

高取向金刚石薄膜的制备

熊礼威, 彭环洋, 汪建华, 崔晓慧, 龚国华

(武汉工程大学 材料科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 目的 研究不同甲烷体积分数、不同氮气流量分别对金刚石(111)面、(100)面生长的影响, 实现在最佳工艺下制备高取向金刚石薄膜。方法 采用微波等离子体增强化学气相沉积法制备高取向(111)面、(100)面金刚石薄膜, 实验前一组(1[#]—3[#])以CH₄/H₂为气源, 后一组(4[#]—5[#])以CH₄/H₂/N₂为气源, 通过采用SEM、XRD分析不同甲烷体积分数下(111)面和不同氮气流量下(100)面的生长形貌、晶粒尺寸以及金刚石晶面特征峰强弱, 同时还使用Raman测试两组分别改变甲烷体积分数、氮气流量工艺下金刚石特征峰、石墨峰的变化趋势。结果 前一组随着甲烷体积分数的增加, 金刚石(111)面逐渐清晰可见, 低甲烷体积分数为2%时, H等离子体对金刚石表面刻蚀严重, 形成少量表面粗糙的(111)面, 当甲烷体积分数升到4.5%时, (111)面生长非常均匀, 金刚石质量较高, 继续提高甲烷体积分数, 薄膜中非金刚石的含量增加, 金刚石质量下降。后一组随着氮气流量的增加, 金刚石(100)面的生长非常整齐平滑, 在氮气流量为5 cm³/min时, (100)面比较粗糙, 由于有含氮基团的加入, 其生长速率加快, 进一步升高氮气流量到10 cm³/min时, 含氮基团的择优生长促进(100)面占据整个界面, 同时削弱了其他晶面的生长。结论 前一组甲烷体积分数为4.5%时, (111)面占据整个生长面, 生长非常均匀, 同时XRD测试金刚石(111)面特征峰也达到最强。后一组氮气流量为10 cm³/min时, (100)面表面光洁度和平整度达到最佳。

关键词: MPECVD; 甲烷体积分数; 氮气流量; 高取向; 金刚石薄膜; 表面形貌

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)11-0010-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.11.002

Preparation of High Oriented Diamond Films

XIONG Li-wei, PENG Huan-yang, WANG Jian-hua, CUI Xiao-hui, GONG Guo-hua

(School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effects of different volume fractions of methane and nitrogen flow rate on diamond (111) and (100) planes, so as to prepare high oriented diamond films under optimal conditions. High oriented diamond films with (111) and (100) planes were prepared by using microwave plasma enhanced chemical vapor phase deposition (MPECVD) method. The previous group (1[#]—3[#]) took CH₄/H₂ as air source before experiment and the latter group (4[#]—5[#]) took CH₄/H₂/N₂ gas as air source after experiment. Growth morphology, grain size and crystalline diamond surface characteristic

收稿日期: 2016-03-23; 修订日期: 2016-08-06

Received: 2016-03-23; Revised: 2016-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51402220); 武汉工程大学青年基金项目(Q201501)

Fund: National Natural Foundation of China(51402220); Wuhan Institute of Technology Youth Fund Project(Q201501)

作者简介: 熊礼威(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为低温等离子技术与薄膜材料。

Biography: XIONG Li-wei(1983—), Male, Ph.D., Associate professor, Research focus: low temperature plasma technology and thin film materials.

peak intensity of (111) plane at different methane volume fractions and (100) plane at different nitrogen flow rates were analyzed by using SEM and XRD. Meanwhile, Raman test was conducted to change variation trend of diamond characteristic peaks and graphitic peaks at different methane volume fractions and nitrogen flow process. With the increase of methane volume fractions, the diamond (111) plane becomes visible in the former group. When the low volume of methane concentration was 2%, the diamond surface was seriously etched by H plasma, little rough (111) plane was formed. When the methane volume fraction amounted to 4.5%, (111) plane growth was very uniform and the diamond was of high quality. As the methane volume fraction was further increased, non-diamond content of the film increased while diamond quality declined. For the latter group, as the nitrogen flow rate increased, diamond (100) plane growth was very smooth and tidy. At a low nitrogen flow rate of 5 cm³/min, (100) plane was relatively rough and the growth rate was accelerated since the added nitrogen containing groups were included. As the nitrogen flow rate was further increased to 10 cm³/min, the whole (100) plane was promoted to occupy the entire interface and growth of other crystal planes were weakened as a result of preferred growth of nitrogenous groups. For the previous group, the (111) plane occupies the entire growth plane with uniform growth and the characteristic peak of diamond (111) plane under XRD test amounts to the maximum as well when the methane volume fraction is 4.5%. For the latter group, surface smoothness and evenness are the best at the nitrogen flow rate of 10 cm³/min.

