

## K9 和 Si(100) 基片上 Be 薄膜微观组织、晶粒尺寸及表面粗糙度的演变规律

罗炳池<sup>1,2</sup>, 李 恺<sup>1,2</sup>, 李 佳<sup>1</sup>, 谭秀兰<sup>1,2</sup>, 周民杰<sup>1,2</sup>, 张吉强<sup>1</sup>, 罗江山<sup>1,2</sup>, 吴卫东<sup>1,2</sup>, 唐永建<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900;  
2. 等离子体物理重点实验室, 绵阳 621900)

**摘要:** 采用真空蒸镀法分别在 K9 和 Si(100)基片上制备 Be 薄膜, 在相同沉积速率下, K9 基片上 Be 薄膜生长形态和 Si 基片上 Be 薄膜生长形态存在差异。但是两者随沉积速率增加具有相似的演变规律, 即由等轴晶变化至纤维晶, 再至粗大等轴晶。XRD 和 XPS 分析结果表明: 不同基片和蒸发温度下制备的 Be 薄膜均主要由 HCP 结构的  $\alpha$ -Be 相组成, 且表面存在一定氧化; 对于非晶 K9 基片, Be 薄膜晶粒取向较单一, (101)始终为显露晶面; 而单晶 Si(100)基片上 Be 晶粒取向多样, 在一定沉积速率下显露特定晶面; 相同沉积时间下 K9 和 Si(100)基片上生长的 Be 薄膜粗糙度  $R_q$  变化趋势十分相似, 两者随 Be 薄膜沉积速率( $v$ )增加先急剧增大后趋于平缓; 以细小等轴晶生长的薄膜表面光洁度较高, 而以纤维晶或粗大混晶生长的薄膜表面粗糙度较大。

**关键词:** Be 薄膜; 等轴晶; 沉积速率; 表面粗糙度

中图分类号: TB43; TG174.444

文献标志码: A

## Evolution rule of microstructure, crystal grain size and surface roughness for Be films grown on K9 and Si(100) substrates

LUO Bing-chi<sup>1,2</sup>, LI Kai<sup>1,2</sup>, LI Jia<sup>1</sup>, TAN Xiu-lan<sup>1,2</sup>, ZHOU Min-jie<sup>1,2</sup>, ZHANG Ji-qiang<sup>1</sup>,  
LUO Jiang-shan<sup>1,2</sup>, WU Wei-dong<sup>1,2</sup>, TANG Yong-jian<sup>1</sup>

(1. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;  
2. Science and Technology on Plsama Physics Laboratory, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Be films grown on K9 and Si(100) substrates were fabricated by an evaporation deposition method. At the same deposition velocity, the growth morphology of Be films grown on the K9 substrate is different from that grown on the Si(100) substrate. Whereas, both of them have the similar evolution rule with the increase of deposition velocity, which changes from an equiaxed grain to a fiber grain, and then to a coarsening equiaxed grain. XRD and XPS analyses indicate that the Be films grown on different substrates at different deposition velocities consist mainly of HCP structure  $\alpha$ -Be phase, and all of the Be film surface is oxidized. For the amorphous K9 substrate, the preferential growth orientation of Be film is always exposed to (101) crystal face. While, the grain orientation of the Si substrate is diversiform, a special crystal face can be shown at a certain deposition velocity. For the Be films grown on K9 substrate and Si(100) substrate, their variation trend of roughness  $R_q$  is similar at the same deposition time. Both of them increase sharply with the increase of deposition velocity, and then enhance slightly. The Be films with an equiaxed grain is very smooth, while the surface roughness of the fiber grain and coarsening mixed grain is very large.

**Key words:** Be films; equiaxed grain; deposition velocity; surface roughness

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11204280); 等离子体物理重点实验室基金资助项目(9140C6805020907).

收稿日期: 2012-06-07; 修订日期: 2013-02-25

通信作者: 吴卫东, 研究员, 博士; 电话: 0816-2480823; E-mail: wuweidongding@163.com

铍(Be)薄膜具有良好的烧蚀特性,能够抑制界面因流体力学引起的Rayleigh-Taylor不稳定,避免冷燃料混入热斑,保障惯性约束聚变(ICF)顺利进行。因此,Be薄膜是ICF物理实验首选烧蚀材料之一<sup>[1-5]</sup>。由于Be材料具有高的X线穿透率,常作为同步加速器束线和X线探测器窗口,以及软X线滤光片<sup>[6-12]</sup>。由此可见,Be材料在高能量密度物理实验、高分辨诊断设备中存在广泛的应用。然而,研究者发现Be薄膜因残余应力大、成膜质量差、或晶粒粗大致使薄膜烧蚀和滤光性能下降,而高品质的Be薄膜能够消除这些缺点,其杂质含量低、膜厚均匀、微观组织分布均匀、晶粒细化,表面平整且光滑,已经成为大家共同关注的焦点<sup>[10-15]</sup>。

