

表面功能化

纳米金刚石 TiV 色心的实验制备与性能研究

谭心, 徐宏飞, 孟可可

(内蒙古科技大学 机械工程学院, 包头 014010)

摘要: **目的** 利用磁控溅射辅助微波等离子体化学气相沉积技术制备钛掺杂纳米金刚石薄膜。**方法** 预先通过磁控溅射在石英玻璃基底上沉积纳米钛颗粒, 然后使用微波等离子体化学气相沉积 (MPCVD) 设备在其表面沉积金刚石薄膜, 通过活性氢原子将钛带入含碳生长基团中, 从而将钛掺入纳米金刚石薄膜内。使用 X 射线光电子能谱 (XPS)、拉曼光谱 (Raman)、原子力显微镜 (AFM) 和共聚焦显微拉曼光谱仪对钛掺杂纳米金刚石薄膜的化学组成、表面形貌和钛色心光致发光性能进行分析。**结果** 上述实验方法可以将钛掺杂到金刚石薄膜中, 进而影响金刚石薄膜的微观结构和表面形貌。利用 XPS 对实验中经过 MPCVD 沉积前后钛元素的键能详细地做了对比分析, 预溅射钛的 XPS 能谱在 458 eV 和 464 eV 处出现明显的峰值, 符合氧化钛的能谱, 而经过 MPCVD 沉积金刚石薄膜后钛元素的峰值发生了移动, 在 454 eV 和 460 eV 处, 表明钛成键发生了改变; 通过 Raman 检测发现钛的掺入导致 G 峰的强度增加; AFM 表明纳米金刚石薄膜掺钛后表面粗糙度由 13.8 nm 下降到 6.69 nm; 通过荧光检测首次观察到了钛掺杂纳米金刚石薄膜在 540 nm 和 760 nm 附近的光致发光现象。**结论** 掺杂钛可细化金刚石晶粒, 同时会增加石墨相, 并降低其表面粗糙度。光致发光光谱表明钛掺杂金刚石薄膜中存在 TiV⁰ 色心。这为金刚石过渡金属色心的制备提供了研究基础。

关键词: 磁控溅射; 化学气相沉积; 钛掺杂金刚石; 色心; 光致发光

中图分类号: O77+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)03-0192-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.03.020

Experimental Preparation and Performance Research of
Nano-Diamond TiV Color Center

TAN Xin, XU Hong-fei, MENG Ke-ke

(School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare titanium-doped nano-diamond films by magnetron sputtering assisted microwave plasma chemical vapor deposition technology. Nano titanium particles were deposited on the quartz glass substrate by

收稿日期: 2021-04-16; 修订日期: 2021-08-09

Received: 2021-04-16; Revised: 2021-08-09

基金项目: 国家自然科学基金 (61765012); 国家重点研发项目 (2017YFF0207200、2017YFF0207203); 内蒙古自然科学基金 (2019MS05008); 内蒙古自治区科技创新指导项目 (2017CXYP-2、KCBJ2018031)

Fund: National Natural Science Foundation of China (61765012); National Key Research and Development Program of China (2017YFF0207200, 2017YFF0207203); Natural Science Foundation of Inner Mongolia (2019MS05008); Inner Mongolia Autonomous Region Science and Technology Innovation Guidance Project (2017CXYP-2, KCBJ2018031)

作者简介: 谭心 (1974—), 女, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为纳米金刚石色心单光子源。

Biography: TAN Xin (1974—), Female, Doctor, Doctoral supervisor, Mainly engaged in the research of nano-diamond color center single photon source.

引文格式: 谭心, 徐宏飞, 孟可可. 纳米金刚石 TiV 色心的实验制备与性能研究[J]. 表面技术, 2022, 51(3): 192-198.

TAN Xin, XU Hong-fei, MENG Ke-ke. Experimental Preparation and Performance Research of Nano-Diamond TiV Color Center[J]. Surface Technology, 2022, 51(3): 192-198.

magnetron sputtering. Then, microwave plasma chemical vapor deposition (MPCVD) device was used to deposit a diamond film on the surface and the titanium was integrated into the carbon-containing growth group through active hydrogen atoms. Thus, titanium was incorporated into the nano-diamond film. X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), Raman spectroscopy (Raman), atomic force microscope (AFM) and confocal Raman microscopy were used to analyze the chemical composition, surface morphology and titanium color center photoluminescence properties of the titanium-doped nano-diamond films. The aforementioned experimental method doped titanium into the diamond film, thereby affecting the microstructure and surface morphology of the diamond film. XPS was used to conduct a detailed comparative analysis of the bond energy of titanium before and after MPCVD deposition in the experiment. The XPS energy spectrum of pre-sputtered titanium had obvious peaks at 458 eV and 464 eV, which was consistent with the energy spectrum of titanium oxide, while the peak of the titanium element shifted to 454 eV and 460 eV after the diamond film deposited by MPCVD, indicating that the titanium bonding changed. According to the Raman test, the incorporation of titanium caused the intensity of the G peak to increase. AFM showed that after the nano-diamond film doped with titanium, the surface roughness decreased from 13.8 nm to 6.69 nm. The photoluminescence phenomenon of titanium-doped nano-diamond film near 540 nm and 760 nm was observed for the first time by fluorescence detection. Doping titanium can refine the diamond grains, increase the graphite phase, and reduce the surface roughness. The photoluminescence spectrum indicates the existence of the TiV^0 color center in the titanium-doped diamond film. The work provides a research foundation for the preparation of diamond transition metal color centers.

