

单晶金刚石边缘表面倾斜角度对同质外延生长的影响

耿传文 夏禹豪 赵洪阳 付秋明 马志斌

Effect of edge inclination of single crystal diamond on homoepitaxial growth

Geng Chuan-Wen Xia Yu-Hao Zhao Hong-Yang Fu Qiu-Ming Ma Zhi-Bin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 248101 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181537

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181537>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I24>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[Ib 型金刚石大单晶的限形生长](#)

Shape controlled growth for type Ib large diamond crystals

物理学报.2018, 67(16): 168101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180356>

[高跨导氢终端多晶金刚石长沟道场效应晶体管特性研究](#)

Characterization of high-transconductance long-channel hydrogen-terminated polycrystal diamond field effect transistor

物理学报.2018, 67(6): 068101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171965>

[单晶金刚石氢终端场效应晶体管特性](#)

Characteristics of H-terminated single crystalline diamond field effect transistors

物理学报.2017, 66(20): 208101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.208101>

[复合超硬材料的高压合成与研究](#)

Syntheses and studies of superhard composites under high pressure

物理学报.2017, 66(3): 038103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.038103>

[硼氢协同掺杂 Ib 型金刚石大单晶的高温高压合成与电学性能研究](#)

Synthesis and electrical properties study of Ib type diamond single crystal co-doped with boron and hydrogen under HPHT conditions

物理学报.2016, 65(11): 118103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.118103>

# 单晶金刚石边缘表面倾斜角度对同质外延生长的影响\*

耿传文 夏禹豪 赵洪阳 付秋明 马志斌†

(武汉工程大学材料科学与工程学院, 湖北省等离子体化学与新材料重点实验室, 武汉 430073)

(2018年8月15日收到; 2018年10月15日收到修改稿)

利用微波等离子体化学气相沉积法, 对单晶金刚石(100)晶面边缘进行精细切割抛光处理, 形成偏离(100)晶面不同角度的倾斜面, 在 $\text{CH}_4/\text{H}_2$ 反应气体中进行同质外延生长, 研究单晶金刚石边缘不同角度倾斜面对边缘金刚石外延生长的影响. 实验结果表明, 边缘倾斜面角度对边缘的单晶外延生长质量有影响, 随着单晶金刚石边缘倾斜面角度的增大, 边缘多晶金刚石数量先减少后增多, 在倾斜角 $3.8^\circ$ 时边缘呈现完整的单晶外延生长特性. 分析认为, 边缘不同角度的倾斜面会改变周围电场强度和等离子体密度, 导致到达衬底表面的含碳前驱物发生改变, 倾斜面台阶表面的含碳前驱物浓度低于能形成层状台阶生长的临界浓度是减弱单晶金刚石生长过程中边缘效应的主要原因.

**关键词:** 单晶金刚石, 倾斜面, 化学气相沉积, 边缘台阶**PACS:** 81.05.ug, 52.25.-b**DOI:** 10.7498/aps.67.20181537

## 1 引言

由于单晶金刚石作为半导体材料具有巨大优势, 利用等离子体化学气相沉积法同质外延生长单晶金刚石研究受到广泛的关注<sup>[1-3]</sup>. 然而只有大面积单晶金刚石制备技术取得突破, 金刚石才能取代硅在半导体应用中的地位<sup>[4,5]</sup>. 由于在单晶金刚石生长中种晶周围存在边缘效应, 生长过程中边缘容易产生多晶金刚石, 导致单晶金刚石生长面随着生长的进行表面积不断缩小, 大尺寸单晶金刚石难以获得<sup>[6]</sup>. 因此, 如何在制备高质量单晶金刚石的前提下减少边缘效应, 抑制边缘多晶金刚石生长, 对金刚石进入半导体行业的应用具有积极的作用.

为了减弱制备单晶金刚石时的边缘效应, 人们一方面采用“嵌入式”的基片台取代“开放式”的基片台, 目的是为了缓解等离子体造成的单晶金刚石边缘温度过高, 之前学者已经对此进行了详细的报道<sup>[7]</sup>, 另一方面科研人员采取“Off-angle growth”

方法<sup>[8,9]</sup>, 使晶种(100)晶面整体沿(110)晶面方向倾斜抛光形成抛光面生长, 但是这方面系统的研究报道较少.

本文通过对(100)晶面单晶金刚石边缘进行精细切割抛光处理, 形成偏离(100)晶面不同角度的倾斜面, 在低 $\text{CH}_4$ 浓度、低沉积温度条件下进行生长, 研究单晶金刚石边缘表面倾斜角度对同质外延生长的影响.

