材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022020901

# 原子层沉积低温生长 α-$MoO_3$ 薄膜

成天乐，曹　发，李　佳，季小红*

（华南理工大学 材料科学与工程学院，广州 510641）

**摘　要：** 以六羰基钼和氧气为前驱体，通过等离子增强原子层沉积技术（PE-ALD）在硅基片上实现了 α-$MoO_3$ 薄膜的低温制备。利用 X 射线衍射仪、扫描电子显微镜、原子力显微镜、X 射线光电子能谱仪等手段对薄膜的晶体结构、表面形貌及薄膜成分进行表征和分析。研究发现衬底温度和氧源脉冲时间对 $MoO_3$ 薄膜的晶体结构和表面形貌变化起关键作用。当衬底温度为 170 ℃及以上时所制备的薄膜为 α-$MoO_3$；适当延长 ALD 单循环中的氧源脉冲时间有利于低温沉积沿（0$k$0）高度择优取向的 $MoO_3$ 薄膜。根据对不同厚度 $MoO_3$ 薄膜表面的原子力显微图片分析，$MoO_3$ 薄膜为岛状生长模式。

**关键词：** 原子层沉积；氧化钼薄膜；低温沉积；α-$MoO_3$

**中图分类号：** TN304　**文章编号：** 1001－5868(2022)03－0567－06

## Low Temperature Growth of Polycrystalline Molybdenum Oxide Thin Films by Atomic Layer Deposition

CHENG Tianle, CAO Fa, LI Jia, JI Xiaohong

(School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, CHN)

**Abstract:** Polycrystalline $MoO_3$ thin films were fabricated on silicon substrates at low temperature by plasma-enhanced atomic layer deposition (PE-ALD) using molybdenum hexacarbonyl and oxygen as precursors. Crystal structure, surface morphology, elemental composition of the deposited $MoO_3$ films were characterized by XRD, SEM, AFM and XPS. Results show that the crystal structure and surface morphology of the fabricated $MoO_3$ thin films are highly dependent on the substrate temperature and the pulse time of the oxygen plasma. When the substrate temperature is 170 ℃ and above, the as-grown film is α-$MoO_3$. Highly (0$k$0) prefer-orientated $MoO_3$ thin films can be obtained at 170 ℃ by properly prolonging the pulse time of oxygen plasma to 60 s. The films are followed by the island growth mode based on the AFM analysis.

**Key words:** ALD; $MoO_3$; low temperature deposition; polycrystalline thin films

## 0　引言

三氧化钼（$MoO_3$）是一种典型的过渡金属氧化物，其禁带宽度为 2.9～3.2 eV，功函数为 6.8 eV，具有较大的介电常数，在太阳电池[1]、大面积光显示和光调制器件[2]、电化学储能器件[3]、气敏传感器[4]、光催化[5]、光电探测器[6]等领域有广泛的应用。非晶氧化钼无序松散的结构适合离子的嵌入/脱嵌，多用于电致变色器件[7]。非晶薄膜在一定条件下可以转变为多晶；多晶薄膜中晶界引起的晶粒散射和势垒会阻碍载流子的输运，但相较非晶薄膜材料，多晶半导体薄膜材料的理论迁移率更高，且晶界势垒能有效增强薄膜的压敏、气敏等性能。

随着半导体、微电子的飞速发展，电子元器件尺寸不断缩小，对复杂表面上沉积和薄膜厚度控制需

收稿日期：2022－02－09.