Be薄膜的制备方法主要有蒸发法和溅射法。热蒸法设备简单、操作简易和成本低廉等优点,成为Be薄膜制备的首选方法。由于Be材料具有高毒性,制备过程中必须采用严格防护措施。也许因为该原因,在国内有关Be薄膜制备和研究报道较少。要制备高品质的Be薄膜,需要从Be薄膜的制备、以及微观组织、晶粒尺寸和表面粗糙度等研究着手。本文作者采用真空蒸镀法制备Be薄膜,旨在研究K9和Si(100)基片上Be薄膜微观组织演变规律、生长动力学特性、晶粒细化及表面粗糙度变化规律等,并建立它们与沉积速率的相关关系,为高品质Be薄膜的制备提供技术支撑。

## 1 实验

采用电阻热蒸发装置制备铍薄膜,该装置主要由真空室、智能控温系统、蒸发坩埚、挡板和衬底组件等构成。实验前先将K9和Si(100)基片在洗涤剂中进行去油处理,经去离子水冲洗干净后在乙醇溶液中超声清洗10 min,再经去离子水冲洗并烘干。其中, Si基片还需放入5%的HF酸中浸泡2 min并甩干。将Be料(纯度98.5%,质量分数)放入BeO坩埚中,实验时先抽真至 $2.0 \times 10^{-5}$  Pa,然后通过程序控温加热,待蒸发温度升高至设定温度30 min后,打开基片挡板,蒸镀温度在1 000~1 150 ℃范围,每增加10 ℃蒸镀一次Be薄膜,蒸镀时间控制在2 h,工作气压为 $1.0 \times 10^{-4}$  Pa。

采用台阶仪和AFM测量Be薄膜的厚度和均方根粗糙度;采用SEM分析Be薄膜表面微观组织;采用XRD分析样品物相组成,扫描分辨率为0.02°;采用XPS测定薄膜表面层氧含量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 薄膜生长动力学

不同基片上Be薄膜沉积速率如图1所示。多次实验发现,蒸镀温度低于1 000 ℃时,Be薄膜沉积速率极小,可以忽略。

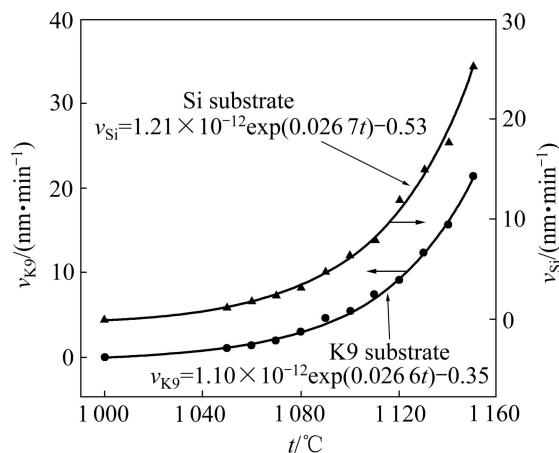


图1 在不同基片上Be薄膜的沉积速率随蒸发温度的变化关系

Fig. 1 Relationship between growth velocity and evaporation temperature for Be films on different substrates

随蒸发温度的升高,Be平衡蒸气压升高,原子沉积速率急剧增大。基于薄膜生长动力学机制,Be薄膜沉积速率与平衡蒸气压成正比,而平衡蒸气压与温度变化呈现指数函数关系,因此,采用指数增长函数来拟合Be薄膜沉积速率,在K9基片上Be薄膜沉积速率 $v_{K9}$ 为

$$v_{K9} = 1.10 \times 10^{-12} \exp(2.66 \times 10^{-2} T) - 0.35 \quad (1)$$

在Si(100)基片上,Be原子沉积速率与K9基片呈现相同趋势。同样采用指数增长函数来拟合Be薄膜沉积速率( $v_{Si}$ ):

$$v_{Si} = 1.21 \times 10^{-12} \exp(2.67 \times 10^{-2} T) - 0.53 \quad (2)$$

由式(1)与(2)可知,Be薄膜沉积速率对温度十分敏感。在相同的饱和蒸气压下,单晶Si基片上Be薄膜沉积速率总是比K9基片上的快,主要是由于单晶硅基片的热传导系数比K9基片的大,在硅基片上凝结的铍晶核释放的结晶潜热能够被及时传输出去,这保证后续新沉积的Be原子能够快速凝结下来。而K9基片的导热性能较差,凝结的Be原子释放热量积累较快,使得部分原子又获得能量而脱离表面,这降低

