



硅单晶上类金刚石薄膜织构和外延取向与 界面价电子结构的关系

李志林* 李志峰 黄 钦

(北京化工大学材料科学与工程学院, 北京 100029)

摘要 金刚石和立方氮化硼薄膜由于其优异的性能已经获得了实际应用. 该类薄膜的特定取向对其在光学和微电子学领域的应用有特殊意义. 用固体与分子经验电子理论(EET)计算了衬底硅不同晶面与金刚石和立方氮化硼薄膜不同晶面的相对电子密度差, 从计算结果分析认为, 对所研究的薄膜, 薄膜与基底界面的电子密度差越小, 薄膜在热力学上越稳定, 界面的电子密度差是决定薄膜织构或外延取向的本质原因. 这些推断与实验事实符合得很好. 该计算方法和理论不仅为探讨金刚石和立方氮化硼在硅单晶表面上的薄膜生长机制提供了一个新视角, 还可能为其他薄膜取向的预测提供指导.

关键词 薄膜 界面电子密度 织构 外延 金刚石 立方氮化硼

金刚石薄膜由于其优异的性能已经在光学、热学、压力传感器及高保真扬声器涂层和刀具等方面获得实际应用. 由于其良好的化学稳定性、极高的击穿场强、高热导率、低介电常数、高的载流子迁移率以及高达 5.5eV 的禁带宽度, 故金刚石薄膜是制备在高温、高压和强辐射条件下工作的微电子器件以及高频、大功率微波固体器件的理想材料, 其最有价值的应用领域是在微电子学方面. 在微电子领域希望得到的是单晶材料^[1], 然而目前气相沉积得到的薄膜大多是多晶的杂乱取向膜, 所以金刚石薄膜在微电子方面获得更广泛的应用的前提是制备出取向优良的织构膜, 最好是外延膜. 与其他织构取向或自由取向的金刚石膜相比, 具有(100) 织构取向的金刚石薄膜具有较少的晶界、缺陷浓度和较平整的表面^[2], 使其在光学和微电子学领域获得了实际应用. 作为一种类金刚石材料, 立方氮化硼(c-BN)薄膜也具有极高的硬度, 是宽禁带半导体材料. 而且c-BN相对于金刚石来说易掺杂, 可以掺杂成n型和p型半导体, 所以c-BN薄膜在光学和电学领域具有良好的应用前景.

由于Si与金刚石和c-BN的结构和性质类似, 且单晶Si衬底比其他的单晶衬底更容易得到, 所以单晶Si是沉积金刚石和c-BN薄膜最常用的衬底, 其中以Si的(100)和(111)晶面最为常见.

收稿日期: 2006-10-10; 接受日期: 2007-02-14

教育部重点研究项目(批准号: 02018)和北京市自然科学基金(批准号: 2072014)资助项目

* E-mail: zhilinlibj@sohu.com

近年来,直接在Si单晶表面利用偏压成核沉积金刚石薄膜的报道越来越多,而且偏压成核的技术也应用于沉积c-BN薄膜^[3,4].但国内外对外延形核和生长的影响因素的研究多集中于衬底偏压、气体成分、衬底温度、沉积速率等工艺参数^[5-8].实际上,外延生长的取向强烈地依赖于基底的取向,织构形核和生长也应该与基底的取向有关,对基底和薄膜取向关系的理论研究可望排除工艺因素找到薄膜织构和外延的本质因素,省去大量的试验探索.而这方面的研究还仅限于原子排布方式、错配度、界面应力等,其研究结果往往仅能解释部分实验现象,且与某些实验事实相反^[9].本文用固体与分子经验电子理论(EET)^[9-12]计算了衬底硅不同晶面与薄膜不同晶面的相对电子密度差,并从计算结果讨论了电子密度对薄膜织构取向的影响,以期从理论上预测薄膜的织构或外延的取向.