## 2 实验

### 2.1 样品的制备

本文采用实验室自主研发设计的双基板波导式微波等离子体化学气相沉积(MPCVD)装置, 如图1所示. 装置能够产生出较高密度体积的微波等离子体<sup>[10]</sup>, 工作频率为2.45 GHz, 最大输出功率3 kW. 采用纯度为99.999%的 $\text{CH}_4$ 和 $\text{H}_2$ 在等离子体中激发产生含碳前驱物基团和原子氢. 将严格以

\* 国家自然科学基金(批准号: 15G006)和中国电子科技集团公司第四十六研究所创新基金(批准号: CJ20150701)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: mazb@wit.edu.cn

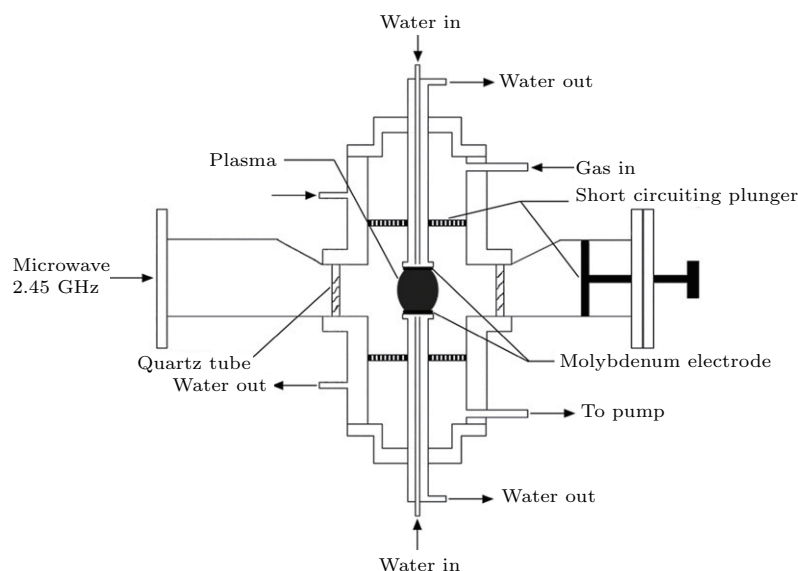


图1 双基板波导式 MPCVD 装置

Fig. 1. Double-substrate waveguide type MPCVD device.

(100) 晶面取向的化学气相沉积 (CVD) 单晶金刚石作为本研究实验的种晶衬底, 分别为样品 a—f, 对样品的一边进行精密切割与机械抛光, 形成偏离于 (100) 晶面不同角度的倾斜抛光面, 如图 2 所示. 样品先后用  $H_2SO_4$  和  $HNO_3$  混合液 (体积比 3 : 1) 加热与丙酮超声处理 3 min, 以去除单晶金刚石种晶表面的金属杂质与有机杂质, 最后用氢等离子体 (14 kPa, 750 °C, 200 sccm (1 sccm = 1 mL/min)) 进行刻蚀 20 min 以减少缺陷对实验结果的影响, 在种晶刻蚀完之后直接通入  $CH_4$  进行单晶金刚石生长 [11–13]. 表 1 列出了样品 a—f 沿 (110) 晶面的抛光面与 (100) 晶面倾斜角度数以及生长参数.

表 1 单晶金刚石边缘不同角度倾斜面的生长参数

Table 1. Growth parameters of single crystal diamond edges at different angles.

Sample	$CH_4/H_2$	Pressure/kPa	Angle/(°)	Inclined surface
a	6%	15	0.8	(1 71 0)
b	6%	15	2.1	(1 27 0)
c	6%	15	3.8	(1 15 0)
d	6%	15	5.7	(1 10 0)
e	6%	15	7.1	(180)
f	6%	15	11.3	(150)

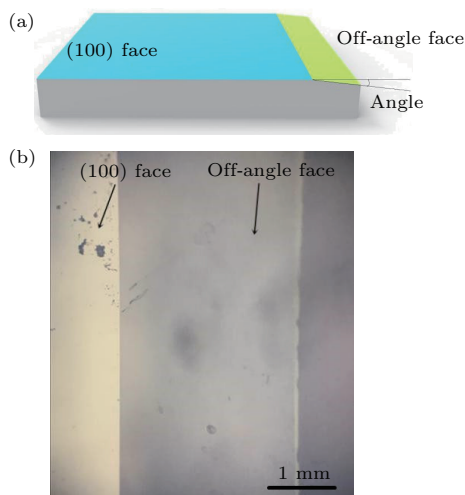


图2 单晶金刚石 (100) 晶面边缘 (a) 处理示意图; (b) 样品照片

Fig. 2. Schematic diagrams of single crystal diamond (100) crystal face edge: (a) Treatment diagrammatic sketch; (b) sample photo.