* 通信作者：季小红　E-mail：jxhong@scut.edu.cn

求不断提升，原子层沉积技术(ALD)制备薄膜因其独特的表面自限制、自饱和生长方式，较低的生长温度，容易实现对膜厚的准确控制而备受关注。已报道的 ALD 制备 $MoO_3$ 薄膜多为非晶[8]，虽然可以通过后续退火处理获得多晶薄膜，但是较高的退火温度必将限制其柔性/温度敏感衬底的应用，故研究 ALD 低温制备多晶 $MoO_3$ 薄膜具有重要意义。Diskus 等[9]较早以六羰基钼[$Mo(CO)_6$]为前驱体，臭氧和水为氧源，用 ALD 法制备了非晶 $MoO_3$ 薄膜，薄膜自限制反应生长的温度窗口为 152～172 ℃。所生长的 $MoO_3$ 非晶薄膜经 500～600 ℃退火后由非晶转变为 α-和 β-$MoO_3$ 多晶。Liu 等[10]以 $Mo(CO)_6$/$O_3$ 在更低的温度(120 ℃)下制备了非晶氧化钼薄膜；Martijn 等[11]使用热 ALD，以双(叔丁基亚氨基)-双(二甲基氨基)钼[$(NtBu)_2(NMe_2)_2Mo$]作为前驱体，臭氧作为氧源制备了 $MoO_{3-x}$ 薄膜，当沉积温度较低(50～250 ℃)时，薄膜为非晶，当沉积温度高于 250 ℃时，薄膜为多晶。Mattinen 等[12]报道了以 $MoO_2(thd)_2$ 和臭氧作为前驱体，ALD 沉积温度在 250 ℃及以下时，$MoO_3$ 为非晶；沉积温度大于 275 ℃时，制备的薄膜为 γ 相 $Mo_4O_{11}$ 多晶。综上所述，ALD 沉积温度低于 250 ℃时所制备的氧化钼薄膜多为非晶，经后期退火处理才能够获得多晶 α 相、β 相或 γ 相的氧化钼薄膜。

本文采用低温 PE-ALD 技术制备多晶 $MoO_3$ 薄膜。通过 XRD，SEM，拉曼光谱，XPS，AFM 等手段研究了衬底温度和氧等离子源脉冲时间对 $MoO_3$ 薄膜材料晶体结构及形貌的影响，探究了 ALD 低温生长 $MoO_3$ 薄膜的机理。

## 1 实验

薄膜的制备采用了等离子增强原子层沉积设备(PEALD-100R，科民电子)。使用 $Mo(CO)_6$(苏州复纳电子科技有限公司)和氧气作为前驱体，Si(100)为衬底。Si 衬底经过丙酮、甲醇、异丙醇、去离子水超声清洗表面污染，$N_2$ 吹干备用。薄膜制备过程中以 Ar(纯度 99.999%，广州市粤佳气体有限公司)作为载气，$O_2$(纯度 99.999%，广州市粤佳气体有限公司)作为氧源，氧气流量为 15 $cm^3$/min；钼源温度设置为 45 ℃。ALD 工艺流程如表 1 所示。ALD 制备氧化钼薄膜生长主要反应如下(其中|表示衬底表面，最终形成的物质是 $MoO_3$)：

$Mo(CO)_6(g)+\|-O\rightarrow\|-O-Mo(CO)_{0.5}+5.5CO(g)$

$\|-O-Mo(CO)_{0.5}+1.5O_2(g)\rightarrow\|-O-Mo-O_3+0.5CO(g)$

用 X 射线衍射仪表征薄膜的晶体结构(PANalytica X'pert PRO，Cu-Kα 射线)，场发射扫描电子显微镜(FESEM)观察薄膜的表面微观形貌(FEINova Nano SEM 430)；使用显微拉曼光谱仪(Renishaw Via Reflex)分析薄膜拉曼光谱；用 X 射线光电子能谱仪(Thermo Fisher Scientific Kα)分析表面元素构成与化学价态，以 284.8 eV 的碳 C1s 峰校准 XPS 数据；用探针轮廓仪(Veeco dektak150)测量薄膜厚度；用原子力显微镜(BrookeMultimode 8)表征样品的表面形貌。

**表 1 氧化钼薄膜的 ALD 制备工艺流程**

| 钼源脉冲时间/s | 反应时间/s | 冲洗时间/s | 氧源脉冲时间/s | 冲洗时间/s | 反应循环数 | 衬底温度/℃ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 4 | 60 | 变量 1 | 40 | 变量 2 | 变量 3 |

