

# Si(001) 基片上反应射频磁控溅射 ZnO 薄膜的两步生长方法\*

谷建峰 刘志文 刘 明 付伟佳 马春雨 张庆瑜†

(大连理工大学三束材料改性国家重点实验室, 大连 116024)

(2006 年 8 月 9 日收到, 2006 年 10 月 31 日收到修改稿)

利用反应射频磁控溅射技术, 采用两步生长方法制备了 ZnO 薄膜, 探讨了基片刻蚀时间和低温过渡层沉积时间对 ZnO 薄膜生长行为的影响. 研究表明, 低温 ZnO 过渡层的沉积时间所导致的薄膜表面形貌的变化与过渡层在 Si(001) 表面的覆盖度有关. 当低温过渡层尚未完全覆盖基片表面时, ZnO 薄膜的表面岛尺度较小、表面粗糙度较大, 薄膜应力较大; 当低温过渡层完全覆盖 Si(001) 基片后, ZnO 薄膜的表面岛尺度较大、表面粗糙度较小, 薄膜应力较小. 基片刻蚀时间对薄膜表面形貌的影响与低温过渡层的成核密度有关. 随着刻蚀时间的增加, ZnO 薄膜的表面粗糙度逐渐下降, 表面形貌自仿射结构的关联长度逐渐减小.

关键词: ZnO 薄膜, 反应射频磁控溅射, 两步生长, 形貌分析

PACC: 6855, 6810J, 6116P, 7280E

## 1. 引 言

ZnO 作为宽带半导体材料, 具有良好的光电、压电和气敏特性, 在发光二极管、光探测器、声表面波器件及气敏传感器等诸多领域有着广泛的应用<sup>[1-5]</sup>. 自从 Tang 等<sup>[6]</sup>报道了 ZnO 薄膜的近紫外受激发射现象以后, ZnO 成为当今半导体材料领域的一个研究热点<sup>[7,8]</sup>. 在目前的 ZnO 材料研究中, 高质量 ZnO 薄膜的制备是人们关注的重点问题之一. 为了改善 ZnO 薄膜的质量, 各国学者对各种薄膜合成技术中的 ZnO 薄膜生长行为进行了广泛研究, 并取得了一些重要的进展. 例如, Chen 等<sup>[9]</sup>发现以 MgO 作为过渡层有利于 ZnO 薄膜在(001)取向的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基片上层状生长; Ko 等<sup>[10]</sup>在研究 Zn/O 原子比对等离子体辅助下 ZnO 分子束外延生长行为的影响中发现 ZnO 薄膜的生长是受气氛中的 O 浓度所控制的, 并给出了生长过程中 ZnO 表面重构结构变化的相图.

反应射频磁控溅射是一种大面积、低成本的薄膜制备技术, 有着广泛的应用. 近年来, 通过各国学者的不断努力, 反应射频磁控溅射沉积的 ZnO 薄膜

实现了室温光致荧光发射<sup>[11-13]</sup>, 使得这一技术受到 ZnO 研究领域的关注. 在以前的研究工作中<sup>[14]</sup>, 我们发现反应射频磁控溅射沉积的 ZnO 薄膜与 Si(001) 基片之间存在确定的外延生长关系. 我们认为 ZnO 在 Si(001) 基片上的外延生长与 Si(001) 表面的(2×1)重构有关. Si(001) 表面(2×1)重构的键能约为 0.32—0.46 eV<sup>[15]</sup>, 因此沉积温度对表面重构的影响较大. 我们还发现, 较低温度下沉积的 ZnO 薄膜, 其晶粒不仅具有高度的 c 轴择优取向, 而且晶粒之间的平面取向接近, 呈现出明显的织构特征, 有利于通过高温退火方法熔结成更大的晶粒<sup>[14]</sup>. 光学特性的研究结果表明<sup>[16]</sup>, 700 °C 左右沉积的 ZnO 薄膜质量较好, 可以观察到室温光致荧光发射.

基于以上实验结果, 我们提出了在 Si(001) 基片上沉积 ZnO 薄膜的两步生长方法, 即在室温或较低的沉积温度下首先生长一层 ZnO 过渡层, 然后通过原位高温退火, 使低温沉积的 ZnO 薄膜的晶粒进一步长大, 最后在 750 °C 下制备 ZnO 薄膜, 以达到进一步改善薄膜质量的目的. 本文采用反应射频磁控溅射技术, 采用两步生长方法制备了具有高 c 轴取向的 ZnO 薄膜. 利用 X 射线衍射(XRD)、原子力显微镜(AFM)等分析手段对薄膜的结构、应力状态和表面形貌进行了表征, 探讨了基片刻蚀时间、低温 ZnO

\* 国家自然科学基金(批准号: 10605009)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: qyzhang@dlut.edu.cn

过渡层的生长时间对 ZnO 薄膜生长行为的影响.