KEY WORDS: magnetron sputtering; chemical vapor deposition; titanium doped diamond; color center; photoluminescence

金刚石具有优异的力学、电学、光学、热学和声学等性能,使其在诸多领域展现出重要的应用价值^[1]。金刚石本身存在许多光学活性的缺陷,能在禁带内电子跃迁时吸收或放出光线,从而形成色心^[2-3]。基于金刚石色心的单光子源在室温下发光明亮、稳定,具有自旋可操控性和生物兼容性等优点,其在量子信息技术、量子探测、生物探测及标记等诸多领域都具有广阔的应用前景。现已知的金刚石色心有 500 多种,但适合作为单光子源使用的金刚石色心不足 10 种,常见的有 NV 色心^[4-5]、SiV 色心^[6-7]等。研究表明,在金刚石中掺杂过渡金属元素也可制备色心,如 Cr、Ni、Co 等可能被引入金刚石晶格中,并与空位或者其他杂质缺陷形成配合物,这些缺陷或配合物可以形成电学或者光学中心^[8]。金刚石 Cr 相关色心在室温下具有窄带宽发射,显示出位于 749 nm 处的荧光峰,其全高半宽 (FWHM) 仅为 4 nm,表示其荧光集中于零声子线 (ZPL) 附近^[9]。Ni 相关金刚石色心中,NE8 显示出单光子发射的特性,具有三能级的发射系统,荧光波长位于近红外区域,ZPL=793 nm,展现出尖锐的荧光峰,荧光发射大部分集中于 ZPL 附近^[10]。过渡金属相关色心具有明亮、独特的发光峰,其 d 轨道电子排布的多样性为相干自旋操纵提供了极大的自由度^[11],使得金刚石过渡金属色心成为未来量子光学和生物成像应用中越来越重要的研究目标。

近年来,研究者针对金刚石过渡金属色心开展了大量的研究工作。实验研究发现,过渡金属钛可以掺入金刚石晶格中^[12]。同时,在金伯利岩矿中的金刚石样本中观察到钛相关缺陷的发光,并给出可能存在的结构^[13-14],其中 N3 和 OK1 是 2 种含钛的金刚石缺陷

中心,其对应的荧光光谱分别在 503.4 nm 和 440.3 nm 处^[13]。相关理论计算^[15-17]确定了金刚石薄膜中几种钛相关的色心结构和 ZPL,其中 N3 和 OK1 这 2 种结构对应 Ti-N^0 和 TiV-N^0 ^[16],理论计算结果与金伯利岩矿检测值相吻合。在理论计算钛掺杂金刚石不同结构的 ZPL 中仍然存在未被实验证实的钛相关色心,如在实验研究中未发现钛掺杂金刚石薄膜存在 TiV^0 色心结构^[16]。

微波等离子体化学气相沉积方法具有可控性好且洁净度高等优点,成为制备高品质金刚石薄膜的首选方法^[18-20]。文中使用固态掺杂源,利用微波等离子体刻蚀预先通过磁控溅射沉积在石英玻璃表面的纳米钛颗粒,将钛原子引入化学气相沉积金刚石薄膜中,制备钛掺杂金刚石色心,研究金刚石钛色心的光致发光行为。

1 实验

采用石英玻璃片 ($\phi 50 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$) 作为基底。为了对比分析,开展了 3 个对照组实验,分别记为样品 1—3。首先,利用磁控溅射在样品 1 的石英玻璃表面预沉积过渡金属钛。沉积参数:溅射功率为 40 W,时间为 1 min,压强为 1 Pa,真空度为 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa}$,靶材为纯度 99.99% 的钛靶。然后,对样品 1—3 的基体进行植晶处理。植晶方法:将基体放入预先配置好的体积分数为 1% 的金刚石悬浊液(金刚石直径为 3 nm)中超声波震荡 40 min,取出后使用无水乙醇清洗,并吹干备用。最后,将样品 1 和 2 并列放入 MPCVD 沉积腔中,将样品 3 单独放入沉积腔中,分别利用微波等离子体化学气相沉积系统制备金刚石薄膜。沉积参数:基体温度为 900 °C,微波功率为 1200 W, H_2/CH_4 体系

中 CH_4 的体积分数为 1%，总气体通量为 250 mL/min，气压维持在 4 kPa 左右，沉积时间为 45 min。沉积结束后，随炉降至室温后取出。

使用 X 射线光电子能谱 (XPS) (Escalab 250Xi, Thermo Fisher Scientific, USA) 和拉曼光谱 (Raman) (inVia Qontor, Renishaw, UK) 对金刚石薄膜的化学成分和键结构进行分析。使用原子力显微镜 (AFM) (Dimension Edge, Bruker, Germany) 对金刚石薄膜的表面形貌进行表征，测量时采用敲击模式，探针型号为 NCHV。使用共聚焦显微拉曼光谱仪 (Raman) (inVia, Renishaw, UK) 对金刚石薄膜的光致发光光谱进行分析。