了沉积原子的凝结系数, 致使 K9 基片上 Be 薄膜沉积速率变慢。

## 2.2 薄膜的物相组成

为了确定 Be 薄膜的物相组成, 对不同沉积速率下 Be 薄膜样品进行 XRD 分析(使用 Cu 靶的  $K_{\alpha}$  射线, 波长为 0.154 056 nm)。由于 X 射线对金属 Be 的穿透能力较强, 采用掠入射对 Be 薄膜样品进行测量, 入射角根据薄膜厚度而定。图 2 所示为 K9 基片上生长的不同厚度 Be 薄膜的 XRD 谱, 在  $2\theta$  为 47.4° 处, 为 Cu 的  $K_{\beta}$  线。XRD 分析结果表明: 不同厚度的 Be 薄膜均由 HCP 结构的  $\alpha$ -Be 相组成, 部分薄膜存在 BeO 的(002)峰。随蒸发温度升高, Be 薄膜(100)、(101)和(002)峰的强度均逐渐增大, 但(101)始终为薄膜表面主要显露晶面。在高温蒸镀制备 Be 薄膜过程中, 由于真空室残留的氧, 活性较高的 Be 原子与氧结合, 导致 Be 薄膜中含有 BeO, 随蒸发温度增加 BeO 的(002)峰强度也增加。

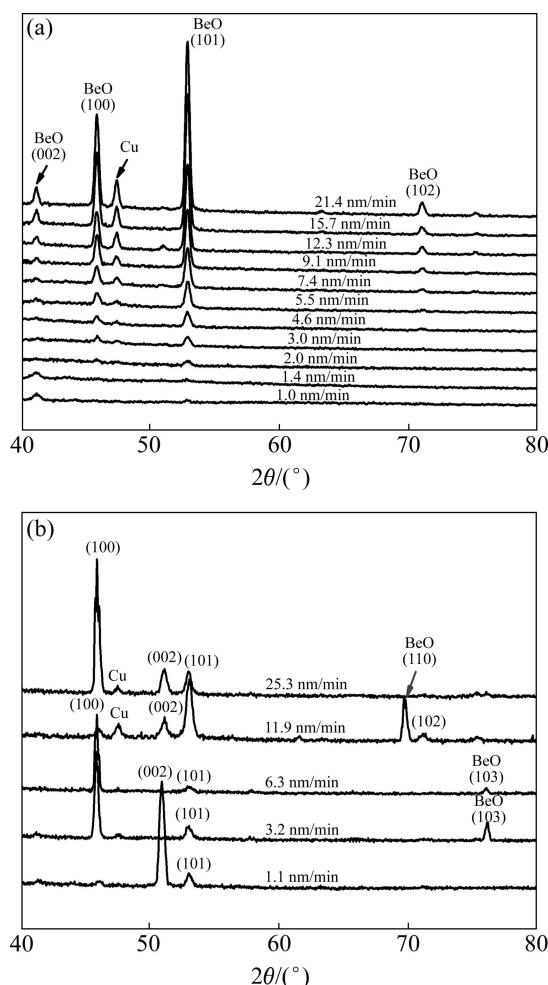


图 2 K9 和 Si(100)基片上 Be 薄膜的 XRD 谱

Fig. 2 XRD patterns of Be films grown on K9 and Si(100) substrates: (a) K9 substrate; (b) Si(100) substrate

图 2 所示为单晶 Si(100)基片上不同厚度 Be 薄膜的 XRD 谱, 结果显示不同厚度的 Be 薄膜均由 HCP 结构的  $\alpha$ -Be 相组成。随蒸发温度升高, Be 薄膜主强峰由(002)峰转变为(100)峰, 薄膜表面显露晶面发生变化, 这与 K9 基片有所不同。同样, Be 薄膜中含有 BeO, 以(103)峰为主。

Si 和 K9 基片存在晶体形态差别。对于单晶 Si 片, 表面生长的 Be 晶粒取向多样, 择优取向晶面在特定的沉积速率下才会显露。而对于无定形的非晶 K9 基片, 由于不存在晶体形态, 晶粒取向较为单一, 始终保持相同的显露(101)晶面。显然, 基片的材质不同, 晶粒择优取向存在较大的差异。

XRD 谱显示, 不同基片均存在 BeO 的峰。为了证实 Be 薄膜氧化, 采用 XPS 进行表面元素分析。在本实验中, 选择性地测量了 3 个 Si(100)基片上的 Be 薄膜样品, 表 1 列出 Be 薄膜表面的氧含量。

表 1 不同沉积速率时 Si 基片上 Be 薄膜表面的氧含量

Table 1 Oxygen mole fraction of Be films grown on Si substrate at different deposition velocities

