **24(6)**: 1254.
- [3] WANG Y, ZHU J Q, HU Z B, *et al.* Heteroepitaxial growth of single crystal diamond films on iridium: procedure and mechanism. *Journal of Inorganic Materials*, 2019, **34(9)**: 909.
- [4] SU J J, YANG Z, LI Y F, *et al.* Measurement of microwave dielectric properties of diamond films using split-cylinder resonator method. *Journal of Inorganic Materials*, 2015, **30(7)**: 751.
- [5] LIU J L, AN K, CHEN L X, *et al.* Research progress of freestanding CVD diamond films. *Surface Technology*, 2018, **47(4)**: 1.
- [6] THUMM M. Progress on gyrotrons for ITER and future thermonuclear fusion reactors. *Plasma Science, IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, **39(4)**: 971.
- [7] MING Q. D, LI L, FENG J. A study of high-quality freestanding diamond films grown by MPCVD. *Applied Surface Science*, 2012, **258(16)**: 5987.
- [8] TU J, LIU J, YAO L, *et al.* Small-angle X-ray scattering performances of single crystal and polycrystalline diamond windows in a heated environment. *Journal of Materials Science*, 2022, **57(27)**: 12824.
- [9] HAENEN K, LAZEA A, BARJON J, *et al.* Microwave engineering of plasma-assisted CVD reactors for diamond deposition. *Journal of Physics Condensed Matter*, 2009, **21(36)**: 364202.
- [10] LI C M, REN F T, SHAO S W, *et al.* Progress of chemical vapor deposition (CVD) diamond. *Journal of Synthetic Crystals*, 2022, **51(5)**: 759.
- [11] LI Y C, LIU X D, HAO X B, *et al.* Rapid growth of single crystal diamond at high energy density by plasma focusing. *Journal of Inorganic Materials*, 2023, **38(3)**: 303.
- [12] 吕反修. 金刚石膜制备与应用. 北京: 科学出版社, 2014: 136.
- [13] AIELLO G, SCHRECK S, AVRAMIDIS K A, *et al.* Towards large area CVD diamond disks for Brewster-angle windows. *Fusion Engineering and Design*, 2020, **157**: 111818.
- [14] LI Y F, TANG W Z, JIANG L, *et al.* Large area high quality diamond films deposition by 915 MHz high power MPCVD reactor. *Journal of Synthetic Crystals*, 2019, **48(7)**: 1262.
- [15] LI Y F, AN X M, LIU X C, *et al.* A 915MHz/75kW cylindrical cavity type microwave plasma chemical vapor deposition reactor with a ladder-shaped circumferential antenna developed for growing large area diamond films. *Diamond and Related Materials*, 2017, **78**: 67.
- [16] FUENTES-FERNANDEZ E M A, ALCANTAR-PENA J J, LEE G, *et al.* Synthesis and characterization of microcrystalline diamond to ultrananocrystalline diamond films via hot filament chemical vapor deposition for scaling to large area applications. *Thin Solid Films*, 2016, **603**: 62.
- [17] WENG J, LIU F, XIONG L W, *et al.* Deposition of large area uniform diamond films by microwave plasma CVD. *Vacuum*, 2018, **147**: 134.
- [18] SEDOV V, MARTYANOV A, ALTAKHOV A, *et al.* Effect of substrate holder design on stress and uniformity of large-area polycrystalline diamond films grown by microwave plasma-assisted CVD. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2020, **10(10)**: 939.
- [19] ZHANG S, AN K, YANG Z L, *et al.* 100 mm in diameter diamond films with high uniformity prepared by novel deposition mode in MPCVD system. *Vacuum and Cryogenics*, 2022, **28(5)**: 549.
- [20] WANG B, WENG J, WANG Z T, *et al.* Investigation on the influence of the gas flow mode around substrate on the deposition of diamond films in an overmoded MPCVD reactor chamber. *Vacuum*, 2020, **182**: 109659.
- [21] AN K, LIU X P, LI X J, *et al.* Numerical simulation and experimental study of a novel high-power microwave plasma CVD reactor for diamond films deposition. *Journal of Synthetic Crystals*, 2015, **44(6)**: 1544.
- [22] ZHENG K, ZHONG Q, GAO J, *et al.* Effect of gas flow rates on the large area diamond films deposited by TYUT-type MPCVD equipment. *Journal of Synthetic Crystals*, 2016, **45(10)**: 2359.
- [23] LI Y F, SU J J, LIU Y Q, *et al.* A circumferential antenna ellipsoidal cavity type MPCVD reactor developed for diamond film deposition. *Diamond and Related Materials*, 2015, **51**: 24.