2 结果与讨论

2.1 磁控溅射预沉积钛

为了尽可能减少金刚石中钛的掺杂量，在实验中控制好磁控溅射功率和时间，在石英玻璃基体沉积少量的纳米钛颗粒^[21-23]。石英玻璃基体上磁控溅射沉积钛的 AFM 扫描结果见图 1。从图 1 中可以看出，石英玻璃基体表面（暗色区域）均匀散布着一些明亮的纳米颗粒，这些颗粒的平均高度约为 40 nm，平均直径约为 150 nm，且颗粒在石英玻璃基体表面呈非连续

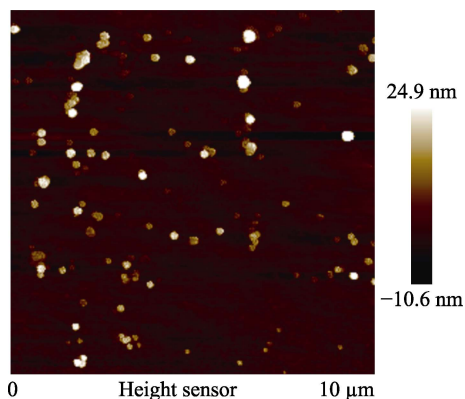


图 1 石英玻璃上溅射钛的 AFM 图
Fig.1 AFM image of sputtered titanium on quartz glass

分布。另外，实验发现磁控溅射沉积钛的石英玻璃片呈灰蓝色，但仍然是透明的，说明磁控溅射钛并没有在石英玻璃基底上形成一层致密的薄膜。

磁控溅射钛的石英玻璃表面 Ti 2p 的 XPS 能谱见图 2。Ti 2p 高分辨电子能谱信号的出现证明上述 AFM 图中观察到的纳米颗粒为过渡金属钛。从图 2 中可以看出，峰位于 458 eV 和 464 eV 处键能分别属于 Ti 2p_{3/2} 和 Ti 2p_{1/2} 轨道，这说明钛是以 Ti⁴⁺ 的形式存在于 TiO₂ 晶格中^[22]。由于磁控溅射钛纳米颗粒具有极大的表面积，且金属钛易氧化，因此从真空室取出后便与空气中的氧气接触，形成了 TiO₂。

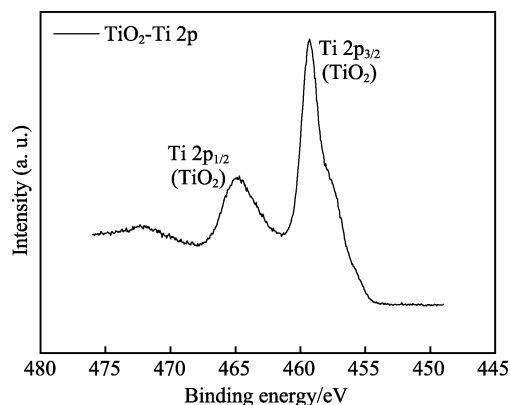


图 2 石英玻璃基底上磁控溅射 Ti 的 XPS 能谱
Fig.2 XPS spectrum of magnetron sputtered Ti on quartz glass substrate

2.2 微波等离子体化学气相沉积金刚石薄膜

拉曼检测是金刚石薄膜的重要表征方法。3 组 MPCVD 沉积薄膜样品的拉曼光谱见图 3。

从图 3 中可以看出，所有薄膜在 532 nm 处激光的激发下呈现出 2 个明显的拉曼散射峰，即在 1332 cm⁻¹ 附近的金刚石峰和 1580 cm⁻¹ 附近的石墨 (G) 峰^[24]。这属于典型的纳米金刚石拉曼特征，说明 MPCVD 沉积薄膜为纳米晶金刚石薄膜。不同金刚石薄膜特征峰频移可能是由于钛的掺入，导致薄膜内应力发生了变化^[25-27]。另外发现，相对于样品 1 和 2，样品 3 的金刚石特征峰明显更加尖锐，这意味着掺杂了过渡金属

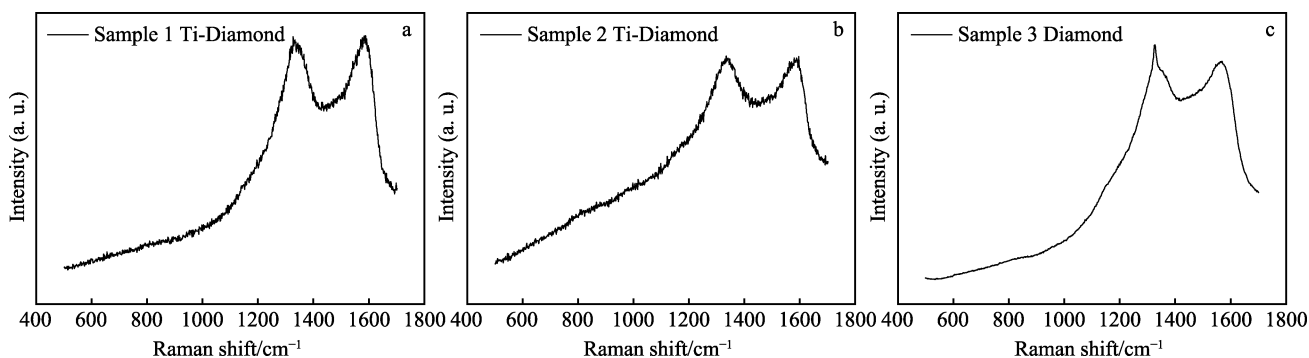


图 3 实验制备金刚石薄膜样品 1、2、3 (a、b、c) 的拉曼光谱
Fig.3 Raman spectra of experimentally prepared diamond film samples 1, 2 and 3 (a, b, c)