## 2.2 样品的测试

实验中采用海洋光学公司生产的 Maya2000 高灵敏度背照式 FFT-CCD 光谱仪对 (100) 晶面边缘倾斜面附近等离子体的变化情况进行检测, 采用双目金相显微镜观察样品边缘形貌, 研究单晶金刚石边缘表面倾斜角度对同质外延生长的影响.

## 3 实验结果

图 3 为样品 a—f 的边缘在相同条件下生长 8 h 后的光学显微照片图. 从图 3 可以看出, 样品 a—f 非边缘区域表面呈现出单晶金刚石典型的层状台阶生长模式, 且台阶形貌随斜面角度的增大而越发聚集. 在样品边缘处, 样品 a 生长出体积较大的多晶金刚石, 不利于单晶金刚石二维面积扩大生长.

样品b—d边缘表面较平整, 多晶金刚石体积较小, 尤其是样品c, 基本呈现理想的层状台阶生长, 其台阶方向一致且与边缘平行, 抑制了生长过程中的边

缘效应. 随着倾斜面角度的继续增大, 样品e与样品f在生长后边缘呈现出与样品a相似的大体积多晶金刚石, 且样品f边缘表面生长完全杂乱.

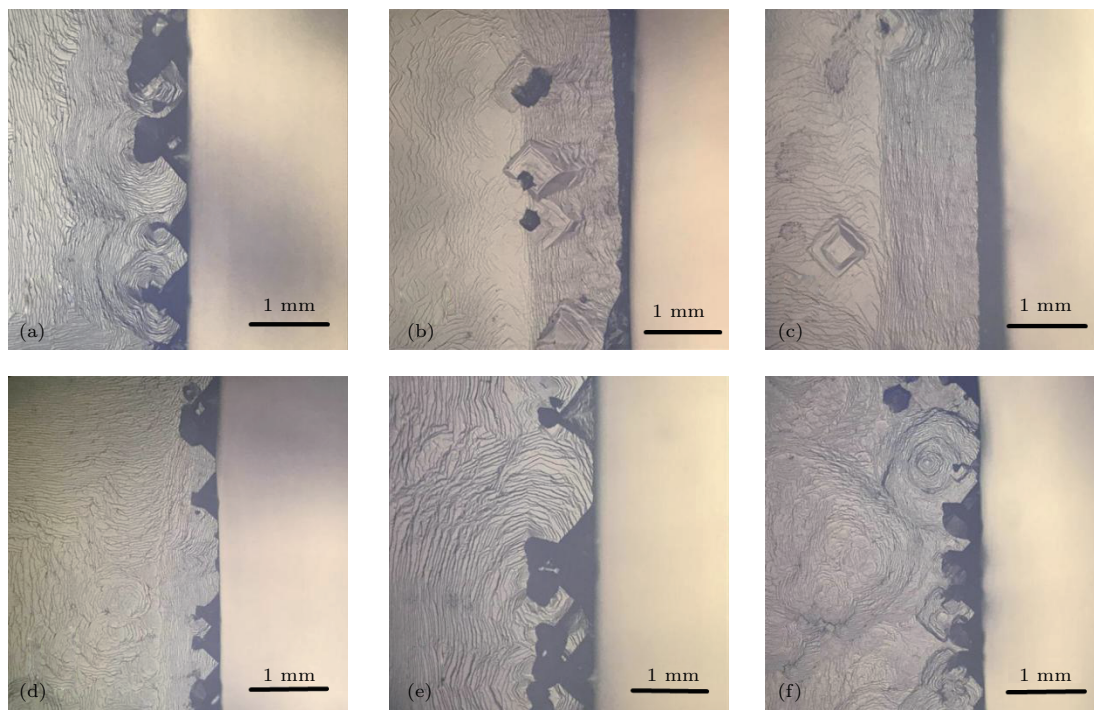


图3 不同角度倾斜面的单晶金刚石生长8 h后边缘的光学照片 (a) 0.8°; (b) 2.1°; (c) 3.8°; (d) 5.7°; (e) 7.1°; (f) 11.3°

Fig. 3. Optical photos of the edge of single crystal diamond grown at different angles for 8 h: (a) 0.8°; (b) 2.1°; (c) 3.8°; (d) 5.7°; (e) 7.1°; (f) 11.3°.