$v_{Si}/(\text{nm} \cdot \text{min}^{-1})$	$x(O)/\%$
1.1	19
7.8	29
25.3	32

显然, 随蒸发温度的升高, Be 薄膜表面氧含量急剧增加。这是由于高蒸发温度下 Be 原子活性增加, 与残留在真空室中的氧分子发生反应生成 BeO。此外, 薄膜短期放置在空气中, 也存在缓慢氧化; 一旦生成致密的 BeO, 它会阻止薄膜内部的氧化。当蒸发温度从 1 050 增高至 1 110 °C, 薄膜表层含氧量急剧增加。随蒸发温度进一步升高, 表面氧含量趋于饱和。此时表层裸露的 Be 基本上被氧化。XPS 测定结果进一步证实 Be 薄膜中存在氧化, 这与 XRD 测定结果相符。许德美等<sup>[16]</sup>研究发现, 热等静压制备金属铍材料中也存在 BeO, 而且指出氧含量是决定铍材料屈服强度和塑性的重要因素。

## 2.3 薄膜的形态演变规律

图 3 所示为不同沉积速率下 Be 薄膜的生长形态。随薄膜沉积速率增加, K9 基片上的 Be 薄膜生长形态演变如下: 等轴晶(薄膜沉积速率为 1.0~3.0 nm/min)→混合晶(4.5~5.5 nm/min)→粗大纤维晶(7.4~12.3 nm/min)→粗大等轴晶(15.7~21.4 nm/min)。Si(100)晶面上的生长形态演变如下: 等轴晶粒(1.1~3.3 nm/min)→