## 2. 实验与表征

ZnO 薄膜的制备是在 JGPG-450 型射频磁控溅射仪上进行的. 实验中选择金属 Zn 作为溅射靶, 溅射靶直径为 60 mm, 厚为 3 mm, 纯度优于 99.99%. ZnO 薄膜沉积采用 n 型 Si(001) 基片, 厚度为 525  $\mu\text{m}$ , 电阻率大于 500  $\Omega\text{cm}$ . Si 基片清洗处理的方法如下: 将 Si 片放入丙酮、乙醇、去离子水中分别用超声波清洗 5 min, 再在体积比为 3:1 的  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_3\text{PO}_4$  的溶液中浸泡 20 h, 去除 Si 基片表面的油污及其他污染物, 然后在 5% 的 HF 酸溶液中进行刻蚀, 以便剥离掉 Si 基片表面的本征氧化层, 最后经去离子水冲洗, 用干燥  $\text{N}_2$  气吹干后快速放入真空室. 为了探讨基片刻蚀时间对 ZnO 薄膜生长行为的影响, 刻蚀时间分别设定为 0.5, 1, 2 和 3 min.

ZnO 薄膜沉积是在 Ar 和  $\text{O}_2$  混合气氛下进行的, Ar 和  $\text{O}_2$  气体的纯度均为 99.999%. 真空室的本底真空度为  $6.0 \times 10^{-4}$  Pa. 溅射过程中的工作气压为 0.5 Pa, Ar 和  $\text{O}_2$  表观体积流率分别为 20 和 19  $\text{cm}^3/\text{min}$ . Si 基片与溅射靶之间的距离为 70 mm, 溅射靶的射频输入功率为 80 W. 在薄膜的制备过程中, 样品台以 4.8°/s 的速度自转以保证沉积薄膜的均匀性. 为了探讨低温沉积时间对高温 ZnO 薄膜生长行为的影响, 低温沉积时间分别设定为 0, 10, 20 和 30 min. 低温沉积时, 基片未进行加热, 基片的实际温度约为 50  $^\circ\text{C}$ . 低温沉积完成以后, 将基片原位加热至 800  $^\circ\text{C}$ , 进行真空退火 1 h. 最后, 在 750  $^\circ\text{C}$  的基片温度下沉积 ZnO 薄膜 3 h.

ZnO 薄膜的生长形貌分析是在 Digital II a 型 AFM 上完成的. AFM 分析采用接触式扫描模式, 所选取的扫描范围分别为 8  $\mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$ , 4  $\mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$  和 0.5  $\mu\text{m} \times 0.5 \mu\text{m}$ , 以研究不同扫描范围内的表面形貌特征. XRD 分析是在 D/MAX-2400 型衍射分析仪上进行的, X 射线源为  $\text{CuK}\alpha$  辐射, 波长  $\lambda = 0.15418 \text{ nm}$ .

## 3. 结果及分析

### 3.1. 低温沉积时间对 ZnO 薄膜生长的影响

图 1 是采用两步生长方法沉积的 ZnO 薄膜的表

面形貌, 低温沉积时间  $t_1$  分别为 0, 10, 20 和 30 min, 基片的刻蚀时间为 1 min. 从图 1 可以看出,  $t_1$  不同 ZnO 薄膜的表面形貌也明显不一样. 当没有低温过渡层时, ZnO 薄膜的表面岛密度较大, 尺寸较小. 此时的表面岛主要呈现出两种形貌特征: 光滑的竹笋状表面岛和相对粗糙的多边形表面岛, 分别如图 1 (a) 中 A, B 所示. 竹笋状表面岛的尺寸相对较小, 但平均高度较高, 而多边形表面岛的表面相对平坦, 部分表面岛的表面存在一些凹坑和沟槽. 定量分析表明, 竹笋状表面岛的斜面与扫描平面之间的夹角在 30° 左右, 多边形表面岛的表面与扫描平面之间夹角一般小于 3°. 这说明竹笋状表面岛与多边形表面岛的生长行为是不同的.

当低温沉积时间  $t_1$  为 10 min 时, 竹笋状表面岛 (图 1 (b) 中 A 所示) 的比例明显增加, 岛尺度虽然有所增加, 但不是很明显, 说明低温过渡层对 ZnO 薄膜生长的影响较小. 当  $t_1$  为 20 min 时, ZnO 薄膜的表面形貌发生了明显改变, 竹笋状表面岛的比例显著减少, 相对粗糙的表面岛变成不规则形状, 岛尺度明显增加. 同时, 我们注意到不规则形状表面岛的表面特征也有所变化, 岛表面与扫描平面之间的夹角有所增加.  $t_1$  为 30 min 的 ZnO 薄膜表面形貌与 20 min 类似, 说明低温过渡层的沉积时间超过 20 min 以后, 过渡层对薄膜生长行为的影响基本相同.