KEY WORDS: MPECVD; methane volume fraction; nitrogen flow rate; high oriented; diamond film; surface morphology

金刚石具有许多优异性能, 如高硬度 (50~100 GPa), 可应用于切削工具^[1], 保证刀具在高温条件下稳定长久的工作; 摩擦系数低 (0.05~0.1) 可应用于耐磨涂层, 以提高钻头、原子力显微镜探针等使用寿命^[2-3]; 带隙宽度大 (5.45 eV), 电子、空穴迁移率高 (4500 cm²/Vs、3800 cm²/Vs), 击穿场强大 (10⁷ V/cm), 热导率高 (24 W·m⁻¹·K⁻¹) 可作为半导体材料 (二极管、高功率晶体管、MEMS、功率开关等)^[4-7]; 表面声波速率大 (可达 11 000 m/s), 可以制作表面滤波器件^[8]; 化学惰性强, 可用于耐腐蚀涂层^[9]; 光学折射率高^[10] (可达 2.5), 可制备光学窗口等。

目前多数研究人员制取金刚石的晶面主要包括 (111) 面和 (100) 面, (111) 面主要体现其优异的力学性能, 而 (100) 面由于有表面平整度高、内部应力低、缺陷少以及良好的电化学、热传导性能, 因此常被用于半导体材料。

Frenklach 等人^[11]认为金刚石 (111) 面的生长包括两个步骤: 1) 通过萃取金刚石表面碳原子上悬挂的氢原子激活生长 (111) 面, 产生活性位, —CH₃ 等含碳活性基团通过吸附和耦合在活性位上形成晶核; 2) (111) 面沿着 (011) 方向通过吸附—C₂H₂ 进行生长。因此 (111) 面生长过程中的前驱体为—CH₃ 和—C₂H₂, 而在氮气存在的条件下, —CN、—NH 等含氮基团是 (100) 面生长的前驱体。王小安等人^[12]发现在甲烷体积分数、基片温度以及微波功率不变的条件下, 气氛中增加氩

气, C₂ 基团增多并取代了—CH₃ 基团, 薄膜表面平整度增加, 金刚石晶型主要选择 (111) 面生长。(100) 面生长时表面能较高, 对甲烷的浓度也有要求。孙琪等人^[13]在甲烷体积分数为 1% 的条件下制备了晶型很好的 (100) 面, 高甲烷体积分数下的气氛中融入氧气的体积分数为 0.5% 时, (100) 面变得非常平整且光洁度高, 这是由于氧气的添加提高了 OH 基团和 O 的含量, 增强了对非金刚石相的刻蚀作用, 提高了金刚石的质量。

本实验采用 MPECVD 法制备高取向度金刚石薄膜, 通过改变不同 CH₄/H₂ 比值和氮气流量来获得高取向度 (111) 和 (100) 晶面, 并对其形成 (111) 面和 (100) 面的机理进行分析。实验结果采用 SEM 对金刚石形貌进行分析, XRD 测试不同甲烷体积分数以及不同氮气流量条件下生长金刚石特征晶面的强弱, Raman 分析金刚石特征峰的变化趋势。另外, 实验过程中前一组甲烷体积分数未高于 4.5%, 后一组氮气流量未高于 10 cm³/min, 是由于此时金刚石 (111) 面、(100) 面变得非常粗糙模糊, 因此没有分析更大参数下的金刚石晶面取向。