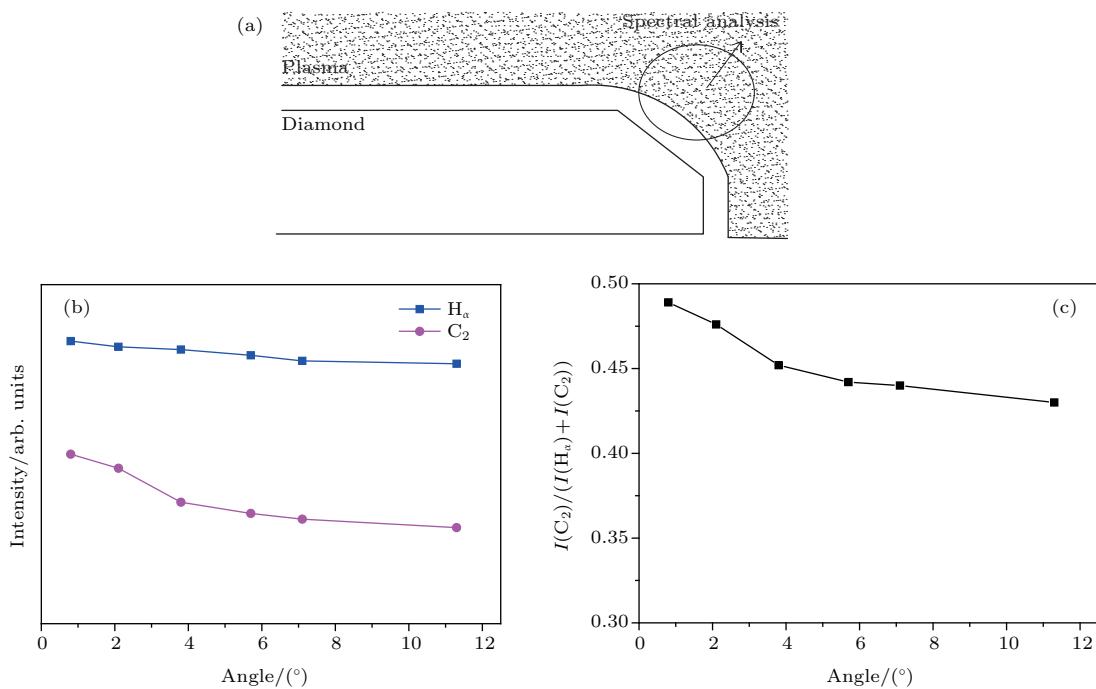


图4 单晶金刚石边缘等离子体发射光谱随倾斜面角度的变化 (a) 等离子体分析区域; (b) 各基团谱线强度的变化; (c)  $C_2/H_{\alpha}$  比值变化

Fig. 4. Edge plasma emission spectrum of single crystal diamond varies with the angle of the inclined surface: (a) Plasma analysis region; (b) change in spectral intensity of each group; (c) change in  $C_2/H_{\alpha}$  ratio.

单晶金刚石边缘倾斜面的变化会引起周围等离子体密度的改变, 通过发射光谱对其进行分析, 光谱测试区域如图 4(a) 所示. 在 15 kPa 气压环境中,  $\text{CH}_4\text{-H}_2$  为原料气体被等离子体激发出的基团主要以  $\text{H}_\alpha$  与  $\text{C}_2$  基团为主, 且  $\text{C}_2$  基团更被认为是单晶金刚石表面生长的前驱物<sup>[14]</sup>. 图 4(b) 为分析区域  $\text{H}_\alpha$  基团与  $\text{C}_2$  基团谱线强度随倾斜面角度的变化, 可以看出, 具有较小电离能的  $\text{H}_\alpha$  基团谱线强度随倾斜面角度增加而缓慢降低, 而当倾斜面角度为  $0.8^\circ\text{--}3.8^\circ$  时  $\text{C}_2$  基团谱线强度降低速度较快, 在倾斜面角度大于  $3.8^\circ$  后下降速度明显变缓. 图 4(c) 为  $\text{C}_2$  与  $(\text{H}_\alpha + \text{C}_2)$  的谱线强度比值, 明显看出在倾斜面角度为  $3.8^\circ$  时  $\text{C}_2$  谱线强度波动较其他角度大.