1 Si 衬底的价电子结构及相关晶面的电子密度的计算

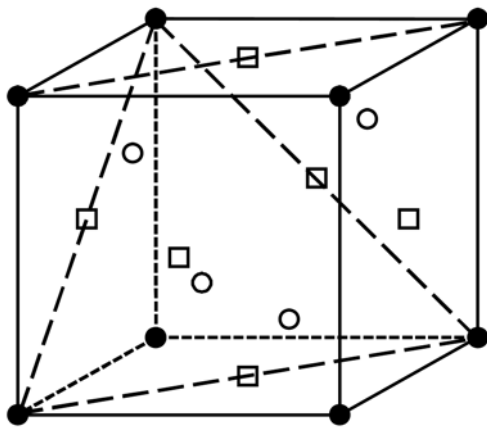


图1 A4结构的晶胞及其(100),(110),(111)晶面
●为角上的原子;□为面心上的原子;○为内部的原子

Si与金刚石结构相同,都具有A4型晶体结构,其晶格常数 $a=0.54309\text{ nm}$,其晶胞及相关晶面上的共价键如图1所示.文献^[12]已经用EET理论计算了金刚石的价电子结构,Si中的共价键与金刚石中完全相同,因此可用相同的方法计算,其价电子结构计算结果如表1所示.由表1可见,虽然对金刚石 $B_E^{\text{Si-Si}}$ 和 $B_F^{\text{Si-Si}}$ 是不可忽略的键,但对Si计算出的这两种键上的共价电子对数 n_E 和 n_F 都为0,因此这两种键可以忽略.根据文献^[13],Si相应晶面电子密度的计算如下.

Si(100)面上有两种共价键,其键名键距及其在面积为 $S_{(100)}^{\text{Si}}=a^2$ 的结构单元中的等同键数为

$$B_B^{\text{Si-Si}}, D_B = \frac{\sqrt{2}}{2}a, I_B^p = 2 \times 4 \times 1 = 8,$$

$$B_D^{\text{Si-Si}}, D_D = a, I_D^p = 2 \times 4 \times 1 = 8,$$

这两种键的共价电子对数 n_B 和 n_D 已经在表1中给出.于是该结构单元中的共价电子总数

表1 Si的价电子结构

$a: 0.54309\text{ nm}$ $\sigma: 6$ $n_c^6: 4$ $R_6(1): 0.1170\text{nm}$					
键名	I_a	D_{na}/nm	$\overline{D}_{na}/\text{nm}$	n_a	$\Delta D_{na}/\text{nm}$
$B_A^{\text{Si-Si}}$	4	0.22352	0.23482	0.97379	0.00035
$B_B^{\text{Si-Si}}$	12	0.38402	0.38368	0.00780	0.00035
$B_C^{\text{Si-Si}}$	12	0.45030	0.44996	0.00091	0.00035
$B_D^{\text{Si-Si}}$	6	0.54309	0.54274	0.00004	0.00035
$B_E^{\text{Si-Si}}$	12	0.59182	0.59147	0.00000	0.00035
$B_F^{\text{Si-Si}}$	24	0.66515	0.66480	0.00000	0.00035
$\sum I_a r_\alpha: 4.1077$ $\sum n_c: 4$ $\beta: 0.071\text{ nm}$					

$$\sum n_c^{(100)} = n_B I_B^p + n_D I_D^p,$$

所以 Si(100)面的共价电子密度

$$\rho_{(100)}^{\text{Si}} = \frac{\sum n_c^{(100)}}{S_{(100)}^{\text{Si}}} = 0.21269 \text{ nm}^{-2}.$$

Si(110)面上有 4 种共价键, 其键名、键距及其在面积为

$$S_{(110)}^{\text{Si}} = \sqrt{2}a^2$$

的结构单元中的等同键数为

$$B_A^{\text{Si-Si}}, D_A = \frac{\sqrt{3}}{4}a, I_A^p = 2 \times 4 \times 1 = 8,$$

$$B_B^{\text{Si-Si}}, D_B = \frac{\sqrt{2}}{2}a, I_B^p = 2 \times 4 \times 1 = 8,$$

$$B_C^{\text{Si-Si}}, D_C = \frac{\sqrt{11}}{4}a, I_C^p = 2 \times 4 \times 1 = 8,$$

$$B_D^{\text{Si-Si}}, D_D = a, I_D^p = 2 \times 4 \times 1 = 8.$$

用同样的方法可计算出 Si(110)面上的共价电子密度 $\rho_{(110)}^{\text{Si}} = 18.84860 \text{ nm}^{-2}$.