## 2 结果与分析

### 2.1 衬底温度的影响

图 1 是在不同衬底温度下制备的氧化钼薄膜的 X 射线衍射图谱。图中位于 12.8°，25.7°，27.4°，38.8°和 46.3°的衍射峰分别对应于正交晶系 α-$MoO_3$ 的(020)，(040)，(021)，(060)和(002)晶面衍射(JCPDS No. 05-0508)。当衬底温度为 140 ℃时，所制备的薄膜仅检测到(020)晶面的微弱衍射；当衬底温度增加到 170 ℃时，制备的 $MoO_3$ 薄膜衍射峰明显增强；当温度继续升高到 200 ℃时，$MoO_3$ 薄膜沿(021)择优取向生长。根据 Scherrer 公式：$D=\frac{K\lambda}{\beta\cos\theta}$(其中，$D$ 为平均晶粒尺寸，$K$ 为 Scherrer 常数，取 0.89，$\lambda$ 为 X 射线波长，取 0.154 056 nm；$\beta$ 为样品衍射峰半高宽，$\theta$ 为布拉格衍射角)，计算得到在 140，170 和 200 ℃衬底温度下制备的 $MoO_3$ 薄膜平均晶粒尺寸分别为 11.2，31.6 和 42.0 nm。由此可见，$MoO_3$ 薄膜的结晶特性与衬底温度密切相关：随着衬底温度的增加，薄膜样品的 X 射线衍射峰明显增强，即薄膜的结晶质量随衬底温度的增加而提高，相应的平均晶粒尺寸显著增大。图 2 是氧等离子体脉冲时间为 30 s，在不同衬底温度下生长的 $MoO_3$ 薄膜表面的 SEM 照片。从图中可以看出，在较低衬底温度条件下制备的 $MoO_3$ 薄膜呈颗粒状，

当温度升高至 170 和 200 ℃时，薄膜表面组成颗粒显著增大，且长宽比变化明显，形成纺锤状、豆荚状聚集体。

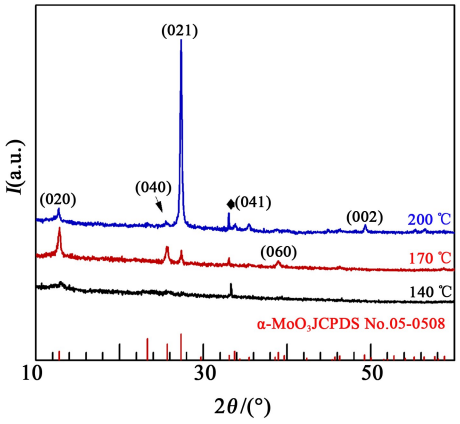
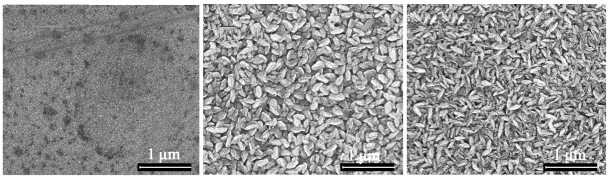



图 1　在不同衬底温度下制备的 $MoO_3$ 薄膜的 X 射线衍射图(◆为 Si 的基片峰，下同)




(a)　140 ℃　　(b)　170 ℃　　(c)　200 ℃

图 2　在不同衬底温度下制备的 $MoO_3$ 薄膜的 SEM 照片

在不同衬底温度下制备的 $MoO_3$ 薄膜的拉曼光谱如图 3 所示。波数位于 520，930 和 980 $cm^{-1}$ 处的拉曼峰为 Si 衬底的特征拉曼峰。位于 285 和 815 $cm^{-1}$ 的拉曼振动则对应于 α 相的特征峰。其中 285 $cm^{-1}$ 拉曼峰源于双键 δ(Mo＝O)振动的弯曲模式[13]，而位于 815 $cm^{-1}$ 处的拉曼振动则归因于双配位桥氧(Mo－O－Mo)的对称拉伸振动($A_g$)[14]。此外，当衬底温度为 200 ℃时，$MoO_3$ 薄膜的拉曼光谱位于 476 $cm^{-1}$ 处有一窄峰，该峰可归因于 O－Mo－O 的不对称拉伸/弯曲模式。上述拉曼特征峰进一步证实了所制备的薄膜为 α-$MoO_3$。并且，随着衬底温度的增加，$MoO_3$ 的拉曼特征峰峰强增大，$A_g$ 拉曼峰半高宽从 27.049 减小到 12.702 $cm^{-1}$，表明 $MoO_3$ 薄膜样品结晶质量随温度升高而提高，与上述 XRD 结果一致。