我们认为, 低温过渡层的沉积时间所导致的薄膜表面形貌的变化与过渡层在 Si(001) 表面的覆盖度有关. 在反应射频磁控溅射 ZnO 薄膜的成核及生长行为研究中<sup>[17]</sup>, 我们发现 ZnO 薄膜在 Si(001) 表面的成核过程可大致分为三个阶段, 形成完全覆盖的连续薄膜所需要的时间比较长. 两步生长方法所制备的 ZnO 薄膜形貌分析结果表明, 当  $t_1$  为 10 min 时 ZnO 在 Si(001) 表面尚未完全覆盖, 呈孤立的表面岛分布. 在随后的高温退火过程中, 这些孤立分布的表面岛不能熔结成面积较大的晶粒, 因此, 对随后的高温生长影响较小, 与没有低温过渡层的 ZnO 薄膜生长行为类似. 当  $t_1$  大于 20 min 以后, 低温过渡层已经基本上覆盖了 Si(001) 基片, 在随后的高温退火过程中, 平面取向接近的 ZnO 晶粒可以熔结成更大的晶粒, 因此高温生长的 ZnO 薄膜相当于同质外延生长.

XRD 分析表明, 尽管低温沉积时间  $t_1$  不同, 但所有的 ZnO 薄膜只有 (002) 和 (004) 衍射峰, 说明低温过渡层的存在没有改变 ZnO 薄膜的  $c$  轴择优取

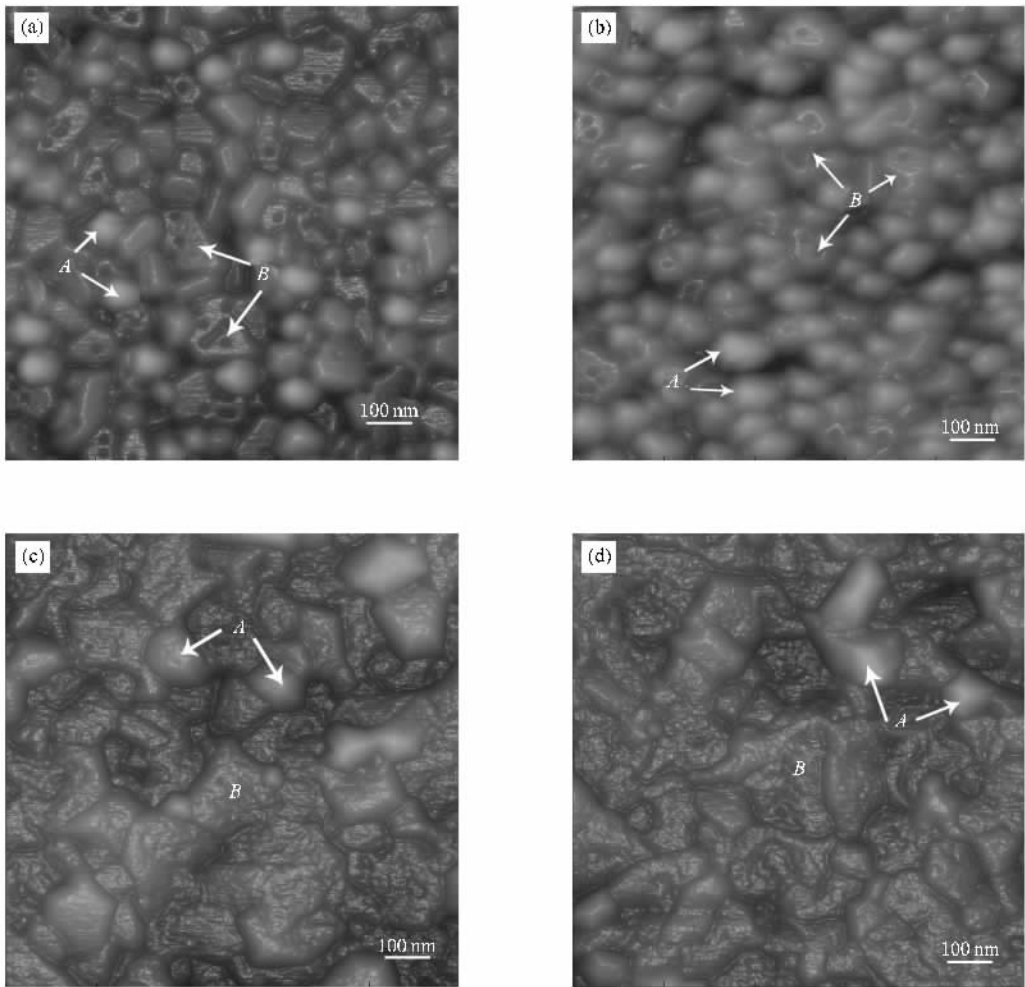


图1 两步生长方法沉积的 ZnO 薄膜的表面形貌 (a),(b),(c)和(d)对应  $t_1$  分别为 0,10,20 和 30 min,基片的刻蚀时间为 1 min,A 代表竹笋状表面岛,B 代表多边形表面岛

向.但是,仔细分析发现低温过渡层对 ZnO 薄膜的应力状态影响较大,而且与  $t_1$  有关.图 2 是采用两步生长方法沉积的 ZnO 薄膜(002)衍射峰.从图 2 可以看到,随着  $t_1$  的增加,(002)衍射峰逐渐向高角方向偏移.同时我们注意到, $t_1$  为 10 min 时,ZnO 薄膜的衍射峰峰位位移较小,与没有过渡层的 ZnO 薄膜比较接近; $t_1$  为 20 和 30 min 时,ZnO 薄膜的衍射峰峰位位移较大,而且两者之间的差异较小.根据 ZnO 薄膜的 XRD 应力分析公式<sup>[18]</sup>, $t_1$  分别为 0,10,20 和 30 min 时,所对应的 ZnO 薄膜应力分别为  $-0.83$  ,  $-0.70$  ,  $-0.18$  和  $0.15$  GPa. XRD 分析结果与根据 AFM 表面形貌分析所得到的结论是符合的,说明没有过渡层或过渡层尚未完全覆盖基片时,基片对 ZnO 薄膜生长的影响较大,薄膜的生长行为与 Si(001)面和 ZnO(001)面之间的晶格失配度有关;当

过渡层完全覆盖基片时,界面应力在高温退火过程中得以充分释放,ZnO 薄膜的生长行为受界面晶格失配的影响相对较小.