## 4 讨 论

等离子体制备工艺中, 边缘效应往往是由于样品尖端与拐点处具有更高的等离子体密度造成的. 根据 Yamada 等<sup>[15]</sup> 提出的等离子体分布理论, 在采用 MPCVD 方法制备单晶金刚石时, 未经处理的单晶金刚石衬底表面与侧面呈直角状态, 与等离子体接触的棱边周围的放电强度高于衬底表面的放电强度, 导致含碳前驱物浓度增加, 并造成单晶金刚石边缘区域温度较中央区域沉积温度高, 这些因素导致直接将呈立方形状的单晶金刚石衬底置于等离子体中外延生长时容易在衬底的周围生长多晶金刚石. 而将单晶金刚石生长表面边缘抛光形成倾斜面时, 垂直棱角随之钝化, 周围电场强度减弱, 可以在一定程度上减弱生长过程中的边缘效应.

当在等离子体中被激发出的含碳前驱物到达单晶金刚石表面时, 其垂直方向的驱动力会消失, 含碳前驱物会在衬底表面以水平方向自由移动<sup>[16]</sup>, 如图 5 所示. 对于单晶金刚石表面的 C—H 键而言, 其结合能小于 H—H 键但大于 C—C 键, 若要实现单晶金刚石表面生长外延, 原子氢须与表面的 C—H 键上的氢化合成氢分子而离开表面, 空出的碳悬键与 C—C 键结合实现单晶金刚石结构的不断外延. 根据 Lee 和 Badzian<sup>[17]</sup> 提出的分子动力学模型, 本文定义  $n_a$  为等离子体中含碳前驱物到达样品台阶表面的浓度,  $n_b$  为表面能形成台阶层状生长的最大含碳前驱物临界浓度. 当  $n_a < n_b$  时, 到达单晶金刚石表面的含碳前驱物在后续含碳前驱物到达前已经自由移动平铺, 并与表面悬挂键结合形

成理想的台阶层状形貌, 当  $n_a > n_b$  时, 一方面表面过多的含碳前驱物会在台阶上不断相互碰撞并累积形成具有非 (100) 晶面的岛状形状, 当岛状形状生长到一定程度, 岛与岛之间会相互接触从而促进多晶金刚石的产生与生长<sup>[18]</sup>; 另一方面, 较高浓度的含碳前驱物导致氢原子不足以完全将 C 原子的  $\text{sp}^2$  键刻蚀, 会在沉积过程中产生新的晶格错配, 进而发展为位错、位错团甚至亚晶界导致多晶金刚石的出现.

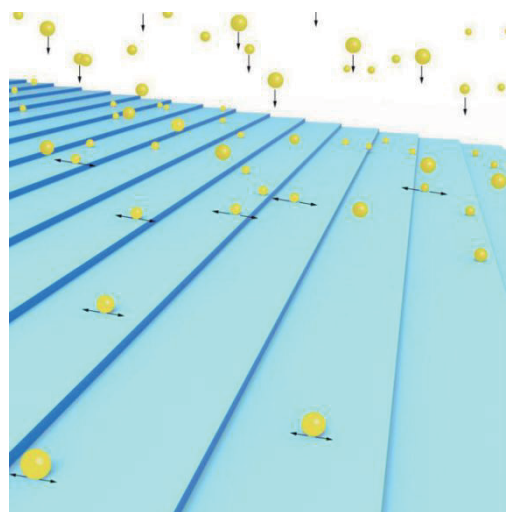


图 5 单晶金刚石层状台阶生长模型图

Fig. 5. Single crystal diamond layered step growth model.

在以  $\text{CH}_4\text{-H}_2$  为原料气体进行实验过程中,  $n_a$  值与倾斜面周围等离子体密度有关. 在等离子体中, 基团主要以  $\text{H}_\alpha$  基团与  $\text{C}_2$  基团为主,  $\text{C}_2$  与  $(\text{H}_\alpha + \text{C}_2)$  的谱线强度比值可近似为含碳前驱物浓度. 将单晶金刚石生长表面边缘抛光形成倾斜面, 周围激发出的等离子体密度降低, 且被激发出的  $\text{H}_\alpha$  与  $\text{C}_2$  基团绝大部分被电场强度加速到衬底表面台阶上, 所以图 4(c) 可以视为  $n_a$  值随倾斜面角度改变而变化的趋势.