1 实验

1.1 样品的制备

实验采用 p 型 (100) 单晶硅片作为衬底, 采用韩国 Woosinent 公司制造的型号为 R2.0 的 CVD

设备制取高平整度、高取向 (111)、(100) 晶面的金刚石薄膜。实验开始前主要是进行衬底的制备过程, 首先用金刚石切割笔将单晶硅片切成 5 个 1 cm×1 cm 大小的样品, 标记为 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]、5[#], 然后在磨砂革抛光垫上对其进行研磨, 边研磨边在抛光垫上涂覆金刚石悬浮液, 这样有利于在硅片表面形成划痕, 并且有部分划痕中会残存一些金刚石晶籽, 研磨 30 min 后, 在硅片上可看到细小均匀的划痕, 最后将研磨好的硅片在丙酮溶液中超声清洗 15 min, 对其用 N₂ 吹干待用。

1.2 工艺条件

采用 MPCVD 法在单晶硅片上沉积金刚石薄膜, 微波功率为 5 kW, 基底温度变化范围为 700~850 ℃, 以甲烷和氢气为气源, 在实验过程中还会添加少量 N₂, 因为 N₂ 的加入会增加金刚石 (100) 晶面^[14]。实验过程分为两组 (1[#]—3[#]为一组, 4[#]—5[#]为另一组), 为了探讨实验的单一量改变原则, 前一组只改变甲烷体积分数, 后一组只改变氮气流量, 其他工艺见表 1。

表 1 两组不同工艺参数

Tab.1 Two groups of different process parameters

Num-ber	$Q(\text{CH}_4)/(\text{cm}^3\cdot\text{min}^{-1})$	$Q(\text{H}_2)/(\text{cm}^3\cdot\text{min}^{-1})$	$Q(\text{N}_2)/(\text{cm}^3\cdot\text{min}^{-1})$	Power /kW	Hour /h	Sub-strate $\theta/^\circ\text{C}$
1 [#]	4	200	0	2.5	10	800
2 [#]	6	200	0	2.5	10	800
3 [#]	9	200	0	2.5	10	800
4 [#]	12	200	5	3.5	10	800
5 [#]	12	200	10	3.5	10	800

2 结果与分析

2.1 扫描电子显微镜(SEM)分析

不同甲烷体积分数对金刚石晶面生长有很大影响, (111) 面形成过程所需要的表面能低。甲烷体积分数较低时, H 等离子体相对较多, 甲烷进入腔体后立即被分解为含碳的活性基团, 这些活性基团 (—CH、—CH₂、—CH₃) 在衬底表面发生简单的吸附、反弹、反应以及吸附混合等作用, 此时在形成的膜层中, 有很多碳原子包覆一个氢原子并将氢原子作为其配位原子, 此过程表现为吸附生长模式, 最后导致其层与层的堆积方式为锥形, 而(100)

面的生长过程需要较高的能量, 此时碳原子的配位原子氢与其他含碳活性基团中的氢相结合, 释放出氢气, 该过程有能量的释放, 有助于碳与碳原子层以横向堆积方式生长。

图 1 是不同甲烷体积分数条件下生长的金刚石 (111) 晶面的 SEM 图像, 图 1a 为甲烷体积分数为 2%条件下生长的金刚石薄膜, 晶粒尺寸大小不一, 表面粗糙度不均匀, 晶型杂乱无章, 不过还是有少许的 (111) 面清晰可见。当甲烷体积分数上升到 3%时, 原先杂乱无章的棱角逐渐消失, 进而被 (111) 面所取代, 锥面与锥面之间还有许多较小的锥角, 增大甲烷体积分数至 4.5%时, 整个界面大部分被 (111) 面所吞噬, 如图 1b。为了进一步探讨金刚石质量, 还对该条件下生长的金刚石薄膜的横截面进行扫描, 如图 1c, 可以看出明显的柱状结构。刘聪等人^[15]认为甲烷体积分数和基片温度表现出一种耦合效应, 但在高甲烷体积分数条件下, 金刚石形貌随基底温度的变化非常明显, 而高甲烷体积分数和衬底的温度选择范围较窄。因此, 选择最合适的衬底温度为 800 ℃时, 甲烷体积分数的影响起主导作用, 在低甲烷体积分数条件下, 氢等离子体刻蚀速率接近金刚石的生长速率, 导致 (100) 面生长缓慢, 而 (100) 面的表面能高于 (111) 面, 根据能量最低生长原则可知, 在低能量条件下开始生长的是 (111) 面, 而在高甲烷体积分数下, 薄膜生长取向很强, 由于微波能量不足, 氢等离子体刻蚀速度慢, 金刚石二次形核率高, 含碳活性基团大多朝着能量低的 (111) 面进行堆积生长, 在甲烷体积分数为 4.5%时具有很好的 (111) 面出现。