为了进一步了解低温过渡层对 ZnO 薄膜生长行为的影响,图 3 给出了不同扫描范围的薄膜均方根表面粗糙度  $R_{\text{rms}}$  随低温沉积时间的变化.从图 3 中可以看到,对于  $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$  以上的扫描范围,同一沉积条件下的 ZnO 薄膜  $R_{\text{rms}}$  基本相同.在  $t_1$  为 10 min 时  $R_{\text{rms}}$  最高,此后,随  $t_1$  的增加  $R_{\text{rms}}$  逐渐下降.当  $t_1$  为 30 min 时, $R_{\text{rms}}$  与没有过渡层的 ZnO 薄膜基本相同.对于  $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$  和  $0.5 \mu\text{m} \times 0.5 \mu\text{m}$  的扫描范围,没有过渡层的 ZnO 薄膜的  $R_{\text{rms}}$  下降较小,而  $t_1$  为 20 和 30 min 的 ZnO 薄膜的  $R_{\text{rms}}$  下降较大,意味着此时局域平坦的范围较大,这与薄膜表面岛尺度的增加是一致的.

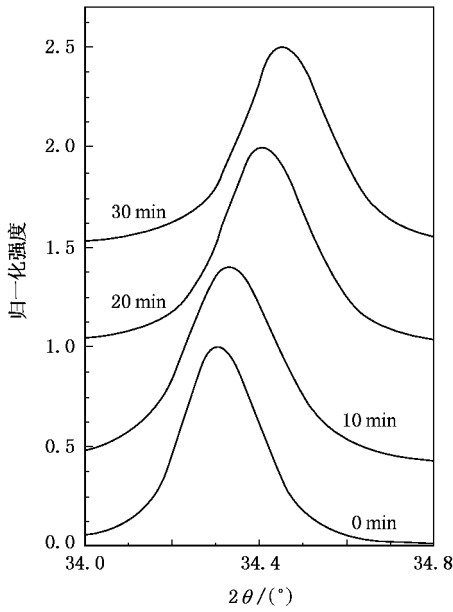


图 2 不同沉积时间的 ZnO 薄膜(002)衍射峰

为了定量地描述薄膜表面形貌的变化,我们对薄膜的 AFM 表面形貌像进行了一维功率谱密度(1DPSD)分析. 1DPSD 可以定义为<sup>[19, 20]</sup>

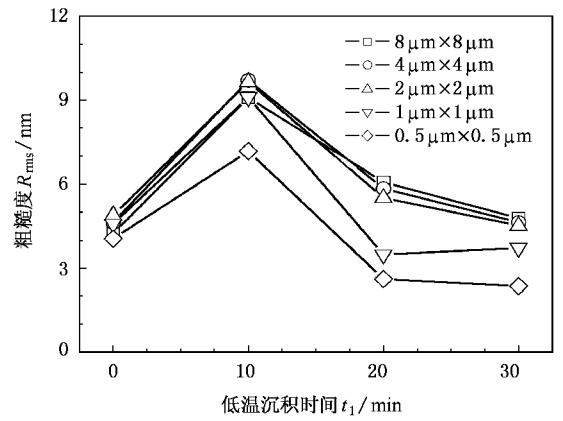


图 3 不同扫描范围的薄膜表面粗糙度  $R_{rms}$  随低温沉积时间的变化

$$P(f)_{\text{1DPSD}} = \frac{1}{L} \left| \int_0^L y(x) e^{i2\pi fx} dx \right|^2, \quad (1)$$

其中  $L$  为扫描长度,  $y(x)$  为轮廓线,  $f$  为空间频率,  $x$  为该区域扫描方向的坐标值.