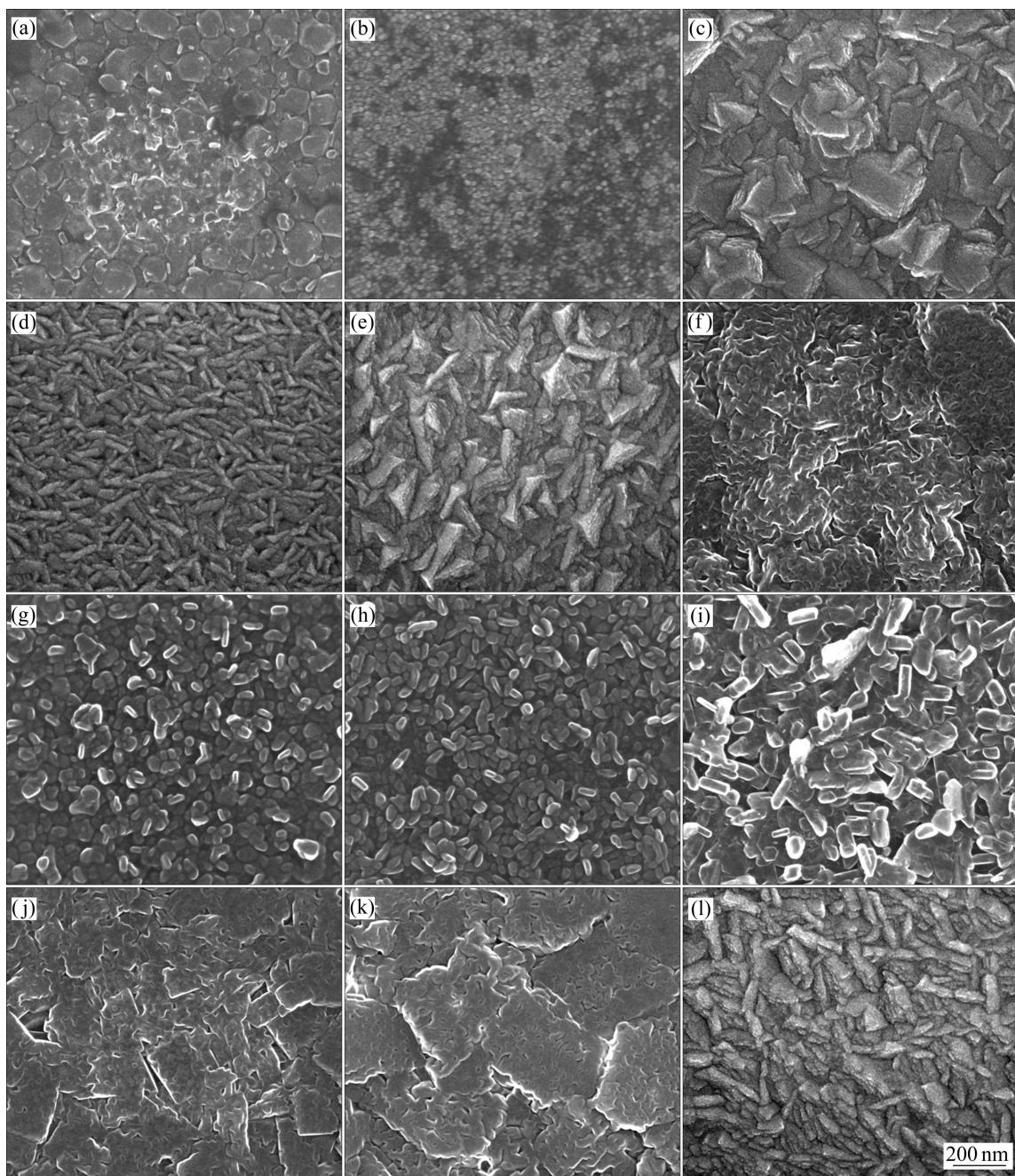


图3 不同沉积速率下K9和Si基片上Be薄膜的形态演变

**Fig. 3** Morphology evolution of Be films grown on different substrates at different deposition velocities: (a)–(f) Morphologies of Be films grown on K9 substrate; (g)–(l) Morphologies of Be films grown on Si(100) substrate: (a) K9 substrate, 1.0 nm/min; (b) K9 substrate, 2.0 nm/min; (c) K9 substrate, 4.5 nm/min; (d) K9 substrate, 7.4 nm/min; (e) K9 substrate, 12.3 nm/min; (f) K9 substrate, 21.4 nm/min; (g) Si substrate, 1.1 nm/min; (h) Si substrate, 2.3 nm/min; (i) Si substrate, 4.8 nm/min; (j) Si substrate, 7.9 nm/min; (k) Si substrate, 15.0 nm/min; (l) Si substrate, 25.3 nm/min

纤维晶( $3.2\sim4.8$  nm/min)→粗大混合晶( $6.3\sim7.9$  nm/min)→粗大等轴粒( $11.9\sim15.0$  nm/min)→粗大纤维晶( $25.3$  nm/min)。

对于K9基片,当Be薄膜沉积速率为 $1.0$  nm/min时,新沉积原子在K9基片上首先形核,由于表面和

体相原子扩散能力较弱,扩散不充分,无法进行晶粒外延生长,后续沉积原子依附在先前凝结原子上而形核,因此,Be薄膜主要以反复形核的方式进行生长。薄膜以等轴晶为主要生长形态,但由于体相原子扩散能力弱,晶粒内缺陷密度较高。Be原子沉积速率为

7.4 nm/min, 表面原子扩散能力增强, 但体相扩散能力不足, 晶粒只能进行外延生长, 薄膜以纤维晶生长为主。随 Be 原子沉积速率增加至 21.4 nm/min, 此时 Be 原子能量较高, 体扩散发挥重要作用, 晶粒迅速外延生长, 表现为粗大的纤维晶, 晶粒内缺陷密度进一步降低。

对于硅基片, Be 薄膜表面形态随温度的变化与 K9 基片有相似之处。当 Be 原子沉积速率为 1.1 nm/min 时, 以规则的等轴晶粒生长为主。随 Be 原子沉积速率增加, Be 原子表面扩散能力增强, 细小等轴晶转变为纤维晶, 然后再转变为粗大等轴晶。Be 原子沉积速率在 7.9~15.0 nm/min 时, 粗大等轴晶进一步再结晶; 当 Be 原子沉积速率增大至 25.3 nm/min, 由于 Be 原子能量较高, 表面和体相原子扩散能力增强, 晶粒以外延纤维晶生长为主, 晶界内缺陷密度降低, 薄膜致密性好。

Be 为 HCP 结构,  $a=0.228\text{ }1\text{ nm}$ ,  $c=0.357\text{ }8\text{ nm}$ 。单晶 Si 为 FCC 结构, 晶格常数为 0.543 1 nm。K9 基片为非晶, 不存在晶形。显然, K9、Si 与 Be 晶体结构和晶格点阵均存在很大差异。在相同的 Be 原子沉积速率下, K9 和 Si 基片上 Be 薄膜生长形态不尽相同。但是, 两者随 Be 原子沉积速率增加具有相似的演变规律: 即从等轴晶变化至纤维晶, 再到粗大等轴晶。

## 2.4 表面粗糙度

在相同沉积时间下对 K9 和 Si 基片上生长的 Be 薄膜的表面粗糙度进行测量, 结果如图 4 所示。显然, 两种基片上生长的 Be 薄膜的  $R_q$  变化趋势十分相似, 即先随 Be 原子沉积速率  $v$  增加而急剧增大, 后趋于平缓, 最大的表面粗糙度值约 40 nm。 $R_q$  与 Be 薄膜沉积速率呈现幂指数函数关系, 在 K9 基片上, 表面粗糙度  $R_q(K9)$  为

$$R_q(K9) = -68 + 81v_{K9}^{0.077} \quad (3)$$

在单晶硅(100)基片上生长的 Be 薄膜, 其表面粗糙度  $R_q(Si)$  为

$$R_q(Si) = -121 + 127v_{Si}^{0.075} \quad (4)$$

随着 Be 原子沉积速率增加, 原子无序度增加。先前沉积的 Be 原子来不及扩散和迁移被后续原子钉扎, 这时晶格缺陷或表面凸起增多, 表面粗糙度急剧增加。当 Be 原子沉积速率大于 13.0 nm/min 后, 尽管原子沉积无序度增加, 但是薄膜表面和体相原子扩散能力增强, 薄膜内部缺陷密度降低, 表面宏观凸起减