在前面实验条件的基础上, 进一步增加甲烷体积分数到 6%, 并提高功率到 3.5 kW, 添加不同气体流量的氮气进行 (100) 面生长, 4[#]生长时加入的氮气流量为 5 cm³/min, 生长结果在 SEM 上观察 (如图 1d)。随着甲烷体积分数的增加, 二次形核率提高, 一方面氢气刻蚀速度减小, 来不及刻蚀形核生长的金刚石, 另一方面二次形核的碳原子吸附其它的含碳基团或碳原子而进一步生长, 阻止了晶粒的进一步长大, 由图 1d 可知, 有些颗粒进入了纳米范畴, 有少许立方晶块平面形成, 但均匀度不够, 总体比较杂乱, 加入氮气流量为 10 cm³/min 时, (100) 面非常清晰, 如图 1e。翁俊等人^[16]认为, 在高氮气流量条件下, 衬底上的碳过饱和度增

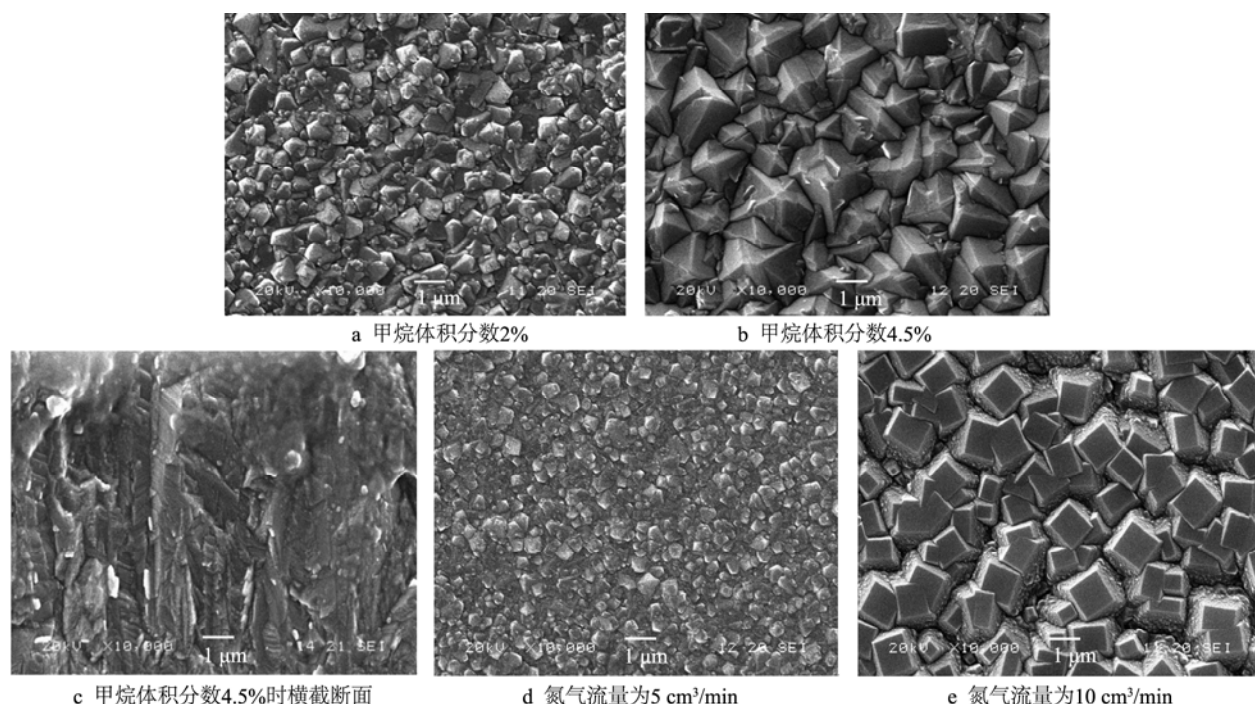


图 1 不同甲烷体积分数条件下生长金刚石 (111) 面 and 不同氮气流量下金刚石 (100) 面

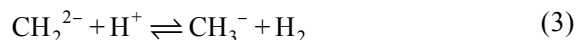
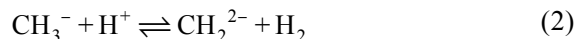
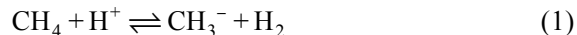
Fig.1 Methane with different volume concentration under the conditions of growth of diamond (111) planes: a) the volume of methane concentration of 2%, b) methane concentration of 4.5%, where c) 4.5% of methane concentration volume of cross section of the graph) and different nitrogen flow under the diamond (100) surface; d) nitrogen flow 5 cm³/min and e, nitrogen flow 10 cm³/min