图 4 给出了不同沉积条件下的 ZnO 薄膜的  $P(f)_{\text{1DPSD}}$  谱, 扫描范围为  $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ , 共  $256 \times 256$  个像素点. 从图 4 中可以看到,  $P(f)_{\text{1DPSD}}$  与频率之间

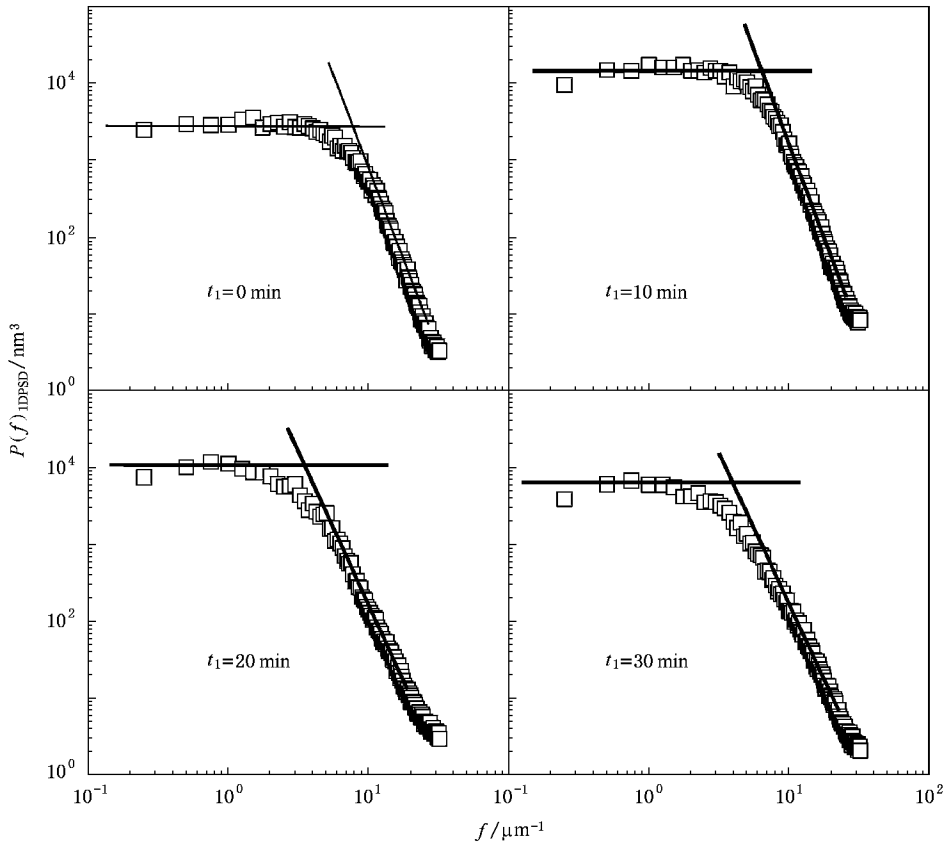


图 4 不同沉积条件下 ZnO 薄膜的  $P(f)_{\text{1DPSD}}$  谱 扫描范围为  $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ , 共  $256 \times 256$  个像素点

的双对数关系曲线可划分为低频平台区和高频线性区两个区域. 低频平台区意味着扫描方向上缺乏局域关联, 而高频线性区域与表面形貌的自仿射结构有关<sup>[19]</sup>. 根据薄膜生长的标度理论, 在一定范围内,  $P(f)$ 与  $f$  之间满足下列关系:

$$P(f)_{\text{DFSD}} = K_0 f^{-\gamma}, \quad (2)$$

其中  $K_0$  是常数, 而  $\gamma$  与标度指数  $\alpha$  和扫描维数  $d$  之间的关系为

$$\alpha = \frac{1}{2}(\gamma - d). \quad (3)$$

通过对高频线性区作线性拟合, 可以得到  $t_1$  分别为 0, 10, 20 和 30 min 时薄膜的高频直线区的  $\gamma$  值分别为 4.93, 4.97, 3.95 和 3.99, 所对应的标度指数  $\alpha$  分别为 1.97, 1.98, 1.47 和 1.49. 根据  $\gamma$  值和平台非局域关联区域的数值  $P(1/L)$ , 可以确定表面形貌自仿射结构的关联长度  $\xi$ <sup>[19]</sup>, 即图 4 中的直线交点所对应的长度,

$$\xi = \exp\left\{\frac{\ln[P(1/L)_{\text{DFSD}}] - \ln K_0}{\gamma}\right\}. \quad (4)$$

对于  $t_1$  分别为 0, 10, 20 和 30 min 的 ZnO 薄膜, 根据

(4) 式所计算的关联长度分别为 132, 159, 269 和 239 nm. 表面形貌自仿射结构的关联长度是晶粒尺度的反映. 因此, 这一结果说明低温过渡层的存在可以增加 ZnO 薄膜的晶粒尺度. 但是, 低温过渡层过厚可能导致高温退火过程中晶粒之间的熔结变得比较困难, 反而可能影响晶粒的长大.

### 3.2. 基片刻蚀时间对薄膜生长的影响

通过低温过渡层的沉积时间对薄膜表面形貌影响的分析可以发现, 不同沉积条件下的薄膜表面形貌均存在两种不同特征的表面岛. 根据 ZnO 薄膜成核过程的研究结果<sup>[17]</sup>, 我们认为竹笋状表面岛可能与初始的缺陷成核有关. 这些优先成核的 ZnO 表面岛比后期因低能粒子轰击而二次成核形成的岛要高得多. 因此, 即使高温退火可以使低温过渡层内的晶粒熔结, 也不能完全消除这种高度的差异. 为此, 我们研究了基片刻蚀时间  $t_2$  对两步生长 ZnO 薄膜的影响, 探讨通过控制低温过渡层的成核密度, 以减小晶粒之间的高度差异.