Si(111)面上只有一种共价键, 其键名、键距及其在面积为

$$S_{(111)}^{\text{Si}} = \frac{\sqrt{3}}{2}a^2$$

的结构单元中的等同键数为

$$B_B^{\text{Si-Si}}, D_B = \frac{\sqrt{2}}{2}a, I_B^p = 2 \times 6 \times 1 = 12,$$

所以可计算出 Si(111)面上的共价电子密度 $\rho_{(111)}^{\text{Si}} = 0.36629 \text{ nm}^{-2}$.

2 金刚石和立方氮化硼的价电子结构及其相应晶面的电子密度

2.1 金刚石相关晶面的电子密度

金刚石的点阵常数 $a = 0.35668 \text{ nm}$, 其价电子结构已经在文献[12]中给出, 其中 $B_A^{\text{C-C}}, B_B^{\text{C-C}}, B_C^{\text{C-C}}, B_D^{\text{C-C}}$ 键上的共价电子对数分别为 $n_A=0.86132, n_B=0.03616, n_C=0.00881, n_D=0.00122$. 用与 Si 同样的方法可计算出金刚石(100), (110), (111)晶面的电子密度分别为 $\rho_{(100)}^{\text{C}}=2.35057 \text{ nm}^{-2}, \rho_{(110)}^{\text{C}}=40.35855 \text{ nm}^{-2}, \rho_{(111)}^{\text{C}}=3.93831 \text{ nm}^{-2}$.

2.2 c-BN 的价电子结构和相关晶面的电子密度

c-BN 的晶体结构与金刚石相似, 其晶胞如图 2 所示, 图 2 中还同时给出了其(100)和(111)面. 晶胞中的原子坐标与 A4 结构完全相同, B 原子占据晶胞角上和面心的位置, N 原子占据晶胞内部的位置. c-BN 的点阵常数 $a=0.36150 \text{ nm}$, 据此可知其中不可忽略的共价键的键名、键距和等同键数为

$$B_A^{\text{N-B}}, D_A = \frac{\sqrt{3}}{4}a, I_A=1 \times 4 \times 2=8,$$

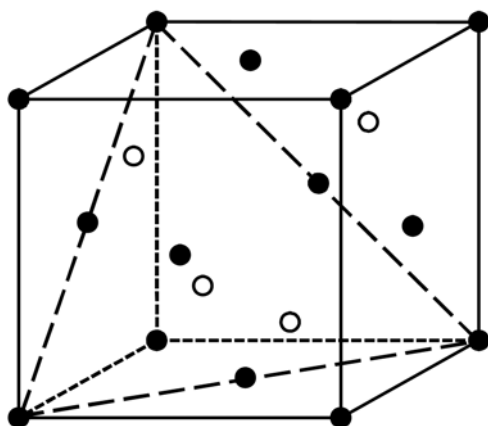


图 2 c-BN 的晶胞及其(100), (111)晶面
●为 B 原子; ○为 N 原子

$$\begin{aligned} B_B^{B-B}, D_B &= \frac{\sqrt{2}}{2}a, I_B=1 \times 12 \times 1=12, \\ B_C^{N-N}, D_C &= \frac{\sqrt{2}}{2}a, I_C=1 \times 12 \times 1=12, \\ B_D^{N-B}, D_D &= \frac{\sqrt{11}}{4}a, I_D=1 \times 12 \times 2=24, \\ B_E^{B-B}, D_E &= a, I_E=1 \times 6 \times 1=6, \\ B_F^{N-N}, D_F &= a, I_F=1 \times 6 \times 1=6, \\ B_G^{N-B}, D_G &= \frac{\sqrt{19}}{4}a, I_G=1 \times 12 \times 2=24, \\ B_H^{B-B}, D_H &= \frac{\sqrt{6}}{2}a, I_H=1 \times 24 \times 1=24, \\ B_I^{N-N}, D_I &= \frac{\sqrt{6}}{2}a, I_I=1 \times 24 \times 1=24. \end{aligned}$$

据此对 c-BN 进行键距差分析, 得到其价电子结构如表 2 所示.