由上述衬底温度变化的结果不难得出：较低温度下原子的迁移能力较弱，难以移动到平衡晶格的位置，故结晶质量较差，多为无定型态；随着温度的上升，原子获得足够迁移速率，能移动到相应的晶格平衡位置，原子重新分布形成晶态结构。但是如果温度过高，前驱体易分解，将导致反应物利用率降低，杂质增多，因而选择合适的衬底温度对于薄膜制备工艺至关重要。与 Dai 等[15]以相同前驱体，PEALD 设备生长的非晶 $MoO_3$ 薄膜相比较，本工作能够在 170 ℃下制备结晶质量较高的多晶 $MoO_3$ 薄膜，其原因可能与较长氧等离子源脉冲有关。

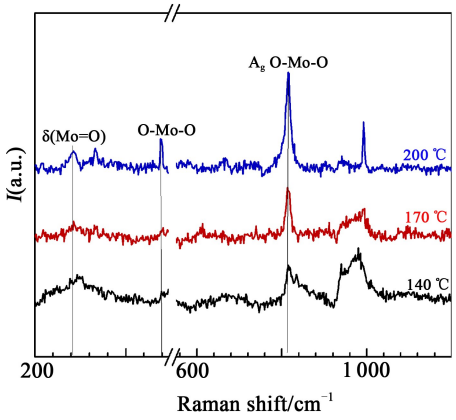



图 3　在不同衬底温度下制备的 $MoO_3$ 薄膜的拉曼光谱

## 2.2　氧等离子体脉冲时间的影响

为了探索本工作中可以低温生长 $MoO_3$ 多晶薄膜的原因，我们对氧等离子体脉冲时间变化的影响进行了研究。图 4 是衬底温度为 170 ℃，不同氧等离子体脉冲时间下制备的薄膜样品的 XRD 衍射图谱。由图可见，随着氧等离子脉冲时间从 15 s 增加至 60 s，XRD 衍射峰明显增强，表明样品的晶体质量显著提升。当氧等离子脉冲时间延长至 60 s 时，$MoO_3$ 薄膜衍射峰最为尖锐，并沿(0$k$0)方向高度择优生长。由 Scherrer 公式计算得到薄膜样品的平均晶粒大小分别为 5.7 nm(15 s)，31.6 nm(30 s)和 32.2 nm(60 s)。

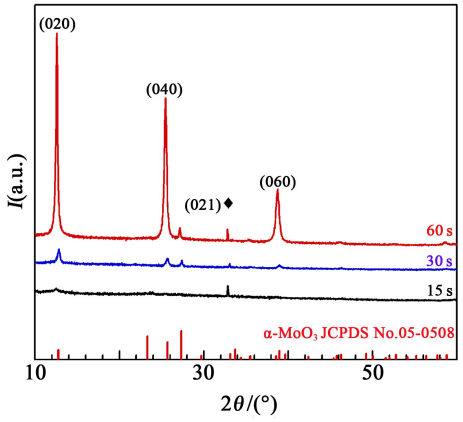
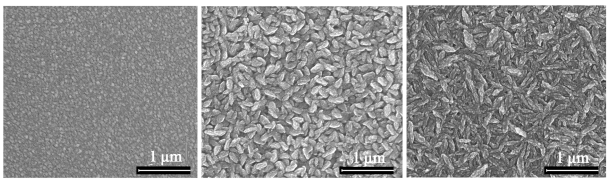