图 5 是两步生长方法沉积的 ZnO 薄膜的表面形

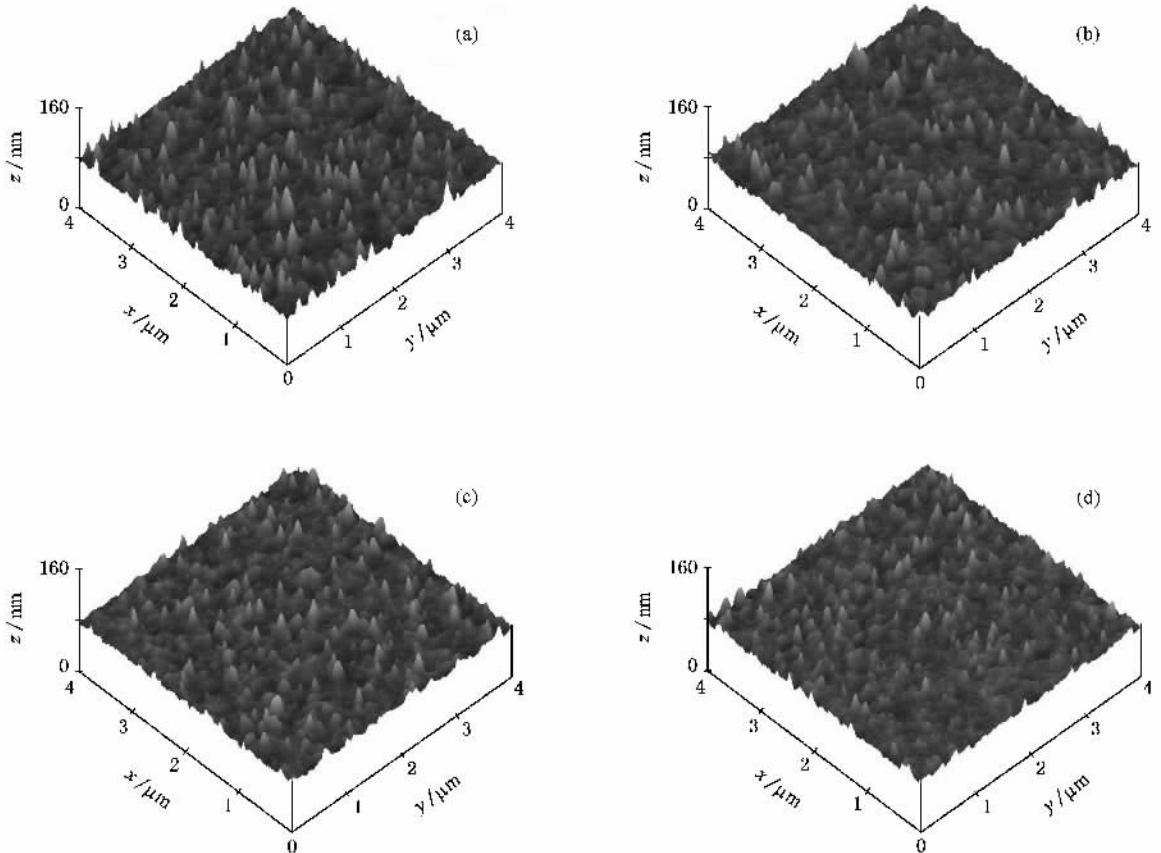


图 5 ZnO 薄膜的表面形貌 (a)(b)(c)和(d)对应基片刻蚀时间  $t_2$  分别为 0.5, 1.0, 2.0 和 3.0 min,  $t_1$  为 30 min

貌.基片刻蚀时间  $t_2$  分别为 0.5, 1.0, 2.0 和 3.0 min,  $t_1$  为 30 min. 从图 5 可以看出,  $t_2$  不同所导致的表面形貌的变化不大, 主要表现在竹笋状表面岛的密度不同. 随着  $t_2$  的增加, 竹笋状表面岛的密度有所降低. 我们认为, 导致这一现象的原因是  $t_2$  不同所引起低温沉积的 ZnO 成核密度变化的结果. 随着  $t_2$  的增加, 低温沉积的 ZnO 成核密度增加, 晶粒尺度减小, 晶粒之间的高度差异减小. 经高温退火处理以后, 晶粒之间的熔结使得具有较大高度的 ZnO 晶粒的比例下降, 二次生长时竹笋状表面岛的密度降低. 需要指出的是, 我们对低温过渡层的退火研究表明, 退火温度对低温过渡层的表面粗糙度也有影响. 在退火温度较低时, 低温过渡层的表面粗糙度随退火温度的增加而减小. 在退火温度较高时, 低温过渡层的表面粗糙度随退火温度的增加而明显增加.