钛, 样品 1 和 2 具有比样品 3 更小的晶粒度或者更多的 sp^2 相。

不同金刚石薄膜 C 1s 的 XPS 图谱见图 4。对 C 1s 峰进行高斯-洛伦兹拟合, 将其分峰拟合为 2 个不同的峰位, 即位于 284 eV 的 sp^2 -C 和位于 285 eV 的 sp^3 -C, 如图 4a—c 所示。通过计算 2 个拟合峰的积分面积, 即 sp^2 -C/ sp^3 -C, 得到金刚石薄膜中石墨相与金刚石相的比例, 样品 1 为 0.53, 样品 2 为 0.62, 样品 3 为 0.46。由此可进一步证明, 掺杂钛可减小化学气相沉积金刚石的晶粒, 晶粒减小的同时使金刚石的晶界增多, 晶界处碳原子排列混乱且多为 sp^2 杂化态, 由此导致金刚石中石墨相的增加。

不同金刚石薄膜 Ti 2p 的 XPS 图谱见图 5。如图 5 所示, 样品 1 和 2 均探测到了 Ti 2p 高分辨电子能

谱信号, 且样品 1 的强度更高, 而样品 3 没有掺杂钛元素。样品 2 的基体并没有进行磁控溅射钛, 金刚石薄膜中钛是在薄膜生长过程中, 活性 H 原子将样品 1 上的钛带入生长基团中, 然后通过分子热运动到样品 2 的金刚石薄膜中, 因此样品 2 的含钛量较低。对样品 1 的 Ti 2p 峰进行高斯-洛伦兹拟合, 将其分峰拟合为 4 个不同的峰位, 即位于 454 eV 的 Ti $2p_{3/2}$ 和位于 460 eV 的 Ti $2p_{1/2}$ 等 2 个主峰, 以及位于 456 eV 对应 Ti $2p_{3/2}$ 和 463 eV 对应 Ti $2p_{1/2}$ 的 2 个卫星峰。与磁控溅射钛颗粒相比(见图 2), 经过化学气相沉积后 Ti 2p 的峰位发生了变化, Ti $2p_{3/2}$ 的峰位由 458 eV 移至 454 eV, 前者对应 TiO_2 中的 Ti-O 键, 后者对应 Ti-C 键^[27]。这说明在金刚石薄膜的生长过程中, 钛二次沉积后改变了成键方式, 通过掺杂进入金刚石晶格中。

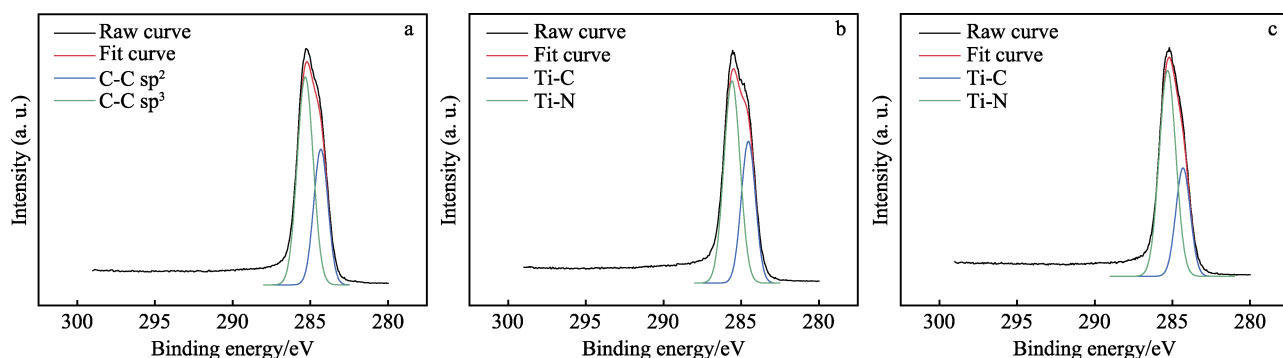


图 4 实验样品 1、2、3 (a、b、c) 的 XPS 能谱对比

Fig.4 Comparison of XPS spectra of experimental samples 1, 2 and 3 (a, b, c)