图 4　在不同氧等离子体脉冲时间下制备的 $MoO_3$ 薄膜样品的 X 射线衍射图

图 5 是在不同氧等离子体脉冲时间下制备的薄膜样品 SEM 照片。氧等离子体脉冲时间为 15 s 时

的薄膜呈现分散的椭圆形颗粒。随着氧等离子体脉冲时间的增加，薄膜由椭圆形晶粒的分散分布转变为由晶粒聚集形成的纺锤状、豆荚状单元，薄膜粗糙度显著增加。在氧等离子体脉冲过程中，反应腔内的射频辉光放电将氧气分子分解为氧离子、激发态分子、分子碎片、氧自由基等，与氧分子本身相比，其化学反应活性更高。增加氧等离子体脉冲时间即为增加等离子氧的含量，较大地促进了反应的进行，使得在低温下薄膜结晶性有了较大提升。




(a) 15 s (b) 30 s (c) 60 s

图 5 在不同氧等离子体脉冲时间下制备的薄膜 SEM 照片

在不同氧等离子体脉冲时间下制备的薄膜的拉曼光谱如图 6 所示。当氧等离子体脉冲时间延长至 60 s 时，样品的拉曼振动峰最强且尖锐；除图 3 中出现的拉曼振动外，在 287 $cm^{-1}$ 处出现了可归因于刚性链的平移和双键(Mo＝O)振动的弯曲模式[13]，663 $cm^{-1}$ 处有与三个八面体共享的氧($Mo_3$－O)的不对称拉伸($B_{2g}$)有关的拉曼峰[18]。随氧源脉冲时间而变化的拉曼结果进一步证实了薄膜的晶体质量随着氧源脉冲时间的增加而显著提升。

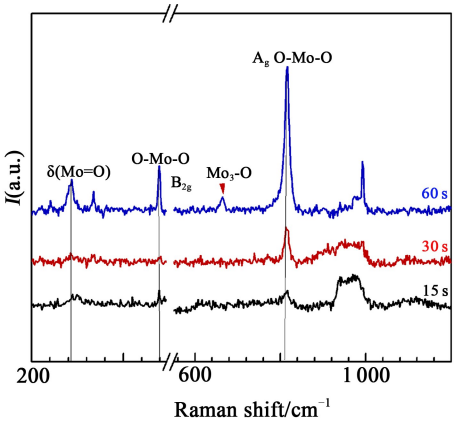
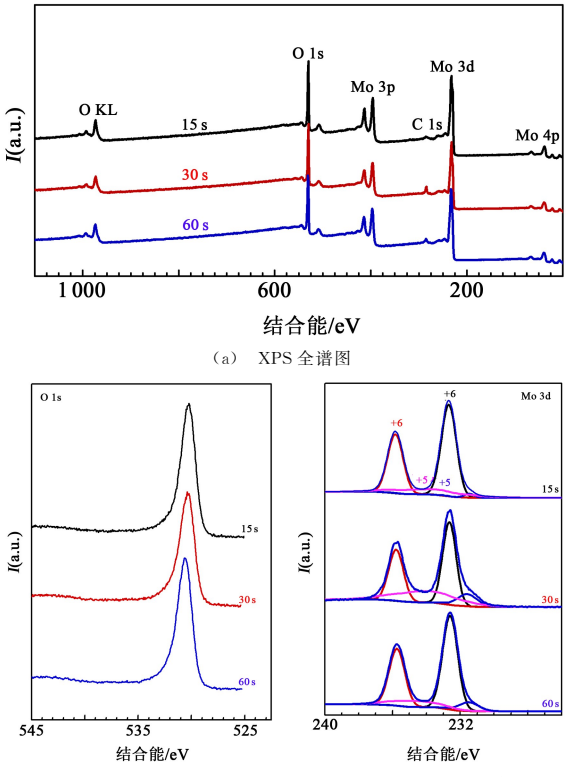