图 6 给出了不同扫描范围的薄膜表面粗糙度  $R_{rms}$  随  $t_2$  的变化. 由于此时薄膜的关联长度较大, 扫描范围较小的表面粗糙度随扫描区域的选择随机性较大, 因此我们只给出了扫描范围大于  $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$

的表面粗糙度. 从图 6 可以看出, 同一基片刻蚀时间下的 ZnO 薄膜粗糙度基本相同. 随着  $t_2$  的增加, ZnO 薄膜的表面粗糙度逐渐下降. 这一结果说明, 可以通过改变基片刻蚀时间控制低温过渡层成核密度, 进而实现对二次生长的 ZnO 薄膜表面粗糙度的控制. 此外, XRD 分析表明,  $t_2$  对两步生长的 ZnO 薄膜的  $c$  轴择优取向和应力状态的影响不大.

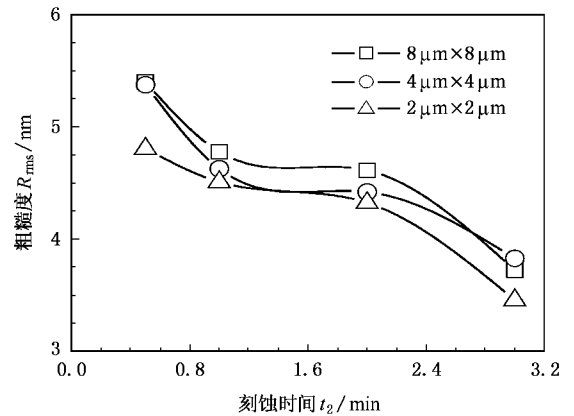


图 6 不同扫描范围的薄膜表面粗糙度  $R_{rms}$  随基片刻蚀时间的变化

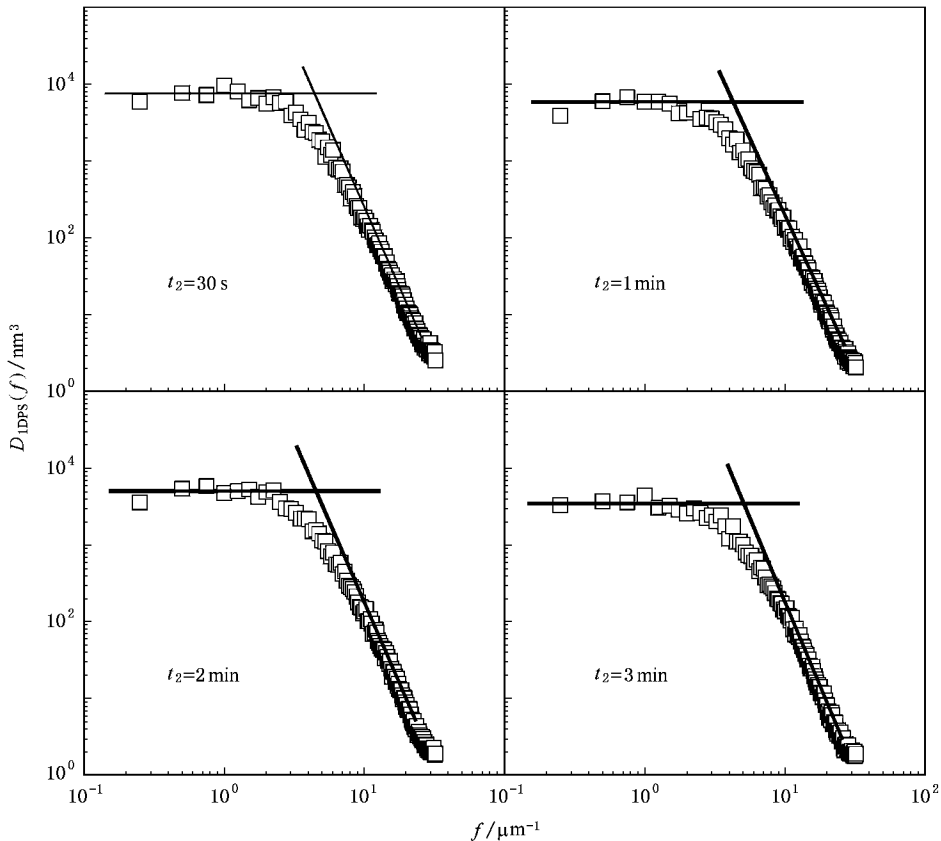


图 7 不同基片刻蚀时间的 ZnO 薄膜的  $P(f)_{IPPS}$  谱. 扫描范围为  $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ , 共  $256 \times 256$  个像素点

为了定量地描述基片刻蚀时间对薄膜表面形貌的影响,我们对薄膜的 AFM 表面形貌像进行了  $P(f)_{\text{AFM}}$  分析. 图 7 给出了不同基片刻蚀时间的 ZnO 薄膜的  $P(f)_{\text{AFM}}$  谱, 扫描范围为  $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ , 共  $256 \times 256$  个像素点. 从图 7 可以看到, 不同的基片刻蚀时间的高频线性区域的斜率变化不大. 线性拟合结果表明,  $t_2$  分别为 0.5, 1.0, 2.0 和 3.0 min 时, 薄膜高频直线区的  $\gamma$  值分别为 4.06, 3.99, 4.29 和 4.47, 所对应的标度指数  $\alpha$  分别为 1.53, 1.49, 1.65 和 1.73. 根据 (4) 式所计算的关联长度分别为 242, 239, 222 和 196 nm. 这一结果说明, 随着  $t_2$  的增加, 两步生长方法所制备的 ZnO 薄膜的晶粒尺度有所减小, 这与低温过渡层的成核密度增加是一致的. 这一结果还说明, 针对不同的应用目标, 需要考虑表面粗糙度、晶粒尺度等综合因素, 进而选择合适的基片刻蚀时间.