强了二次形核率, 提高了 H 等离子体的刻蚀作用, 从而增加了形核点和二次形核点中 sp² 相的含量。侯雪等人^[17]还发现随着氮气的增加, 金刚石的生长速率先增加后减小。通过 XPS 图谱分析得知, 当氮气流量增加时, 金刚石的 sp²C—C 键的特征峰在增加, 而 sp³C—C 键的特征峰保持不变, sp²C—N 键、sp²C—O 键逐渐增强, 说明薄膜中非金刚石含量增加, 金刚石质量下降。加入氮气后, 金刚石主要选择 (100) 面生长的原因是: 反应结合生成的 NH_x、HCN_x 等含氮基团由于具有很低的脱附率而与金刚石表面的氢发生萃取作用, 而这些含氮基团的选择性吸附, 导致 (100) 面的生长速率比其它晶面的生长速率快, 另外, 吸附这些含氮基团在 (100) 面上很容易发生化学反应, 并且可以产生更多的表面活性位。但是氮气流量较高时, 金刚石晶粒尺寸会减小至纳米尺寸, 由之前的 (111) 面转换成 (100) 面, 如果氮气流量过高, 金刚石表面含有的 sp²C—N 键会增加, 非金刚石含量提高导致金刚石质量下降。

2.2 XRD 分析

一般 XRD 设备可以测试的角度范围可以在 0°~150°, 由图 2 可知, 1[#]—5[#]为不同甲烷体积分数

条件下 (2%~6%) 所得到的 XRD 表征图谱, 44.9°、75.2°、91.5°、119.6°分别为金刚石 (111)、(220)、(311)、(400) 特征峰, 另外, 4[#]、5[#]在生长过程中加入了氮气, 其流量分别为 5 cm³/min 和 10 cm³/min, 生长时间为 10 h, 功率一直维持在 3.5 kW。对于样品 1[#]—3[#], 为了排除其他因素的影响, 保证基片温度为 800 °C, 微波功率维持在 2.5 kW, 样品 3[#]在 44.9°处显示 (111) 面的特征峰, 整体随着甲烷体积分数的上升, (111) 面的特征峰强度逐渐增大, 在低甲烷体积分数条件下, 形成 (111) 面的表面能较低, 为 5.7 J/m², 含碳基团—CH、—CH₂、—CH₃ 的浓度较低时, 金刚石薄膜生长的速度慢, 此时主要生长的是 (111) 面, 热力学占主导。朱宏喜^[18]认为高甲烷体积分数时含碳活性基团增强, 主要的发生的反应为:



由于动力学作用, (100) 面的生长速率远大于 (111) 面, (100) 面的生长大量消耗了 CH₂²⁻基团, 妨碍了反应 (3) 的进行, 导致 CH₃⁻含量减小, 造成 (111) 面的生长速率减慢甚至停止。而金刚石 (220) 特征峰随着甲烷体积分数的上升变化明显