在晶体生长过程中, 倾斜面上的台阶温度是影响  $n_b$  值大小的主要因素. 将单晶金刚石生长表面边缘抛光形成倾斜面, 随着倾斜角度的增大周围等离子体密度降低, 导致激发出的基团相互碰撞以及与衬底碰撞的次数减少, 边缘倾斜面温度下降<sup>[19]</sup>. 台阶温度的下降引起单晶金刚石表面的 C—H 键难以达到 H 脱附的温度, 暴露出的碳悬键数量减少, 使得更少的含碳前驱物进入单晶金刚石晶格点阵内,  $n_b$  值随之降低.

可以看出,  $n_a$  与  $n_b$  的值均随边缘倾斜面角度增大而减小, 同时倾斜面角度增大使得表面台阶密度增加, 且每层台阶中间区域  $n_a$  值往往大于其边缘区域 [17,20], 如图 6 所示. 由于  $n_a$  的大小直接受倾斜面周围等离子体激发出的含碳前驱物浓度影响, 同时导致温度变化, 从而影响  $n_b$  值大小, 所以  $n_a$  值的变化幅度比  $n_b$  值变化幅度大. 由图 4 可以看出, 相比于其他角度, 在倾斜面角度为  $3.8^\circ$  时,

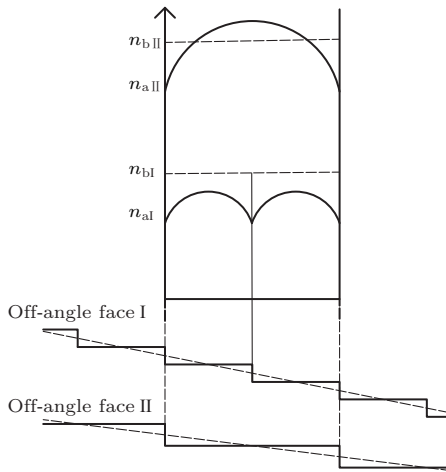


图 6 不同角度倾斜面  $n_a$  与  $n_b$  值变化示意图  
Fig. 6. Schematic diagram of changes in  $n_a$  and  $n_b$  values of inclined faces at different angles.

倾斜面周围等离子体中含碳前驱物基团变动幅度较大, 对应于图 7 中倾斜角  $a_1$  与  $a_2$  之间, 此时  $n_a$  值小于  $n_b$  值, 边缘表面较平整, 生长模式如图 8 (b) 所示, 适合单晶金刚石边缘同质外延的生长. 当边缘倾斜面角度小于  $a_1$  或大于  $a_2$  时, 样品边缘周围等离子基团降低幅度较为平缓,  $n_a$  值受强电场的影响比  $n_b$  值大, 生长模式如图 8 (a) 和图 8 (c) 所示. 当倾斜面角度远大于  $a_2$  时, 单晶金刚石倾斜面表面不是理想层状台阶生长模式, 且易产生缺陷和孪晶, 不利于在半导体行业的应用 [21,22].

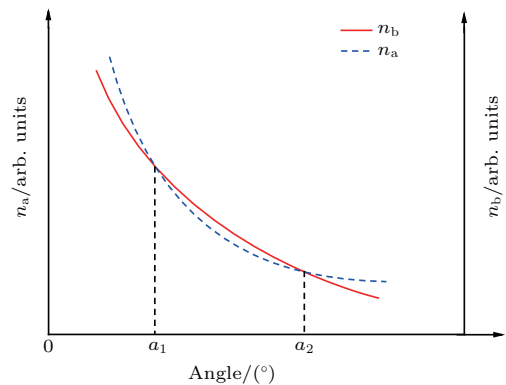


图 7  $n_a$  与  $n_b$  值随倾斜面角度变化趋势图  
Fig. 7. Trend graph of  $n_a$  and  $n_b$  values with angle of inclined surface.