小, 表面粗糙度呈现缓慢增加趋势。

从薄膜表面晶体形态而看, K9 基片上 Be 薄膜表面微观组织由等轴晶、混合晶向粗大纤维晶发生转变, 而 Si 基片上 Be 薄膜表面微观组织从等轴晶、纤维晶向粗大混合晶发生转变。总体而言, 以等轴晶生长的薄膜表面光洁度较高, 而以纤维晶或粗大混晶生长的薄膜表面粗糙度较大。显然, 表面晶体生长形态对薄膜表面粗糙度有影响。

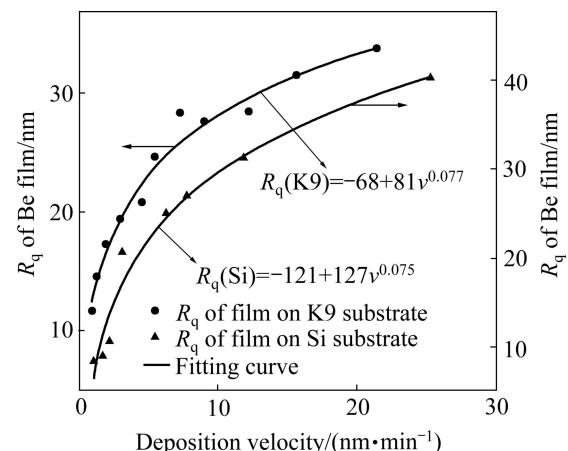


图 4 K9 和 Si(100)基片上 Be 薄膜表面粗糙度随沉积速率的变化关系

Fig. 4 Relationship among roughnesses of Be films grown on K9 and Si(100) substrate with deposition velocity

图 5 所示为不同 Be 原子沉积速率下 K9 和 Si 基片上 Be 薄膜表面原子力显微镜形貌。AFM 测试结果显示: 采用热蒸发制备的 Be 薄膜表面比较平整、光滑。AFM 测试微观区域表面均方根粗糙度均小于 23 nm (AFM 测试面积为  $3\text{ }\mu\text{m} \times 3\text{ }\mu\text{m}$ )。随 Be 原子沉积速率增加, 薄膜表面起伏增大, 表面小尖峰状凸起逐渐演变为馒头状凸起。

台阶仪测量的 Be 薄膜  $R_q$  值为试样测量长度上的平均值, 而 AFM 表征的是区域平均值。两者存在差别, 但总体趋势相似。图 4 和图 5 所示分别为测定台阶仪和 AFM 测定结果, 两者显示趋势相似, 随薄膜沉积速率增大, 薄膜表面更粗糙。

## 2.5 薄膜晶粒尺寸

不同基片上生长的铍薄膜晶粒尺寸进行统计测量, 结果如图 6 所示。对于 K9 基片, 当 Be 薄膜沉积速率小于 1.4 nm/min 时, 晶粒尺寸约为 100 nm。原子沉积速率在 2~6 nm/min 时, 晶粒尺寸迅速减小, 最小可达 25 nm。随 Be 薄膜沉积速率从 7 nm/min 增加至 21.4 nm/min, Be 晶粒尺寸从 40 nm 增加到 250 nm,