增强, (311)、(400) 特征峰强弱几乎没有改变。对于样品 4[#]—5[#], 甲烷体积分数提高到 6% 时, 金刚石 (111) 的特征峰有减弱的趋势, 而 (100) 的特征峰明显增强, 这与朱宏喜等人的结论——(100) 面强度增加, (111) 面强度减弱相一致。在气氛中添加氮气有利于 (100) 面的生长, 低氮气流量时, 生成的—CN 基团对氢的萃取能力强, 并形成生长活性位, 提高了金刚石的生长速率, 另外还会生成稳定的 HCN 分子, 由于分子中 H—C 键能比 H—H 的高, 在高氮气流量条件下, 大量相邻的—CN、—NH 表面悬挂键生成, 造成 CH₃ 基团来不及补充, 最后在含氮基团的促进下, (100) 面被保存下来, 而其他晶面都被削弱。然而在不同甲烷体积分数条件下, 根据谢乐公式 $d = k\lambda / B \cos\theta$ (其中 $k=0.89$, λ 为波长, B 为半高宽, θ 为衍射角度) 可以计算样品的晶粒尺寸大小, 1[#]—3[#] 样品随着甲烷体积分数的增大, 半高宽在逐渐减小, 可知其晶粒尺寸在变大, 而 4[#]—5[#] 样品的晶粒尺寸在减小。

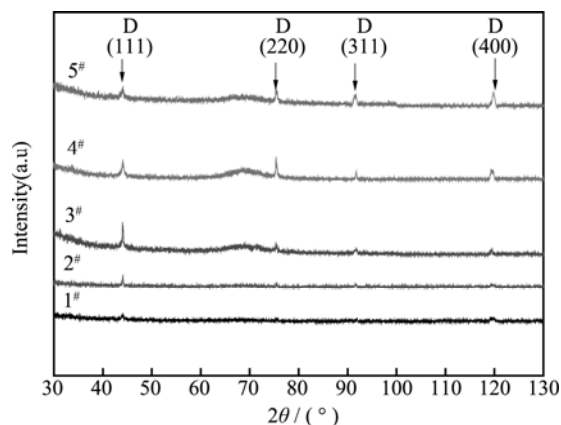


图 2 各样品的 XRD 图谱

Fig.2 Samples of different methane volume concentrations in the XRD map

2.3 拉曼 (Raman) 分析

在不同甲烷体积分数和不同氮气流量条件下, 采用 Renishaw RM 1000 型激光拉曼光谱仪对两组不同的样品进行测试, 并探讨薄膜中金刚石相和非金刚石相的变化趋势。由图 3 可知, 两组样品在 520 cm⁻¹ 处都有微弱的峰, 为硅峰, 说明沉积的薄膜不厚, 样品 1[#]—3[#], 甲烷体积分数从 2% 增加到 4.5%, 其金刚石特征峰 1332 cm⁻¹ 逐渐减弱, 石墨峰 1550 cm⁻¹ 有所增强, 这是由于低甲烷体积分数下, H 等离子体对 sp² 键以及 sp³ 键都有刻蚀, 但对 sp² 键刻蚀速度更快, 此时组成金刚石的 sp³ 键

多, 金刚石纯度高, 金刚石特征峰 1332 cm⁻¹ 比较尖锐。而甲烷体积分数较高 (4.5%) 时, H 等离子体来不及刻蚀多余的非金刚石相和金刚石相, 在金刚石表面发生二次形核, 所以 3[#] 样品在 1550 cm⁻¹ 石墨峰较强, 虽然金刚石质量下降了, 但表面能不高能够促使 (111) 面生长。4[#]—5[#] 样品添加氮气后, 金刚石特征峰 1332 cm⁻¹ 明显减弱, 石墨峰 1550 cm⁻¹ 增强, 说明氮气的加入促进了金刚石的生长速率, 但薄膜中非金刚石含量在增加。当甲烷体积分数为 6%、氮气流量为 10 cm³/min 时, 样品 5[#] 出现了 1470 cm⁻¹ 峰, 大多数学者认为该峰为 NCD 特征峰, 从图 1e 可以看出, 薄膜中有部分晶粒尺寸达到了纳米级, 而此时高氮气流量下必定会增加—CN、—NH 等含氮基团, 这些基团促进了 (100) 面的生长。