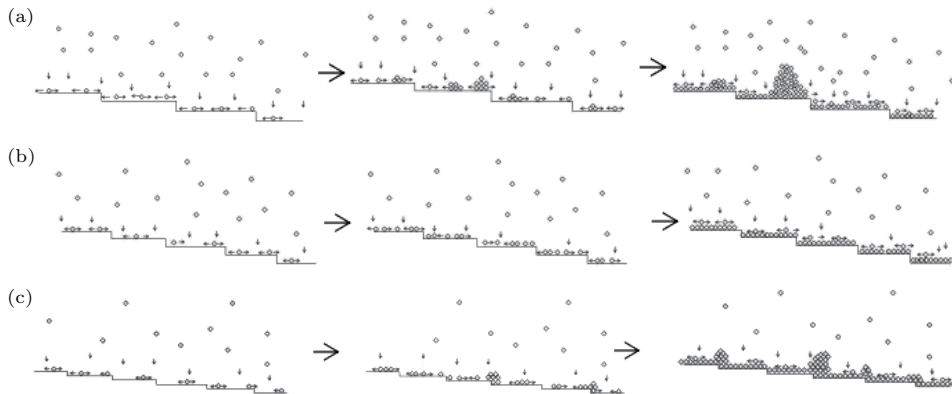


图 8 含碳前驱物在单晶金刚石台阶生长模拟图 (a) 宽度较宽台阶; (b) 宽度中等台阶; (c) 宽度较窄台阶  
Fig. 8. Simulation of the growth of carbonaceous precursors on the single crystal diamond steps: (a) Wide width steps; (b) medium width steps; (c) narrower width steps.

## 5 结 论

本文对单晶金刚石 (100) 晶面边缘进行精细切割抛光处理, 形成偏离 (100) 晶面不同角度的倾斜面, 在  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  反应气体中进行同质外延生长, 研究单晶金刚石边缘不同角度倾斜面对边缘金刚石

外延生长的影响. 边缘倾斜面角度的增大使得样品周围电场强度减弱, 到达单晶金刚石边缘的含碳前驱物数量改变, 等离子体中含碳前驱物到达样品台阶表面的浓度与能形成台阶的临界浓度不同程度地降低. 实验结果表明, 随着倾斜面角度增加, 表面多晶金刚石数量先减少后增多, 且在倾斜角为  $3.8^\circ$  时数量最低, 表面较平整, 说明对单晶金刚石

(100)晶面边缘倾斜抛光 $3.8^\circ$ 时,等离子体中含碳前驱物到达样品台阶表面的浓度小于能形成台阶的临界浓度,形成的倾斜面生长抑制边缘效应的效果最理想. 下一步在抑制单晶金刚石边缘效应的基础上,将开展大面积的二维扩大生长研究,以提高单晶金刚石在半导体行业的应用价值. 相信随着研究的深入以及在实际应用中的不断推广,以后单晶金刚石一定能够发挥出更大的潜力.

## 参考文献

- [1] Matsumoto S, Sato Y, Kamo M, Setaka N 1982 *Jpn. J. Appl. Phys.* **21** 183
- [2] Bray K, Kato H, Previdi R, et al. 2017 *Nanoscale* **10** 4028
- [3] Prestopino G, Marinelli M, Milani E 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 143504
- [4] Fu F B, Jin P, Liu Y L, Gong M, Wu J, Wang Z G 2016 *Microelectron. Technol.* **53** 571 (in Chinese) [付方彬, 金鹏, 刘雅丽, 龚猛, 吴巨, 王占国 2016 微纳电子技术 **53** 571]
- [5] Zhang Z, Lu W Z, Zuo D W 2017 *J. Synth. Cryst.* **12** 2417 (in Chinese) [张召, 卢文壮, 左敦稳 2017 人工晶体学报 **12** 2417]
- [6] Chen J L, Zhang S, Cheng H J, Xu Y K 2016 *The 29s Academic Exchange Meeting of the Society of Carbon Materials of the Chinese Society of Metals* Shizuishan, China, October 20, 2015 p23
- [7] Nad S, Gu Y, Asmussen J 2015 *Diamond Relat. Mater.* **60** 26
- [8] Kaneko J H, Fujita F, Konno Y, Gotoh T, Nishi N 2012 *Diamond Relat. Mater.* **26** 45
- [9] Lobaev M A, Gorbachev A M, Bogdanov S A 2017 *EPJ Web of Conferences* **149** 02003
- [10] Ma Z, Wu C, Wang J, Zhao H, Zhang L 2016 *Diamond Relat. Mater.* **66** 135
- [11] Zhu J F, Man W D, Lü J L, Kuang Q, Wang J H 2011 *Diamond Abr. Eng.* **31** 15 (in Chinese) [朱金凤, 满卫东, 吕继磊, 匡巧, 汪建华 2011 金刚石与磨料磨具工程 **31** 15]
- [12] Tallaire A, Achard J, Silva F, Sussmann R S, Gicquel A 2004 *Phys. Status Solidi* **201** 2419
- [13] Hemley R J, Mao H K, Yan C S 2010 *US Patent* **7** 820 131
- [14] Wu C, Ma Z B, Gao P 2015 *J. Synth. Cryst.* **44** 10 (in Chinese) [吴超, 马志斌, 高攀 2015 人工晶体学报 **44** 10]
- [15] Yamada H, Chayahara A, Mokuno Y, Horino Y, Shikata S 2006 *Diamond Relat. Mater.* **15** 1383
- [16] Tomellini M, Polin R, Sessa V 1991 *J. Appl. Phys.* **70** 7573
- [17] Lee N, Badzian A 1997 *Diamond Relat. Mater.* **6** 130
- [18] Li J F, Li D C, Ou G P, Zhang F J 2008 *Semicond. Optoelectron.* **29** 713 (in Chinese) [李建丰, 李东仓, 欧谷平, 张福甲 2008 半导体光电 **29** 713]
- [19] Wang P P 2015 *M. S. Thesis* (Changchun: Jilin University) (in Chinese) [王盼盼 2015 硕士学位论文 (长春: 吉林大学)]
- [20] Hei L F 2015 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Science & Technology Beijing) (in Chinese) [黑立富 2015 博士学位论文 (北京: 北京科技大学)]
- [21] Wu C 2016 *M. S. Thesis* (Wuhan: Wuhan Institute of Technology) (in Chinese) [吴超 2016 硕士学位论文 (武汉: 武汉工程大学)]
- [22] Song X X, Ma Z B, Ding K J, Chen J L, Geng P 2017 *Chin. J. Vac. Sci. Technol.* **37** 201 (in Chinese) [宋修曦, 马志斌, 丁康俊, 陈建丽, 耿鹏 2017 真空科学与技术学报 **37** 201]