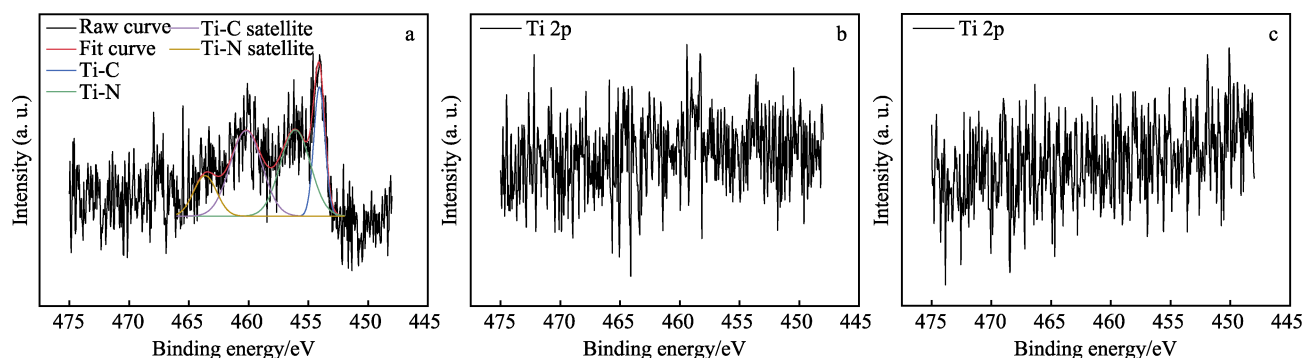


图 5 实验样品 1、2 和 3 (a、b、c) 的 XPS 能谱对比

Fig.5 Comparison of XPS spectra of experimental samples 1, 2 and 3 (a, b, c)

图 6 所示为 3 组 (样品 1、2、3) 金刚石薄膜表面的 AFM 扫描结果。从图 6 可以看出, 所有样品表面光滑、致密且无孔洞, 表面均由大量大小相当、均匀分布且紧密排列的纳米颗粒组成, 说明微波等离子体化学气相沉积在石英玻璃基体表面, 形成了纳米晶薄膜。对比图 6a 和图 6c 可以看出, 样品 1 中的晶粒相对较小, 这与文献[12]所提到的掺杂钛会使金刚石晶粒变小相吻合。另外, 样品 1、2、3 的表面粗糙度分别为 6.69、6.93、13.8 nm。同时, 样品 1 的晶粒直径平均为 277.78 nm, 样品 2 的晶粒平均直径为 285.71 nm, 样品 3 的晶粒平均直径为 357.14 nm, 由

此可见, 掺入钛可使金刚石薄膜的晶粒减小, 进而降低金刚石薄膜的表面粗糙度。样品 2 与样品 1 的粗糙度相当, 可能是由于微波等离子体刻蚀样品 1 基体表面的钛, 从而使等离子体中充满了活性钛离子, 在金刚石沉积过程中钛同时被引入样品 1 和样品 2 中。同时再次验证了掺钛使晶粒减小, 从而导致薄膜中的石墨相增加。

对实验样品进行光致发光谱检测, 激发波长为 532 nm, 结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 对于样品 1 和样品 2, 在 537 nm 和 761 nm 处均发现了相对较弱的发光峰, 这与理论预测的 TiV^0 色心光致发

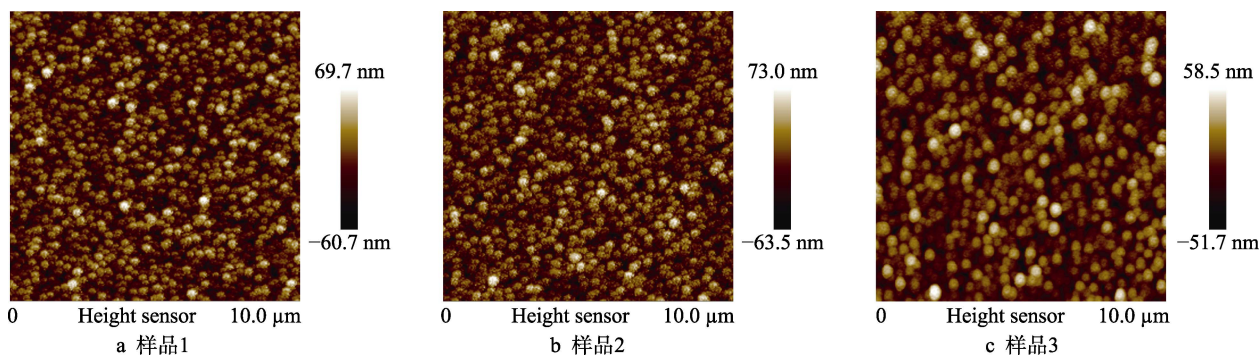


图6 样品沉积金刚石薄膜后的 AFM 平面图

Fig.6 AFM plane image of sample after deposition of diamond film: a) sample 1; b) sample 2; c) sample 3