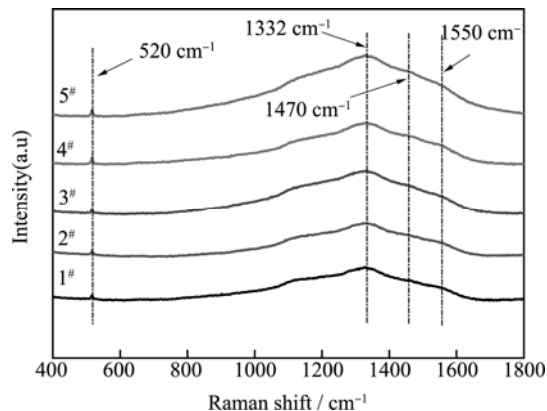


图 3 各样品的 Raman 图谱

Fig.3 Samples of different methane volume concentrations in the Raman map

3 结语

1) 保持衬底温度、微波功率以及生长时间不变的前提下, 样品 1[#]—3[#] 改变甲烷的体积分数, 其变化范围为 2%~4.5%, 结果发现甲烷体积分数在 4.5% 时, 金刚石 (111) 面在 SEM 图中清晰可见。低甲烷体积分数下, H 等离子体刻蚀作用强, 阻碍了 (100) 面的生长。另外 (111) 面的表面能比 (100) 面低, 因此 (111) 面的前驱体—CH₃、—C₂H₂ 等含碳活性基团在萃取形成的表面活性位上生长晶核, 最终以“锥形”堆积方式生长。高甲烷体积分数时, 由于设定微波功率为 2.5 kW, 导致能量不够, 不足以完全分解甲烷, 金刚石表面能量低, 促进 (111) 面进一步生长。甲烷体积分数过大, 非金刚石含量提高, (111) 面开始有高分子聚合物生成

或二次形核严重。经过 XRD 测试分析得出,随着甲烷体积分数的增加,金刚石特征峰(111)面逐渐增强,在甲烷体积分数为 4.5% 时达到最大,而 Raman 分析也可以验证这一结果,在甲烷体积分数达到 4.5% 时,金刚石特征峰 1332 cm^{-1} 最尖锐。

2) 样品 4[#]—5[#] 在生长过程中加入氮气,保证微波功率为 3.5 kW,基底温度为 800 °C,生长时间为 10 h,甲烷体积分数为 6% 不变,通过改变氮气流量,结果发现氮气流量在 $10\text{ cm}^3/\text{min}$ 时生长出很好的(100)面。通过 XRD 测试得知,随着氮气流量的增加,微波能量增大,但是(111)面的特征峰强度比前一组的(111)面特征峰强度低,而金刚石特征峰(100)面随氮气流量大增加逐渐增强,这是由于氮气的融入,增加了—NH、—CN 等含氮活性基团,其对金刚石表面的氢原子的萃取作用增加,导致了金刚石表面活性位大量生成,另外还减少了形成(111)面前驱体—CH₃基团的含量,促进了(100)面的生长。最后通过 Raman 分析得出,氮气流量为 $10\text{ cm}^3/\text{min}$ 时出现微弱的纳米金刚石特征峰 1470 cm^{-1} ,说明氮气的加入可以提高金刚石的生长速率。