# Effect of edge inclination of single crystal diamond on homoepitaxial growth<sup>\*</sup>

Geng Chuan-Wen Xia Yu-Hao Zhao Hong-Yang Fu Qiu-Ming Ma Zhi-Bin<sup>†</sup>

(Provincial Key Laboratory of Plasma Chemistry and Advanced Materials, School of Materials Science and Engineering,  
Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

( Received 15 August 2018; revised manuscript received 15 October 2018 )

## Abstract

Polycrystalline diamond is easy to appear at the edge of single crystal diamond grown by homogeneous epitaxial growth, which makes it difficult to enlarge the two-dimensional surface area of single crystal diamond. In this study, the microwave plasma chemical vapor deposition (MPCVD) is used, the edge of the single crystal diamond (100) crystal face is finely cut and polished to form an inclined surface which is different from the (100) crystal plane at different angles. After being pretreatment, homogeneous epitaxial growth is carried out in a double-substrate waveguide-type MPCVD device with CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> reaction gas. At the same time, the variation of plasma near the inclined plane of (100) crystal edge is analyzed by optical emission spectroscopy to study the effect of the tilting on the growth of the diamond edge. The experimental results show that the angle of the inclined surface of the edge has an effect on the quality of single crystal epitaxial growth of the edge. As the angle of the inclined surface of the single crystal diamond increases, the quantity of edge polycrystalline diamond first decreases and then increases. At an oblique angle of 3.8°, the edge exhibits complete single crystal epitaxial growth characteristics, which conduces to expand the surface area of single crystal diamond. According to the analysis, the inclined surface at different angle changes the surrounding electric field strength and plasma density of the edge, resulting in the change of carbon-containing precursors reaching the surface of the substrate. When the concentration of carbon-containing precursors on the inclined step surface is higher than the growth threshold of layered step, excessive carbon-containing precursors will constantly collide with each other and accumulate to form polycrystalline diamond on the step. When the concentration is lower than the growth threshold of layered step, the carbon-containing precursors on the surface of the substrate will be laid out to form a layered step. Therefore, the edge effect during the growth of single crystal diamond is weakened at the tilt angle of 3.8°, which leads the concentration of carbon-containing precursors on the inclined step surface to be lower than the growth threshold of layered step.

**Keywords:** single crystal diamond, inclined surface, chemical vapor deposition, edge steps

**PACS:** 81.05.ug, 52.25.-b

**DOI:** [10.7498/aps.67.20181537](https://doi.org/10.7498/aps.67.20181537)

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 15G006) and the Innovation Fund of the 46th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, China (Grant No. CJ20150701).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [mazb@wit.edu.cn](mailto:mazb@wit.edu.cn)