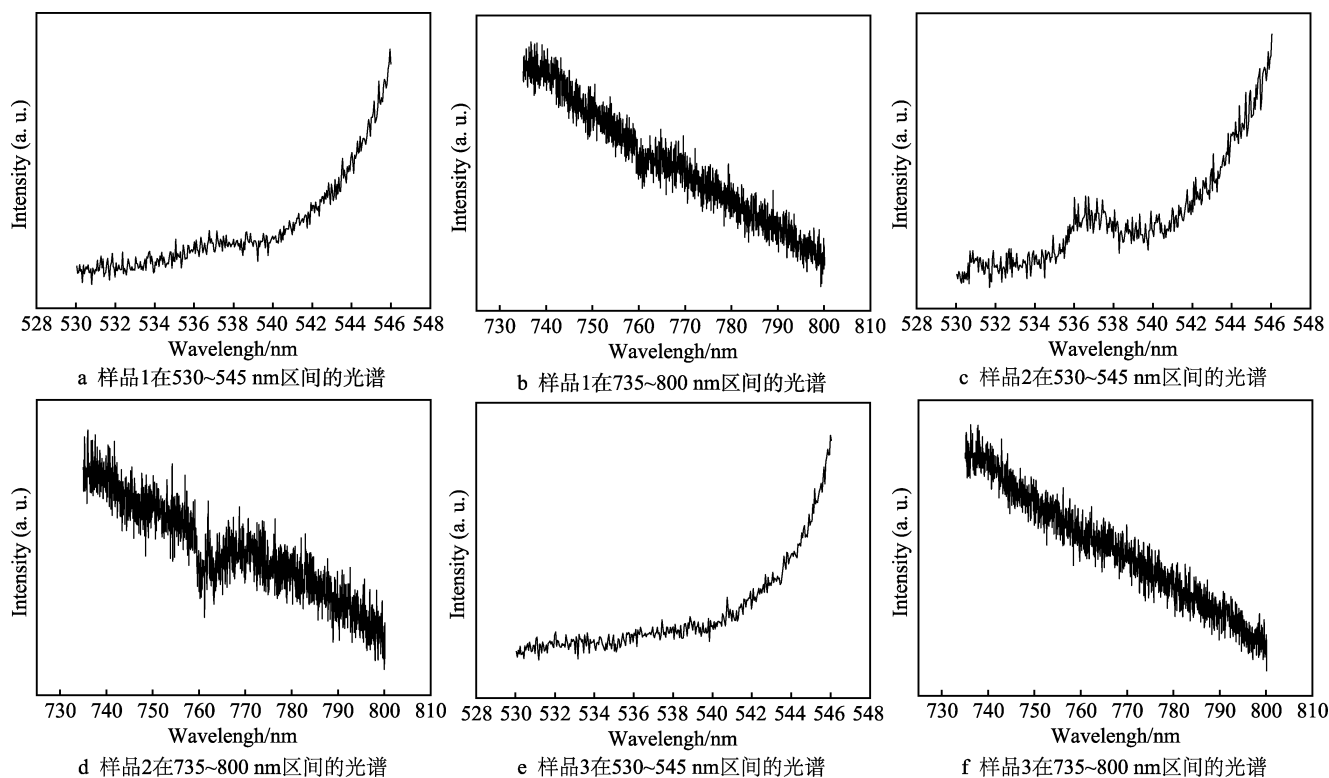


图7 不同金刚石薄膜的光致发光谱

Fig.7 Photoluminescence spectra of different diamond films: a) spectra of sample 1 in the range of 530~545 nm; b) spectra of sample 1 in the range of 735~800 nm; c) spectra of sample 2 in the range of 530~545 nm; d) spectra of sample 2 in the range of 735~800 nm; e) spectra of sample 3 in the range of 530~545 nm; f) spectra of sample 3 in the range of 735~800 nm

光谱基本一致^[16]。以上结果说明,在化学气相沉积过程中,将过渡金属钛掺入金刚石晶格中,与空位形成了钛空位色心。另外,实验发现样品2的钛色心发光强度要高于样品1,而上述XPS结果显示样品1中的钛掺杂量要明显多于样品2。这是由于掺入少量的钛可进入金刚石晶格中,并与空位形成色心,但掺入过量的钛则容易发生团聚,从而形成纳米晶钛团簇或纳米晶钛颗粒,反而不利于色心的形成。

3 结论

利用磁控溅射辅助微波等离子体化学气相沉积

方法制备了钛掺杂纳米金刚石薄膜,研究了钛掺杂纳米金刚石薄膜的化学组成、表面形貌和光致发光行为。通过实验得到了如下结论。

1) 微波等离子体可以通过刻蚀基体表面的钛纳米颗粒将钛掺入金刚石薄膜中。

2) 掺入钛可细化金刚石晶粒,同时增加石墨相,并降低表面粗糙度。同时,将钛掺入纳米金刚石薄膜内可以改变残余应力。

3) 光致发光光谱表明钛掺杂金刚石薄膜中存在 TiV^0 色心,这为金刚石过渡金属色心的制备提供了研究基础。

参考文献:

- [1] 段鹏. MPCVD 法生长单晶金刚石研究[D]. 济南: 山东大学, 2020: 1.
DUAN Peng. Investigation on Single Crystal Diamond Grown by MPCVD[D]. Jinan: Shandong University, 2020: 1.
- [2] 姚凯丽, 代兵, 乔鹏飞, 等. 纳米金刚石材料的研究进展[J]. 人工晶体学报, 2019, 48(11): 1977-1989.
YAO Kai-li, DAI Bing, QIAO Peng-fei, et al. Research Progress of Nano-Diamond Materials[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2019, 48(11): 1977-1989.
- [3] 戎有英. 金刚石色心单光子源的制备及其荧光寿命的高分辨测量[D]. 上海: 华东师范大学, 2019: 2.
RONG You-ying. Fabrication of Single Centers in Diamond and High-Resolved Measurement of Emission Lifetime[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019: 2.
- [4] MIZUOCHI N, MAKINO T, KATO H, et al. Electrically Driven Single-Photon Source at Room Temperature in Diamond[J]. Nature Photonics, 2012, 6(5): 299-303.
- [5] EJALONIBU H A, SARTY G E, BRADLEY M P. Optimal Parameter(s) for the Synthesis of Nitrogen-Vacancy (NV) Centres in Polycrystalline Diamonds at Low Pressure[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2019, 30(11): 10369-10382.
- [6] SONG Jie, LI Hong-dong, LIN Feng, et al. Plasmon-Enhanced Photoluminescence of Si-V Centers in Diamond from a Nanoassembled Metal-Diamond Hybrid Structure[J]. CrystEngComm, 2014, 16(36): 8356.
- [7] TZENG Y K, ZHANG J L, LU H, et al. Vertical-Substrate MPCVD Epitaxial Nanodiamond Growth[J]. Nano Letters, 2017, 17(3): 1489-1495.
- [8] 陈路华. 金刚石钛相关缺陷的第一性原理研究及 SiV-色心实验制备[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020: 6-10.
CHEN Lu-hua. First-Principles Study of Titanium-Related Defects and Preparation of SiV- Color Centers in Diamond[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2020: 6-10.
- [9] AHARONOVICH I, CASTELLETTO S, JOHNSON B C, et al. Chromium Single-Photon Emitters in Diamond Fabricated by Ion Implantation[J]. Physical Review B, 2010, 81(12): 121201.
- [10] 武愕. 基于金刚石镍氮色心的单光子源的研究及其应用[D]. 上海: 华东师范大学, 2007: 17-21.
WU E. Single-Photon Emission from Colour Centres in Diamond: Study of Nickel-Related Defects and Applications[D]. Shanghai: East China Normal University, 2007: 17-21.
- [11] 王俊峰. 金刚石 NV 色心的制备、相干性与温度探测研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016: 2-15.
WANG Jun-feng. Preparation and Spin Coherence of NV Centers in Diamond and Temperature Detection Application[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016: 2-15.
- [12] LIU Xue-jie, LU Peng-fei, WANG Hong-chao, et al. Morphology and Structure of Ti-Doped Diamond Films Prepared by Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition[J]. Applied Surface Science, 2018, 442: 529-536.
- [13] NADOLINNY V A, YURYEVA O P, SHATSKY V S, et al. New Data on the Nature of the EPR OK1 and N3 Centers in Diamond[J]. Applied Magnetic Resonance, 2009, 36(1): 97-108.
- [14] NADOLINNY V, KOMAROVSKIKH A, PALYANOV Y. Incorporation of Large Impurity Atoms into the Diamond Crystal Lattice: EPR of Split-Vacancy Defects in Diamond[J]. Crystals, 2017, 7(8): 237.
- [15] CZELEJ K, ĆWIEKA K, ŚPIEWAK P, et al. Titanium-Related Color Centers in Diamond: A Density Functional Theory Prediction[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6(19): 5261-5268.
- [16] TAN Xin, CHEN Lu-hua, LIU Xue-jie, et al. First-Principles Studies of Ti-Related Defects in Diamond[J]. Physica Status Solidi (b), 2020, 257(1): 1900292.
- [17] 唐伟忠, 于盛旺, 范朋伟, 等. 高品质金刚石膜微波等离子体 CVD 技术的发展现状[J]. 中国材料进展, 2012, 31(8): 33-39.
TANG Wei-zhong, YU Sheng-wang, FAN Peng-wei, et al. Developments in Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition Technology for Preparing High Quality Diamond Films[J]. Materials China, 2012, 31(8): 33-39.
- [18] 史新伟, 李杏瑞, 王新昌, 等. 微米及纳米金刚石薄膜的制备及其组织性能研究[J]. 真空, 2009, 46(6): 43-46.
SHI Xin-wei, LI Xing-rui, WANG Xin-chang, et al. Deposition of Micro/Nano Diamond Films and Their Properties[J]. Vacuum, 2009, 46(6): 43-46.
- [19] 李莉莉, 丁明清, 杜英华, 等. 微波等离子体化学气相沉积超纳米晶金刚石膜研究[J]. 真空电子技术, 2014(4): 62-64.
LI Li-li, DING Ming-qing, DU Ying-hua, et al. A Study of Ultra-Nanocrystalline Diamond Films Grown by MPCVD[J]. Vacuum Electronics, 2014(4): 62-64.
- [20] 卫会云, 张笑妍, 巩毛毛, 等. 磁控溅射技术制备 TiO₂ 薄膜的研究进展[J]. 光谱实验室, 2012, 29(2): 765-769.
WEI Hui-yun, ZHANG Xiao-yan, GONG Mao-mao, et al. Preparation of TiO₂ Thin Films by Magnetron Sputtering Technology[J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2012, 29(2): 765-769.
- [21] 王博, 魏世丞, 王玉江, 等. 磁控溅射技术制备二氧化钛薄膜研究进展[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 257-264.
WANG Bo, WEI Shi-cheng, WANG Yu-jiang, et al. Titanium-Oxide Thin Films Prepared by Magnetron Sputtering Method[J]. Surface Technology, 2018, 47(8): 257-264.
- [22] 路瑞娟. 氮掺杂石墨烯/二氧化钛杂化材料的制备及其光催化降解染料[D]. 郑州: 郑州大学, 2013: 33-35.
LU Rui-juan. N-Doped Graphene/Titania Hybrid Mater-