参考文献

- [1] 聂励鹏. 钎焊金刚石钻孔工具加工高硬度工程陶瓷的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2011.
NIE Li-peng. Study on High Hardness Engineering Ceramics with Diamond Drilling Tools[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2011.
- [2] ZENG Hong-jun, ANDREW RK, NICOLAIE M, et al. Boron-doped Ultrananocrystalline Diamond Synthesized with An H-rich/Ar-lean Gas System[J]. Science Direct, 2015, 84: 103—117.
- [3] ALEXANDER E, WALDEMAR S, STEFAN F, et al. Atomic Force Microscopy Probes with Integrated Boron Doped Diamond Electrodes: Fabrication and Application [J]. Electrochemistry Communications, 2012, 25: 30—34.
- [4] LIU J L, LI C M, ZHU R H, et al. RF Characteristic of MESFET on H-terminated DC Arc Jet CVD Diamond Film[J]. APPL SURF, 2013, 284: 798—803.
- [5] WANG J J, HE Z Z, YU C, et al. Rapid Deposition of Polycrystalline Diamond Film by DC Arc Plasma Jet Technique and Its RF MESFETs[J]. Diamond & Related Materials, 2014, 43: 43—48.
- [6] JING Chun-zhang, JERRY W Z, ROGER T H, et al. Characterization of Boron-doped Micro- and Nanocrystalline Diamond Films Deposited by Wafer-scale Hot Filament Chemical Vapor Deposition for MEMS Applications[J]. Diamond & Related Materials, 2008, 17(1): 23—28.
- [7] DIMITRE I, VERENA Z, WILFRIED P, et al. Processing of Nanoscale Gaps for Boron-doped Nanocrystalline Diamond Based MEMS[J]. Procedia Engineering, 2014, 84: 903—906.
- [8] 鲍帅. 声表面波 MEMS 器件研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2012.
BAO Shuai. Surface Acoustic Wave MEMS Device Research [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2012.
- [9] 张东灿. 金刚石薄膜和类金刚石薄膜摩擦学性能试验及其应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
ZHANG Dong-can. Study on the Tribological Properties of Diamond Films and Diamond Films and Their Applications [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [10] SOBASZEK M, SKOWROŃSKI Ł, BOGDANOWICZ R, et al. Optical and Electrical Properties of Ultrathin Transparent Nanocrystalline Boron-doped Diamond Electrodes [J]. Optical Materials, 2015, 42: 24—34.
- [11] MICHAEL F, CHARLES A. Nucleation of Soot: Molecular Dynamics Simulations of Pyrene Dimerization[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(2): 2307—2314.
- [12] 王小安, 汪建华, 吕琳, 等. 高浓度氩气对金刚石膜的质量、晶粒尺寸和硬度的影响[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2015(5): 20—24.
WANG Xiao-an, WANG Jian-hua, LYU Lin, et al. Effect of High Concentration Argon Gas on the Quality, Grain Size and Hardness of Diamond Films[J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2015(5): 20—24.
- [13] 孙祁, 汪建华, 翁俊, 等. MPCVD 快速制备(100)面金刚石薄膜[J]. 硬质合金, 2013(1): 8—13.
SUN Qi, WANG Jian-hua, WENG Jun, et al. MPCVD Fast Preparation (100) Surface Diamond Film [J]. Cemented Carbide, 2013(1): 8—13.
- [14] 李灿华, 廖源, 常超, 等. 氮气氛下(100)织构金刚石薄膜的成核与生长研究[J]. 物理学报, 2000(9): 1756—1763.
LI Dong-can, LIAO Yuan, CHANG Chao, et al. Study on Nucleation and Growth of (100) Textured Diamond Films Under Nitrogen Atmosphere[J]. Journal of Physics, 2000(9): 1756—1763.
- [15] 刘聪, 汪建华, 翁俊, 等. 高质量高取向(100)面金刚石膜的可控性生长[J]. 物理学报, 2015(2): 374—381.
LIU Cong, WANG Jian-hua, WENG Jun, et al. Controlled Growth of Diamond Films with High Quality and High Orientation (100)[J]. Journal of Physics, 2015(2): 374—381.
- [16] 翁俊, 刘繁, 孙祁, 等. 氮气体积分数对高微波功率沉积金刚石膜的影响[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2015(3): 23—28.
WENG Jun, LIU Fan, SUN Qi, et al. Effect of Nitrogen Volume Concentration on the Deposition of Diamond Films with High Microwave Power[J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2015(3): 23—28.
- [17] 侯雪. 氮气对 DC-PCVD 法制备金刚石膜的影响及金刚石膜的生长特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
HOU Xue. Effect of Nitrogen on Diamond Films Prepared by DC-PCVD Method and Growth Characteristics of Diamond Films[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [18] 朱宏喜, 毛卫民, 冯惠平, 等. 甲烷浓度对 CVD 金刚石薄膜晶体生长过程的影响[J]. 无机材料学报, 2007(3): 570—576.
ZHU Hong-xi, MAO Wei-min, FENG Hui-ping, et al. Effect of Methane Concentration on the Long Process of CVD Diamond Thin Film Crystal[J]. Journal of Inorganic Materials, 2007(3): 570—576.