表 2 c-BN 的价电子结构

$a: 0.36150 \text{ nm}$		N: $\sigma:1$ B: $\sigma:6$	$n_c^1:3$ $n_c^6:3$	$R_1(1): 0.0700 \text{ nm}$ $R_6(1): 0.0798 \text{ nm}$	
键名	I_a	D_{na}/nm	$\bar{D}_{na}/\text{nm}$	n_a	$\Delta D_{na}/\text{nm}$
B_A^{N-B}	8	0.15653	0.15942	0.69118	0.00289
B_B^{B-B}	12	0.25562	0.25851	0.02247	0.00289
B_C^{N-N}	12	0.25562	0.25851	0.01059	0.00289
B_D^{N-B}	24	0.29974	0.30262	0.00284	0.00289
B_E^{B-B}	6	0.36150	0.36439	0.00039	0.00289
B_F^{N-N}	6	0.36150	0.36439	0.00018	0.00289
B_G^{N-B}	24	0.39394	0.39683	0.00008	0.00289
B_H^{B-B}	24	0.44275	0.44564	0.00002	0.00289
B_I^{N-N}	24	0.44275	0.44564	0.00001	0.00289
$\sum I_a r_a: 8.6808$		$\sum n_c: 6$	$\beta: 0.060 \text{ nm}$		

c-BN 的(100)和(111)晶面的电子密度计算方法和 Si 相同, 只是将其中的 Si-Si 键换成 B-B 键即可. 代入表 2 中相应共价键上的共价电子对数和相应结构单元的面积, 可求出这两个晶面的共价电子密度 $\rho_{(100)}^{c-BN}=1.39889 \text{ nm}^{-2}$, $\rho_{(111)}^{c-BN}=2.38206 \text{ nm}^{-2}$.

如图 3 所示, c-BN 的(110)面上共有 6 种共价键, 其键名、键距及其在面积为 $S_{(110)}^{c-BN}=\sqrt{2}a^2$ 的结构单元中的等同键数为

$$B_A^{N-B}, D_A = \frac{\sqrt{3}}{4}a, I_A^p=2 \times 2 \times 2=8,$$

$$\begin{aligned}
 B_B^{B-B}, D_B &= \frac{\sqrt{2}}{2}a, I_B^p = 2 \times 2 \times 1 = 4, \\
 B_C^{N-N}, D_C &= \frac{\sqrt{2}}{2}a, I_C^p = 2 \times 2 \times 1 = 4, \\
 B_D^{N-B}, D_D &= \frac{\sqrt{11}}{4}a, I_D^p = 2 \times 2 \times 2 = 8, \\
 B_E^{B-B}, D_E &= a, I_E^p = 2 \times 2 \times 1 = 4, \\
 B_F^{N-N}, D_F &= a, I_F^p = 2 \times 2 \times 1 = 4.
 \end{aligned}$$

据此可计算出 c-BN 的(110)晶面的共价电子密度 $\rho_{(110)}^{c-BN} = 30.77432 \text{ nm}^{-2}$.

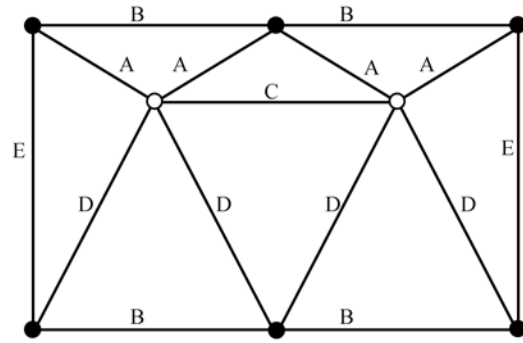


图3 c-BN 的(110)面

●为硼原子; ○为氮原子

3 界面电子密度差及其与织构取向的关系

将上述电子密度计算结果代入下式^[14]计算基底Si的不同晶面与金刚石和c-BN的不同晶面形成的界面的相对电子密度差(以下简称为电子密度差)

$$\Delta\rho = \frac{2|\rho_A - \rho_B|}{(\rho_A + \rho_B)},$$

其中 ρ_A 和 ρ_B 分别代表基底和薄膜的相应晶面的共价电子密度,结果如表3所示.