图 6 在不同氧等离子体脉冲时间下制备的 $MoO_3$ 薄膜的拉曼光谱

表 2 列出了已有文献报道的采用 ALD 技术，以不同前驱体源制备氧化钼薄膜的主要参数与样品晶体结构情况。受限于 $Mo(CO)_6$ 前驱体的分解温度，以 $Mo(CO)_6$ 为前驱体，采用 ALD 技术制备的氧化钼薄膜为非晶态[15]。非晶 $MoO_3$ 在 185 ℃时开始转变为 β-$MoO_3$，而由 β 相向 α 相转变则需要更高温度和更长时间[19]。本工作中较长氧等离子体脉冲时间提供了较多的活性等离子氧，降低了反应活化能；此外，本工作中较长的氧等离子体脉冲时间(大于等于 30 s)使得单个 ALD 循环所用时间变长(136 s)，为相变提供了充足的时间，两种因素共同作用使得低温制备 $MoO_3$ 多晶薄膜成为可能。

为了进一步分析 $MoO_3$ 薄膜的表面成分与元素化合价态，我们选取了衬底温度为 170 ℃，不同氧等离子体脉冲时间下所制备的 $MoO_3$ 薄膜样品进行了 XPS 分析。图 7(a)是样品的 XPS 全谱。图中只有 O，Mo 和 C 元素，其中 C 源于样品表面吸附，表明所制备 $MoO_3$ 薄膜的高纯度。图 7(b)和 7(c)分别是样品 O 1s 和 Mo 3d 结合能谱。O 1s 的结合能对应于 O—Mo 键。Mo 3d XPS 谱图中主要由结合能位于 235.7 eV 处的 Mo $3d_{3/2}$ 和 232.6 eV 处的 Mo $3d_{5/2}$ 两个强峰组成，对应于完全氧化的 Mo(Ⅵ)；位于 231.5 和 234.7 eV 处的两个微弱且宽的峰则可对应于 Mo(Ⅴ)。上述 XPS 数据分析进一步证实了所制备的薄膜样品主要为 $MoO_3$。




(a) XPS 全谱图

(b) O 1s 高分辨谱 (c) Mo 3d 态高分辨谱

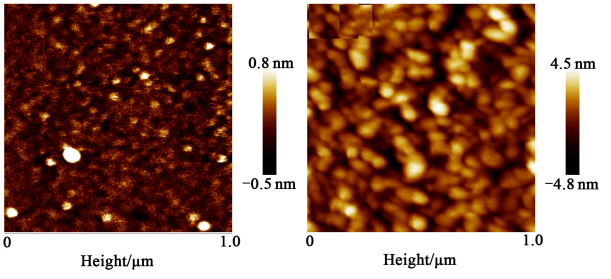
图 7 在不同氧等离子体脉冲时间下制备的 $MoO_3$ 薄膜的 XPS 图谱

表 2　已报道的 ALD 制备氧化钼薄膜的工艺

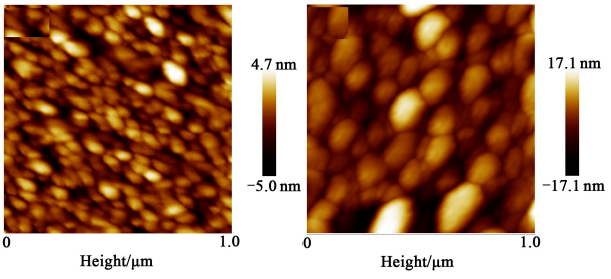
| 钼/氧源 | 生长温度/℃ | 晶体结构 | GPC($nm^{-1}$/cycle) | 每循环用时/s | 参考文献 |
|---|---|---|---|---|---|
| $Mo(CO)_6/O_3+H_2O$ | 152～172 | 非晶 | 0.35～0.7 | N/A | [9] |
| $Mo(CO)_6/O_3$ | 120/150 | 非晶 | 0.9/3.4 | 22.5 | [10] |
| $Mo(CO)_6/O_2$(Plasma) | 130～190 | 非晶 | 0.47～1.0 | 116 | [15] |
| $(NtBu)_2(NMe_2)_2Mo/O_2$(Plasma) | 50～350 | 非晶(50～200 ℃)<br>β 相(250～300 ℃)<br>α 相(300～350 ℃) | 0.8～1.88 | 19 | [11] |
| $(NtBu)_2(NMe_2)_2Mo/O_2$(Plasma) | 150/250 | 非晶 | 0.78～1.21 | 66 | [16] |
| $MoCl_4O/O_3+H_2O$ | 200～350 | $Mo_9O_{26}$(250 ℃)<br>非晶(275 ℃)<br>$MoO_2$(300 ℃) | 0.72 | 14 | [17] |
| $MoO_2(thd)_2/O_3$ | 250～350 | 非晶(250 ℃)<br>$MoO_{3-x}$(275～325)<br>α(300－350) | 2.0<br>(300 ℃) | 8 | [12] |
| $Mo(CO)_6/O_2$(Plasma) | 140～200 | α-$MoO_3$ | 1.08 | 136 | 本工作 |