- ials, Preparation and Photocatalysis for Degradation of Dye[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013: 33-35.
- [23] 刘学杰, 诸葛晨昱, 王宇晨. 铈掺杂对 CVD 金刚石薄膜结构的影响[J]. 内蒙古科技大学学报, 2020, 39(3): 279-284.
- LIU Xue-jie, ZHUGE Chen-yu, WANG Yu-chen. Effects of Cerium Incorporation on the Microstructure of CVD Diamond Films[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2020, 39(3): 279-284.
- [24] FAN Qi hua, FERNANDES A, PEREIRA E, et al. Stress-Relief Behavior in Chemical-Vapor-Deposited Diamond Films[J]. Journal of Applied Physics, 1998, 84(6): 3155-3158.
- [25] YOSHIKAWA M, KATAGIRI G, ISHIDA H, et al. Characterization of Crystalline Quality of Diamond Films by Raman Spectroscopy[J]. Applied Physics Letters, 1989, 55(25): 2608-2610.
- [26] NASIEKA I, STRELCHUK V, BOYKO M, et al. Raman and Photoluminescence Characterization of Diamond Films for Radiation Detectors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 223: 18-23.
- [27] WANG Xin-chang, QIAO Yu, SONG Xin, et al. Determination of Carbonization Depths in Ti Substrates in Diamond Growth Atmospheres and Modified Diffusion Models[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 860: 157904.

(上接第 185 页)

- [22] LI Yu, SHEN Yong-bin, BIAN Ping-yan, et al. WITHDRAWN: The Influence of Polar Interface on the Conformation and Degradation Performance of Calcium Alginate Gel Units[J]. Polymer Testing, 2021: 107188.
- [23] 练小正, 张胜男, 程红娟, 等. 导模法生长大尺寸高质量 β -Ga₂O₃ 单晶[J]. 半导体技术, 2018, 43(8): 622-626.
- LIAN Xiao-zheng, ZHANG Sheng-nan, CHENG Hong-juan, et al. High-Quality and Large-Size β -Ga₂O₃ Single Crystals Grown by Edge-Defined Film-Fed Growth Method[J]. Semiconductor Technology, 2018, 43(8): 622-626.
- [24] OH S, SEOK J. An Integrated Material Removal Model for Silicon Dioxide Layers in Chemical Mechanical Polishing Processes[J]. Wear, 2009, 266(7/8): 839-849.
- [25] 白亚雯, 陈国美, 滕康, 等. 阳离子表面活性剂对 A 向蓝宝石晶片化学机械抛光效率的影响[J]. 人工晶体学报, 2018, 47(3): 470-475.
- BAI Ya-wen, CHEN Guo-mei, TENG Kang, et al. Effect of Cationic Surfactant on Chemical Mechanical Polishing Efficiency of A-Plane Sapphire[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2018, 47(3): 470-475.

(上接第 191 页)

- [16] YE Lin-zheng, ZHU Xi-jing, HE Yan, et al. Surface Strengthening and Grain Refinement of AZ31B Magnesium Alloy by Ultrasonic Cavitation Modification[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(4): 508-517.
- [17] DING Xiao-long, KANG Yong, LI Deng, et al. Experimental Investigation on Surface Quality Processed by Self-Excited Oscillation Pulsed Waterjet Peening[J]. Materials, 2017, 10(9): 989.
- [18] TAN K L, YEO S H. Surface Finishing on IN625 Additively Manufactured Surfaces by Combined Ultrasonic Cavitation and Abrasion[J]. Additive Manufacturing, 2020, 31: 100938.
- [19] ZHENG Jian-xin, GUO Yong-lei, ZHU Li-xin, et al. Cavitation Effect in Two-Dimensional Ultrasonic Rolling Process[J]. Ultrasonics, 2021, 115: 106456.
- [20] WU Peng-fei, BAI Li-xin, LIN Wei-jun. On the Definition of Cavitation Intensity[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 67: 105141.
- [21] SAATY T L. The Modern Science of Multicriteria Decision Making and Its Practical Applications: The AHP/ANP Approach[J]. Operations Research, 2013, 61(5): 1101-1118.
- [22] 武春龙, 朱天明, 张鹏, 等. 基于功能模型和层次分析法的智能产品服务系统概念方案构建[J]. 中国机械工程, 2020, 31(7): 853-864.
- WU Chun-long, ZHU Tian-ming, ZHANG Peng, et al. Conceptual Scheme Construction of Smart PSS Based on Functional Model and AHP[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(7): 853-864.
- [23] 朱喜安, 魏国栋. 熵值法中无量纲化方法优良标准的探讨[J]. 统计与决策, 2015(2): 12-15.
- ZHU Xi-an, WEI Guo-dong. Discussion on the Fine Standard of Dimensionless Method in Entropy Method[J]. Statistics & Decision, 2015(2): 12-15.