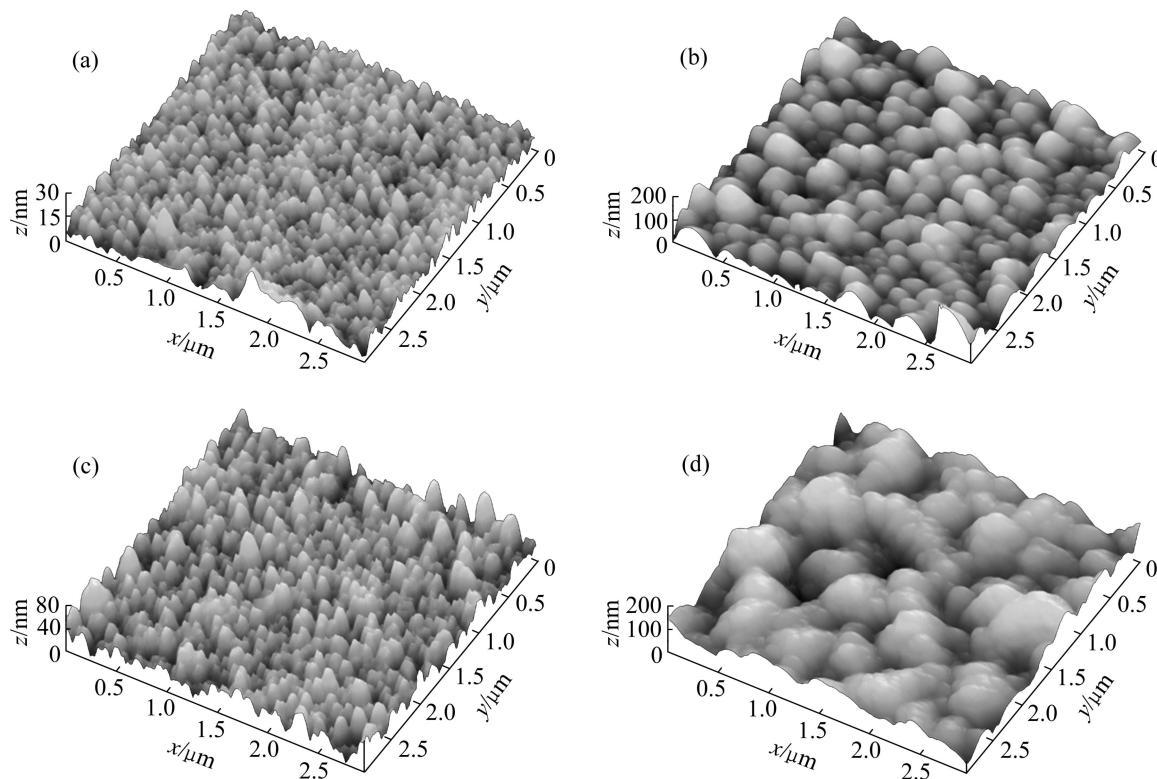


图5 K9和Si(100)基片上Be薄膜表面AFM形貌

**Fig. 5** AFM of Be films grown on K9 and Si(100) substrates: (a) K9 substrate, 1.0 nm/min; (b) K9 substrate, 21.4 nm/min; (c) Si substrate, 1.1 nm/min; (d) Si substrate, 25.3 nm/min

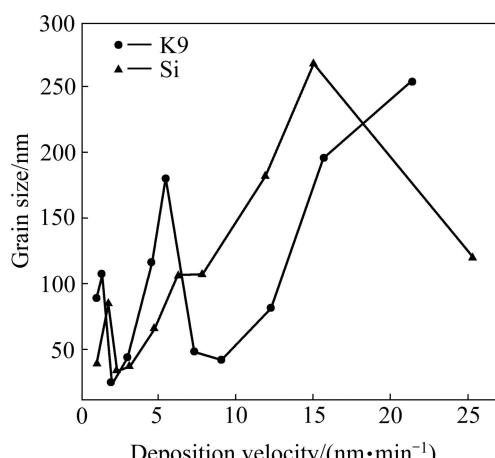


图6 K9和Si(100)基片上Be薄膜晶粒尺寸随沉积速率变化关系

**Fig. 6** Relationships among grain sizes of Be films grown on K9 and Si(100) substrates vs film deposition velocity

一直呈现增加趋势。对于Si基片，当Be薄膜沉积速率小于1.8 nm/min时，晶粒尺寸大约在80 nm。生长速率从2 nm/min增加至15 nm/min时，Be薄膜晶粒尺寸从30 nm增加到270 nm，一直呈现增加趋势。当Be薄膜沉积速率增加至25 nm/min时，晶粒尺寸反而

减少至120 nm。

无论是K9基片还是Si(100)基片生长上的Be薄膜，其晶粒尺寸随沉积速率增加并非单调增加，而是呈现波动变化，在K9基片上晶粒尺寸波动变化较快，而Si基片上的晶粒尺寸波动变化较缓。在合适的沉积速率区间能够获得晶粒细化的Be薄膜。由于K9与Si基片的晶体类型完全不同，被沉积Be原子与两种基片原子晶格常数匹配和原子结合力也不同，初始依附形核和后续晶粒长大存在差异，故两者晶粒尺寸随原子沉积速率的波动变化不一致。

### 3 结论

- 1) 随蒸发温度升高，K9和Si基片沉积的Be薄膜的沉积速率呈指数函数关系增大，分别表示如下：  
 $v_{K9}=1.10 \times 10^{-12} \exp(2.66 \times 10^{-2}T)-0.35$  nm/min 和  $v_{Si}=1.21 \times 10^{-12} \exp(2.67 \times 10^{-2}T)-0.53$  nm/min。在相近的沉积速率下，K9和Si基片上Be薄膜生长形态不尽相同。但是，两者具有相似的演变规律：等轴晶至纤维晶，再到粗大等轴晶。

2) 单晶 Si 和非晶 K9 基片晶体形态存在差别, 晶粒择优取向也存在较大的差别, 对于非晶基片, 由于不存在晶体形态, 晶粒取向较单一, (101)始终为薄膜表面主要显露晶面。而单晶 Si 片表面生长的 Be 晶粒取向多样, 一定的沉积速率下显露特定的晶面。

3) K9 和单晶 Si 基体上生长的 Be 薄膜的  $R_q$  变化趋势十分相似, 随 Be 原子沉积速率  $v$  增加先急剧增大, 后趋于平缓,  $R_q$  与  $v$  呈现幂指数函数关系, 分别为 0.077 和 0.075, 最大的表面粗糙度值均小于 40 nm。以等轴晶生长的薄膜表面光洁度较高, 而以纤维晶或粗大混晶生长的薄膜表面粗糙度较大。