### 2.3　生长机理分析

图 8 是衬底温度为 170 ℃，氧等离子体脉冲时间为 30 s，循环次数分别为 100，200，500 和 800 圈时所制备 $MoO_3$ 薄膜的 AFM 形貌图，扫描范围为 1 μm×1 μm。循环 100 圈(cycle)时，膜厚约为 9.5 nm，样品表面呈圆形稀疏颗粒；随着循环圈数的增加(200～500 圈)，膜厚增加，表面圆形颗粒亦明显增大；当循环圈数增加到 800 圈时，薄膜表面组成颗粒增大显著，呈明显的岛状，此时膜厚约为 82.1 nm，薄膜的厚度与循环圈数呈线性关系，其平均生长速率(GPC)为 0.108 nm/cycle。薄膜样品的




(a)　100 次　　(b)　200 次




(c)　500 次　　(d)　800 次

图 8　四种 ALD 循环次数的 $MoO_3$ 薄膜样品 AFM 图

算术平均粗糙度随沉积圈数依次为 0.120，0.974，0.996 和 3.57 nm。根据上述 AFM 形貌图可直观看到薄膜生长遵循岛状生长模式。薄膜生长初期由于 Si(100)衬底与 $MoO_3$ 薄膜之间的晶格失配较大，润湿性较差，故形成的是由 $MoO_3$ 原子团簇组成的孤立岛。随后三维小岛接收新的薄膜分子，逐渐合并成较大的岛且体积迅速增长，衬底逐渐被垂直于衬底的晶粒所覆盖，导致粗糙度增加。

## 3　结论

本文使用等离子体辅助原子层沉积技术实现了低温多晶 $MoO_3$ 薄膜的制备，薄膜生长遵循岛状生长模式。衬底温度为 170 ℃时即可获得结晶质量较好的 α-$MoO_3$ 薄膜；当衬底温度为 170 ℃，氧源等离子体的脉冲时间为 60 s 时，薄膜沿(0$k$0)高度择优取向生长。适当延长氧源等离子体脉冲时间的低温 ALD 制备 α-$MoO_3$ 薄膜的方案为 α-$MoO_3$ 的应用，尤其是在柔性/温度敏感衬底上的应用提供了参考。

**参考文献：**

[1]　Tyagi A，Biswas J，Ghosh K. Performance analysis of silicon carrier selective contact solar cells with ALD $MoO_x$ as hole selective layer[EB/OL]. https://doi.org/10.1007/s12633-021-00984-x.

[2]　Qing Xiang，Zhang Daixiong. Fabrication of molybdenum trioxide($MoO_3$) coating by electrophoretic deposition[J]. J. of Materials Science：Materials in Electronics，2017，28(10)：7449-7453.

[3]　Gurusamy L，Karuppasamy L，Anandan S，et al. Enhanced

performance of charge storage supercapattery by dominant oxygen deficiency in crystal defects of 2-D $MoO_{3-x}$ nanoplates [J]. Appl. Surface Science, 2021, 541: 148676.

[4] Arachchige H, Zappa D, Poli N. Gold functionalized $MoO_3$ nano flakes for gas sensing applications [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 269: 331-339.