表3 基底 Si 和金刚石, c-BN 薄膜相应晶面的电子密度差

Si	$\Delta\rho$					
	金刚石(100)	金刚石(110)	金刚石(111)	c-BN(100)	c-BN(110)	c-BN(111)
(100)	1.67	1.98	1.80	1.47	1.97	1.67
(110)	1.56	0.73	1.31	1.72	0.48	1.55
(111)	1.46	1.96	1.66	1.17	1.95	1.47

大量的实验和计算结果表明,异相界面的电子密度差 $\Delta\rho$ 越大,界面应力越大^[13].其原因应是较大的电子密度差导致界面附近的基底原子和薄膜原子的电子态发生剧烈变化,其原子半径也与体材稳定态的原子半径发生较大的偏离.因此,可以设想,如果薄膜按一定的取向形核并生长可以降低电子密度差时,则界面上的原子较少地偏离体材的稳定态,从而降低体系的总能量.因此薄膜趋向形成界面电子密度差较低的单晶取向,即薄膜按电子密度差最小的取向外延生长在热力学上应该是稳定的.但一般的薄膜形成过程中都是多点同时形核,尽管降低电子密度差的取向的晶核可优先形成,其他取向的晶核也有形成的几率,所以实际的薄膜往往不是只出现使界面电子密度差最小的织构从而达到热力学最稳定的状态.电子密度差较小的织构也可能以亚稳态存在.如果两种取向的电子密度差相近,则有可能两种织构同时存在.而衬底偏压、气体成分、衬底温度、沉积速率等工艺参数都是使取向偏离热力学最稳定态的因素.

从表3的计算结果可以看出,如果以单晶Si(100)面作为衬底生长金刚石薄膜,则容易形成(100)的织构,如果条件合适,也可能得到(111)织构.在文献[8, 15~24]中报道了以Si(100)为衬底气相沉积金刚石薄膜的时候,都得到了高度取向的金刚石的(100)面,或者外延的金刚石的(100)面.而在文献[25~28]中则得到的是(100)面与(111)面混合的织构.

从表3还可以看出,以Si(111)晶面作衬底沉积金刚石的时候,可能生长出(100)或(111)面的

织构. 文献[15, 29]分别在不同的实验条件下在该取向的Si衬底上得到了(100)和(111)取向的金刚石薄膜. 可见理论计算的结果与实验结果符合得很好. 当以Si(110)晶面作衬底时, 最容易得到的是(110)取向的金刚石薄膜, 其次是(111)取向, 但目前未见到以Si(110)晶面作衬底的报道.

按表 3 的计算结果, 在Si(100)衬底上沉积c-BN薄膜, 容易得到的是(100)或(111)取向, 实验中也确实观测到了Si单晶(100)面上c-BN薄膜(100)和(111)取向的成核^[30]. 然而在Si衬底上不容易得到完整的c-BN薄膜, 实验中得到的大都是立方相和六方相夹杂着的BN^[4, 31, 32]. 如果c-BN薄膜在Si衬底上不容易生长是由于电子密度差较大, 从而引起六方相的生成, 则改变衬底可能使这种条件得到改善. 按上述的方法计算得到金刚石的(100)、(110)、(111)晶面与c-BN(100)的电子密度差分别为 0.51, 1.83, 0.95, 比表 3 中Si相应晶面的电子密度差都小, 所以设想以金刚石为衬底更好. 但大面积的金刚石衬底不易得到, 而在Si衬底上沉积金刚石则比较成熟, 所以有人尝试在Si(100)衬底上先沉积高度取向的金刚石(001)薄膜, 再在其上沉积c-BN, 结果得到了c-BN的(100)异质外延层^[33]. 以金刚石作为过渡膜制取c-BN膜恰好可证实从电子密度差进行的理论推断.

然而, c-BN(100)与Si(100)的电子密度差比金刚石的(100)晶面与Si(100)晶面的电子密度差小, 似乎应该比金刚石更容易在Si(100)上生长, 而不应该由金刚石过渡. 但事实上, c-BN 难于在Si(100)基底上发生异质外延的原因是BN容易出现六方相而不能形成完整的c-BN(100)异质外延膜. 而金刚石薄膜在特定的实验条件下不容易发生其他相变, 所以尽管与Si(100)的电子密度差略大, 仍可形成稳定的过渡膜. 过渡后c-BN的(100)与金刚石(100)的电子密度差减小, 使c-BN(100)的生长更容易, 从而在与六方BN相的竞争中胜出. 制取金刚石过渡膜和c-BN外延膜的过程是先后进行的, 制取过程中不存在金刚石(100)取向与c-BN(100)取向的竞争, 所以不应该用二者之间电子密度差的比较说明其过渡的机制.