## 4. 结 论

1) 低温过渡层的沉积时间对两步生长方法沉积的 ZnO 薄膜的生长行为有重要影响. 低温 ZnO 过渡层的沉积时间所导致的薄膜表面形貌的变化与低温过渡层在 Si(001) 表面的覆盖度有关. 当低温沉积的 ZnO 过渡层尚未完全覆盖基片表面时, ZnO 薄膜的表面岛尺度较小, 表面粗糙度较大, 薄膜应力较大. 当低温过渡层已经基本完全覆盖 Si(001) 基片后, ZnO 薄膜的表面岛尺度较大, 表面粗糙度较小, 薄膜应力较小.

2) Si 基片的刻蚀时间对两步生长方法沉积的 ZnO 薄膜的生长行为有一定的影响. 基片刻蚀时间对薄膜表面形貌的影响与低温沉积的 ZnO 过渡层的成核密度有关. 随着刻蚀时间的增加, ZnO 薄膜的表面粗糙度逐渐下降, 表面形貌自仿射结构的关联长度逐渐减小.

- [1] Stolt L, Hedstrom J, Kessler J *et al* 1993 *Appl. Phys. Lett.* **62** 597
- [2] Wacogne B, Roe M P, Pattinson T J *et al* 1995 *Appl. Phys. Lett.* **67** 1674
- [3] Bagnall D M, Chen Y F, Zhu Z *et al* 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 2230
- [4] Aoki T, Hatanaka Y, Look D C 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 3257
- [5] Ryu Y R, Kim W J, White H W 2000 *J. Cryst. Growth* **219** 419
- [6] Tang Z K, Wong G K L, Yu P 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 3270
- [7] Wen X M, Ohno N, Zhang Z M 2001 *Chin. Phys.* **10** 874
- [8] Wang Z J, Wang Z J, Li S C *et al* 2004 *Chin. Phys.* **13** 750
- [9] Chen Y, Ko H, Hong S *et al* 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 559
- [10] Ko H, Yao T, Chen Y *et al* 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 4354
- [11] Fang Z B, Gong H X, Liu X Q *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1748 (in Chinese) [方泽波, 龚恒翔, 刘雪芹等 2003 物理学报 **52** 1748]
- [12] Sun C W, Liu Z W, Zhang Q Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 430 (in Chinese) [孙成伟, 刘志文, 张庆瑜 2006 物理学报 **55** 430]
- [13] Jeong S H, Kim B S, Lee B T 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 2625
- [14] Liu Z W, Sun C W, Gu J F *et al* 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 251911
- [15] Eastman D E 1980 *J. Vac. Sci. Technol.* **17** 492
- [16] Sun C W, Liu Z W, Qin F W *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1390 (in Chinese) [孙成伟, 刘志文, 秦福文等 2006 物理学报 **55** 1390]
- [17] Liu Z W, Gu J F, Sun C W *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1965 (in Chinese) [刘志文, 谷建峰, 孙成伟等 2006 物理学报 **55** 1965]
- [18] Wang Y G, Lau S P, Lee H W *et al* 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 1597
- [19] Biscarini F, Samori P, Greco O *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 2389
- [20] Lita A E, Sanchez J E Jr 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 876

# Two-step growth of ZnO films deposited by reactive radio-frequency magnetron sputtering on Si(001) substrate<sup>\*</sup>

Gu Jian-Feng Liu Zhi-Wen Liu Ming Fu Wei-Jia Ma Chun-Yu Zhang Qing-Yu<sup>†</sup>

(*State Key Laboratory of Materials Modification by Laser, Ion and Electron Beams,*

*Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

(Received 9 August 2006; revised manuscript received 31 October 2006)

## Abstract

Using reactive radio-frequency magnetron sputtering, ZnO films have been deposited on Si(001) substrate with a two-step growth method. The first step: depositing a ZnO buffer layer at low temperature and annealing at 800 °C, the second step: growing the ZnO at the temperature of 750 °C. In this paper, we discuss the dependence of the ZnO film growth on the etching time of Si chips and the deposition time of the buffer layer. It is found that different deposition time of the buffer layer results in the difference in the morphology of ZnO films. The difference can be related to the coverage of the buffer layer. When the buffer layer does not cover the substrate, the ZnO film has small grains similar to the film without buffer layer and quite large roughness and internal stress. When the substrate is completely covered by the buffer layer, a ZnO film can be obtained with large-sized grains, smooth surface and low internal stress. The growth behavior of the ZnO films is also related to the etching time of Si chip. With the increase of etching time, both the roughness of the ZnO films and the correlation length of the self-affine morphology decrease.

**Keywords:** ZnO film, reactive radio-frequency magnetron sputtering, two-step growth, morphological analysis

**PACC:** 6855, 6810J, 6116P, 7280E

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10605009).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: qzhang@dlut.edu.cn