[5] Li Zhenyu, Cao Fa, Ji Xiaohong. A novel ternary $MoS_2$/$MoO_3$/$TiO_2$ composite for fast photocatalytic degradation of rhodamine B under visible-light irradiation [J]. New J. of Chemistry, 2020, 44(2): 537-542.

[6] Zhao Chuanxi, Liang Zhimin, Xie Weiguang. Self-powered, high-speed and visible-near infrared response of $MoO_{3-x}$/n-Si heterojunction photodetector with enhanced performance by interfacial engineering [J]. ACS Appl. Materials Interfaces, 2015, 7(46): 25981-25990.

[7] Liu Yan, Lv Ying, Tang Zhaobing. Highly stable and flexible ITO-free electrochromic films with bi-functional stacked $MoO_3$/Ag/$MoO_3$ structures[J]. Electrochimica Acta, 2016, 189: 184-189.

[8] Cai Jiyu, Han Xiaoxiao, Wang Xin. Atomic layer deposition of two-dimensional layered materials: processes, growth mechanisms, and characteristics [J]. Matter, 2020, 2(3): 587-630.

[9] Diskus M, Nilsen O, Fjellvag H. Growth of thin films of molybdenum oxide by atomic layer deposition [J]. J. of Materials Chemistry, 2011, 21(3): 705-710.

[10] Liu Hongfei, Yang Renbin, Yang Weifeng. Atomic layer deposition and post-growth thermal annealing of ultrathin $MoO_3$ layers on silicon substrates: Formation of surface nanostructures[J]. Appl. Surface Science, 2018, 439: 583-588.

[11] Vos M F J, Macco B, Thissen N F W. Atomic layer deposition of molybdenum oxide from $(NtBu)_2(NMe_2)_2Mo$ and $O_2$ plasma[J]. J. of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2016, 34(1): 01A103.

[12] Mattinen M, King P J, Khriachtchev L. Atomic layer deposition of crystalline molybdenum oxide thin films and phase control by post-deposition annealing [J]. Materials Today Chemistry, 2018, 9: 17-27.

[13] Ji Fangxu, Ren Xianpei, Zheng Xiaoyao. 2D-$MoO_3$ nanosheets for superior gas sensors[J]. Nanoscale, 2016, 8(16): 8696-8703.

[14] Wei Zihan, Hai Zhenyin, Akbari M K. Atomic layer deposition-developed two-dimensional α-$MoO_3$ windows excellent hydrogen peroxide electrochemical sensing capabilities[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 262: 334-344.

[15] Dai Tianjun, Ren Yixuan, Liu Xingzhao. Characterization of molybdenum oxide thin films grown by atomic layer deposition[J]. J. of Electronic Materials, 2018, 47(11): 6709-6715.

[16] Xu Hongyan, Akbari M K, Hai Zhenyin. Ultra-thin $MoO_3$ film goes wafer-scaled nano-architectonics by atomic layer deposition[J]. Materials & Design, 2018, 149: 135-144.

[17] Kvalvik J N, Borgersen J, Nilsen O, et al. Area-selective atomic layer deposition of molybdenum oxide [J]. J. of Vacuum Science & Technology A, 2020, 38: 042406.

[18] Chen Jianjun, Wang Mingming, Liao Xin, et al. Large-scale synthesis of single-crystal molybdenum trioxide nanobelts by hot-wire chemical vapour deposition [J]. J. of Alloys and Compounds, 2015, 619: 406-410.

[19] Fjellvåg Ø S, Ruud A, Sønsteby H H, et al. Crystallization, phase stability, and electrochemical performance of β-$MoO_3$ thin films [J]. Crystal Growth & Design, 2020, 20(6): 3861-3866.

## 作者简介：

**成天乐**(1997—)，男，湖南省湘潭市人，硕士研究生，主要研究方向为氧化钼薄膜材料的制备及性能研究；

**季小红**(1972—)，女，博士，教授，博士生导师，从事宽禁带薄膜材料、纳米材料的制备、性能和应用研究。