至此可以认为, 界面电子密度差小的界面在热力学上稳定的假设在本文的研究范围内是成立的, 因此界面电子密度差可能是决定薄膜取向的本质原因. 工艺因素可以促使电子密度差不最小的薄膜取向形成, 从而使薄膜以亚稳态存在. 金刚石和c-BN薄膜织构、外延、过渡层等与薄膜取向有关的问题都从界面价电子结构得到了合理的解释. 该解释与我们所见的实验现象都是吻合的, 应该可以成立. 这一工作为探讨金刚石和立方氮化硼在硅单晶表面上的薄膜生长机制提供了一个新视角. 该计算方法和理论不仅适用于金刚石和c-BN与硅的体系, 还可能为其他薄膜取向的理论预测提供指导.

4 结论

1) 在本文的研究范围内, 薄膜与基底界面的相对电子密度差越小, 所生成的薄膜在热力学上越稳定, 薄膜与基底界面的电子密度差可能是决定薄膜织构或外延取向的本质原因.

2) 界面电子密度差的计算结果表明, 在Si(100)晶面上沉积金刚石薄膜易出现(100)或(111)取向的织构或外延生长, 在Si(111)晶面上沉积金刚石薄膜也易出现(100)或(111)取向的织构或外延生长, 但在这两种取向的Si单晶基底上不容易出现(110)取向的金刚石薄膜. 这些推断都与实验现象符合得很好.

3) 界面电子密度差的计算结果表明, 在Si(100)基底上沉积c-BN, 容易得到的是(100)或(111)取向的织构或外延膜. 在Si基底上用(001)取向的金刚石膜过渡可更容易地生成(100)取向的c-BN薄膜, 这一推断也为实验所证实.