## REFERENCES

- [1] HAAN S W, HERRMANN M C, AMENDT P A. Update on specifications for NIF ignition targets, and their rollup into an error budget[J]. Fusion Science and Technology, 2006, 49(4): 553–557.
- [2] XU H W, ALFORD C S, COOLEY J C, DIXON L A, HACKENGERRG R E, LETTS S A, MORENO K A, NIKROOL A, WALL J R, YOUNGBLOOD K P. Beryllium capsule coating development for NIF targets[J]. Fusion Science and Technology, 2007, 51(4): 547–552.
- [3] HAAN S W, AMENDT P A, CALLAHAN D A. Update on specifications for NIF ignition targets[J]. Fusion Science and Technology, 2007, 51(4): 509–513.
- [4] MORENO K A, EDDINGER S, FONG J. Overview of national ignition facility[J]. Fusion Science and Technology, 2009, 55(4): 349–355.
- [5] HAAN S W, CALLAHAN D A, EDWARDS M J. Rev3 update requirements for NIF ignition targets[J]. Fusion Science and Technology, 2009, 55: 227–232.
- [6] MONTGOMERY D S, NOBILE A, WALSH P J. Characterization of national ignition facility cryogenic beryllium capsules using X-ray phase contrast imaging[J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(10): 3986–3988.
- [7] DAVYDOV D A, KHOLOPOVA O V, KOLBASOV B N. Some characteristics of fine beryllium particle combustion[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 367/370: 1079–1084.
- [8] SWIFT D C, TIERNEY T E, LUO S N, PAISLEY D L, KYRALA G A, HAUER A, GREENFIELD S R, KOSKELO C, MCCLELLAN K J, LORENZANA H E, KALANTAR D, REMINGTON B A, PERALTA P, LOOMIS E. Dynamic response of materials on subnanosecond time scales, and beryllium properties for inertial confinement fusion[J]. Physics of Plasmas, 2005, 12(5): 056308.
- [9] KÁDÁS K, VITOS L, JOHANSSON B, KOLLÁR J. Structural stability of  $\beta$ -beryllium[J]. Physical Review B, 2007, 75(3): 035132-8.
- [10] NIKROOL A, CHEN K C, HOPPE M L, HUANG H, WALL J R, XU H, MCLEFRESH M W, ALFORD C S, COOK R C, COOLEY J C, FIELDS R, HACKENGERRG R, DOEMER R P, BALDWIN M. Progress toward fabrication of graded doped beryllium and CH capsules for the national ignition facility[J]. Physics of Plasmas, 2006, 13(5): 056302-6.
- [11] XU H, NIKROOL A, WALL J R, DOERNER R, BALDWIN M, YU J H. Be coatings on spherical surface for NIF target development[J]. Fusion Science and Technology, 2006, 49(4): 778–785.
- [12] 钟景明, 高勇, 王东新, 王学泽, 王零森. 金属铍的微屈服行为及机理[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(10): 1637–1641. ZHONG Jing-ming, GAO Yong, WANG Dong-xin, WANG Xue-ze, WANG Ling-sen. Micro-yield behavior and mechanism metal[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(10): 1637–1641.
- [13] 谈淑咏, 张旭海, 吴湘君, 蒋建清. Si 基底磁控溅射制备 CrN 薄膜的表面形貌与生长机制[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(6): 1368–1372. TAN Shu-yong, ZHANG Xu-hai, WU Xiang-jun, JIANG Jian-qing. Surface morphology and growth mechanism of magnetron sputtered CrN films on silicon substrate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(6): 1368–1372.
- [14] SIN'KO G V, SMIRNOV N A. Relative stability and elastic properties of hcp, bcc, and fcc beryllium under pressure[J]. Physical Review B, 2005, 71(21): 214108.
- [15] 罗炳池, 罗江山, 李恺, 张吉强, 吴卫东, 唐永建. Be 薄膜制备及其生长动力学性质研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(9): 1684–1688. LUO Bing-chi, LUO Jiang-shan, LI Kai, ZHANG Ji-qiang, WU Wei-dong, TANG Yong-jian. Preparation of Be thin films and the growth dynamic characteristics[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(9): 1684–1688.
- [16] 许德美, 秦高梧, 李峰, 王东新, 夏洪先, 任玉平, 裴文利. BeO 杂质形态与分布对金属铍力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(4): 769–776. XU De-mei, QIN Gao-wu, LI Feng, WANG Dong-xin, XIA Hong-xian, REN Yu-ping, PEI Wen-li. Effects of morphology and distribution of BeO impurity on mechanical properties of metal beryllium[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(4): 769–776.

(编辑 龙怀中)