参 考 文 献

- 1 陈光华, 张阳. 金刚石薄膜的应用和制备. 北京: 化学工业出版社, 2004. 59—73
- 2 Xia Y B, Sekiguchi T, Zhang W J, et al. Effects of hydrogen ion bombardment and boron doping on (001) polycrystalline diamond films. *J Cryst Growth*, 2000, 213: 328—333[DOI]
- 3 Yugo S, Kanai T, Kimura T. A new method for generation of diamond nuclei by plasma CVD, *Diam Relat Mater*, 1992, 1: 388—391[DOI]
- 4 Tian J Z, Xia L F, Ma X X. Characterization of interface of c-BN film deposited on silicon (100) substrate. *Thin Solid Films*, 1999, 355—356: 229—232[DOI]
- 5 Kim Y K, Lee K Y, Lee J Y. Texture-controlled diamond films synthesized by microwave plasma-enhanced chemical vapor deposition. *Thin Solid Films*, 1996, 272: 64—70[DOI]
- 6 王蜀霞. Si(100)上异质外延金刚石膜生长及其应用研究. *稀有金属材料与工程*, 2001, 30(6): 440—443
- 7 杨杰, 陈启瑾, 林彰达, 等. 001取向硅基底上异质外延金刚石薄膜实验研究. *自然科学进展*, 1995, 3: 233—235
- 8 Saada S, Barrat S, Bauer-Grosse E. Towards homogeneous and reproducible highly oriented diamond films. *Diam Relat Mater*, 2000, 9: 300—304[DOI]
- 9 Li Z L, Xu H B, Gong S K. Texture formation mechanism of vapor deposited f.c.c thin film on polycrystal or amorphous substrate. *J Phys Chem B*, 2004, 108 (39): 15165—15171[DOI]
- 10 余瑞璜. 固体与分子经验电子理论. *科学通报*, 1978, 23(2): 217—224
- 11 Guo Y Q, Yu R H, Zhang R L, et al. Calculation of magnetic properties and analysis of valence electron structures of $\text{LaT}_{13-x}\text{Al}_x$ ($\text{T}=\text{Fe}, \text{Co}$) compounds. *J Phys Chem B*, 1998, 102(1): 9—16[DOI]
- 12 Liu Z L, Li Z L, Sun Z G. Catalysis mechanism and catalyst design of diamond growth. *Metall Mater Trans A*, 1999, 30(11): 2757—2766
- 13 刘志林, 李志林, 刘伟东. 界面电子结构与界面性能. 北京: 科学出版社, 2002. 88—89
- 14 李志林, 刘志林, 孙振国. 合金相结构因子和界面结合因子及其在合金设计中的应用. *金属学报*, 1999, 35(7): 673—681
- 15 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. *物理学报*, 2000, 49(9): 1756—1762
- 16 张文广, 夏义本, 居建华, 等. 偏压对金刚石薄膜选择性成核和生长影响的研究. *功能材料*, 2000, 31 (5): 510—512
- 17 朱晓东, 詹如娟. 金刚石薄膜的形貌分析及(100)面择优生长. *真空科学与技术*, 1995, 15(6): 420—423
- 18 John P, Graham C, Milne D K. An FTIR study of the heteroepitaxy of diamond on silicon. *Diam Relat Mater*, 1996, 5: 256—260[DOI]
- 19 Janischowsky K, Ebert W, Kohn E. Bias enhanced nucleation of diamond on silicon (100) in a HFCVD system. *Diam Relat Mater*, 2003, 12: 336—339[DOI]
- 20 Jiang X, Paul M, Klages C P. Deposition of heteroepitaxial diamond films on 2 in silicon substrates. *Diam Relat Mater*, 1996, 5: 251—255
- 21 Milne D K, Roberts P G, John P. Epitaxy of diamond on silicon. *Diam Relat Mater* 1995, 4: 394—400[DOI]
- 22 Plitzko J, Rosler M, Nickel K G. Heteroepitaxial growth of diamond thin films on silicon information transfer by epitaxial tilting. *Diam Relat Mater*, 1997, 6: 935—939[DOI]
- 23 Marshall R D, Whitfield M D. Optimising control of microwave plasma bias enhanced nucleation for heteroepitaxial chemical vapour deposition diamond. *Diam Relat Mater*, 1997, 6: 676—680[DOI]
- 24 Choi I H, Barrat S, Bauer-Grosse E. Quantitative characterization of the true epitaxial ratio in the first stage of the MPCVD diamond synthesis. *Diam Relat Mater*, 2003, 12: 361—364[DOI]
- 25 王传新, 汪建华. 低偏压下化学气相沉积金刚石薄膜的生长形貌研究. *材料保护*, 2003, 36(5): 1—4
- 26 汪爱英, 柯培玲. 热丝 CVD 大面积金刚石薄膜的生长动力学研究. *新型炭材料*, 2005, 20(3): 229—234
- 27 苏青峰, 夏义本, 王林军. (100)定向 CVD 金刚石薄膜的制备及其电学性能. *半导体学报*, 2005, 26(5): 947—951
- 28 Thirer K H, Schreck M, Stritzker B. Growth and defects of diamond facets under negative biasing conditions in a microwave plasma CVD process. *Diam Relat Mater*, 1997, 6: 1010—1014[DOI]
- 29 Chen Q J, Chen Y, Yang J. Oriented and textured growth of (111) diamond on silicon using hot filament chemical vapour deposition. *Thin Solid Films*, 1996, 274: 160—164[DOI]
- 30 Weissmantel S, Reisse G. Characterization of ion-assisted pulsed laser deposited cubic boron nitride films. *Thin Solid Films*, 1999, 355—356: 256—262[DOI]
- 31 Pascallion J, Stambouli V, Ilias S, et al. Deposition of c-BN films on diamond: Influence of the diamond roughness. *Mater Sci Eng*, 1999, B59: 239—243[DOI]
- 32 Zhang X W, Boyen H G. Microstructure of the intermediate turbostratic boron nitride layer. *Diam Relat Mater*, 2005, 14: 1474—1481[DOI]
- 33 Zhang X W, Boyen H G, Ziemann P, et al. Growth mechanism for epitaxial cubic boron nitride films on diamond substrates by ion beam assisted deposition. *Diam Relat Mater*, 2004, 13: 1144—1148[DOI]