

## 基于原子层沉积的 Ru 薄膜制备及其导电性能研究

左雪芹<sup>1,2,3</sup>, 卢陈梓<sup>1,2</sup>, 陆雪强<sup>2,3</sup>, 包志豪<sup>2,4</sup>, 黄高山<sup>1,2,5</sup>, 梅永丰<sup>1,2,5,\*</sup>, 石建军<sup>1,2,\*</sup>

(1. 复旦大学 智能机器人与先进制造创新学院 智慧纳米机器人与纳米系统国际研究院, 上海 200438; 2. 复旦大学 义乌研究院 全省极端环境功能材料重点实验室, 义乌 322000; 3. 江苏迈纳德微纳技术有限公司, 无锡 214111; 4. 同济大学 物理科学与工程学院, 上海 200092; 5. 复旦大学 光电研究院, 上海 200438)

**摘要:** 随着集成电路器件尺寸的不断缩小, 当工艺技术节点低于 5 nm 时, 传统金属互连材料 Cu 因其电阻尺寸效应已无法满足性能需求, 亟需开发新型金属互连材料及其制备技术。本研究采用原子层沉积 (atomic layer deposition, ALD) 技术, 以 SiO<sub>2</sub> 为衬底, 系统研究 Ru(EtCp)<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 体系中循环次数、前驱体与氧气脉冲时间以及沉积温度等工艺参数对 Ru 薄膜生长及导电性能的影响, 为高导电 Ru 互连薄膜的 ALD 工艺优化提供技术支持。实验结果表明: 当 ALD 循环次数低于 200 次时, Ru 颗粒呈离散岛状结构; 当循环次数达到 500 次后, 形成连续导电网络, 薄膜中 Ru 单质纯度超过 90%。在 SiO<sub>2</sub> 衬底上沉积的 Ru 薄膜厚度为 19.7 nm, 电阻率为 25.6 μΩ·cm。当前驱体与氧气脉冲时间分别为 5 s 和 10 s 时, 薄膜沉积速率达到 0.051 nm·循环<sup>-1</sup>。通过调节沉积温度优化薄膜中的晶界扩散, 在 325 °C 下薄膜导电网络稳定, SiO<sub>2</sub> 衬底方阻为 18 Ω; 而在 350 °C 下, 热应力导致晶粒粗化和导电网络碎裂, 方阻增加至 59 Ω。  
**关键词:** Ru; 薄膜; 原子层沉积 (ALD); 导电性

中图分类号: TN304

文献标志码: A

DOI: 10.3724/jfmd.2508050

CSTR: 32180.14.jfmd.2508050

## Studies on preparation and conductivity of Ru thin films deposited by atomic layer deposition

ZUO Xueqin<sup>1,2,3</sup>, LU Chenzi<sup>1,2</sup>, LU Xueqiang<sup>2,3</sup>, BAO Zhihao<sup>2,4</sup>, HUANG Gaoshan<sup>1,2,5</sup>,  
MEI Yongfeng<sup>1,2,5,\*</sup>, SHI Jianjun<sup>1,2,\*</sup>

(1. International Institute for Intelligent Nanorobots and Nanosystems, College of Intelligent Robots and Advanced Manufacturing, Fudan University, Shanghai 200438, China; 2. Zhejiang Key Laboratory of Extreme Environment Functional Materials, Yiwu Research Institute, Fudan University, Yiwu 322000, China; 3. Jiangsu MNT Micro and Nanotech Co., Ltd., Wuxi 214111, China; 4. School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 5. Institute of Optoelectronics, Fudan University, Shanghai 200438, China)

收稿日期: 2025-08-20; 修订日期: 2025-09-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.12475259; No.12175036; No.11875104)

作者简介: 左雪芹 (1984—), 女, 博士研究生, 研究方向为原子层沉积钌薄膜工艺 (E-mail: zxq@mnt-tech.net)

通信作者: 梅永丰 (1976—), 男, 教授, 研究方向为半导体薄膜沉积与微纳加工技术 (E-mail: yfm@fudan.edu.cn)

石建军 (1976—), 男, 教授, 研究方向为等离子体放电与半导体工艺 (E-mail: shijianjun@ywfudan.cn)

**Abstract:** With the ongoing miniaturization of device sizes in integrated circuit component, traditional copper (Cu) interconnects encounter performance limitations below the 5 nm technology node due to the size-induced increase in resistivity. This challenge highlights the need for novel interconnect materials and fabrication techniques. This study utilized atomic layer deposition (ALD) with a Ru(EtCp)<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> system on SiO<sub>2</sub> substrates to examine the influence of optimizing critical process parameters on ruthenium (Ru) film growth and conductive network formation. These parameters include ALD cycles, precursor/oxygen pulse durations, and deposition temperature. The objective was to provide experimental insights for refining the ALD process to produce high-conductivity Ru interconnect films. Results indicated that Ru films deposited with fewer than 200 ALD cycles exhibited discrete island-like structures. A continuous conductive network formed when the cycle count reached 500. The metallic Ru film purity exceeded 90%. On SiO<sub>2</sub> substrates, the deposited Ru film thickness was 19.7 nm, with a corresponding resistivity of 25.6 μΩ·cm. Optimizing the precursor and oxygen pulse durations to 5 s and 10 s, respectively, increased the deposition rate to 0.051 nm·cycle<sup>-1</sup>. Temperature regulation, which influenced grain boundary diffusion, revealed that at 325 °C, the conductive network remained stable, yielding a sheet resistance of 18 Ω. In contrast, at 350 °C, thermal stress induced grain coarsening and network fragmentation, increasing the sheet resistance to 59 Ω.

**Key words:** Ru; thin film; atomic layer deposition (ALD); conductivity

## 0 引言

随着集成电路特征尺寸的持续缩小,传统铜互连技术面临电阻-电容延迟加剧和尺寸效应显著等挑战<sup>[1]</sup>。钌(Ru)具有优异的热稳定性、化学稳定性和机械稳定性,其纳米薄膜还具备高功函数(4.7 eV)、低体电阻率(7.1 μΩ·cm)、高熔点(2334 °C)以及良好的抗电迁移特性,因此被认为是后摩尔时代替代Cu的极具潜力的互连材料之一<sup>[2-3]</sup>。同时,原子层沉积(atomic layer deposition, ALD)技术凭借其亚纳米级膜厚控制能力以及三维结构覆盖优势,已成为先进节点金属薄膜沉积的核心工艺<sup>[4-5]</sup>,并在Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>[6-8]</sup>、ZnO<sup>[8-9]</sup>、HfO<sub>2</sub><sup>[10-11]</sup>等金属氧化物薄膜制备中形成了成熟的工艺体系。然而,ALD沉积Ru薄膜的工艺仍面临成核延迟显著、低温沉积电阻率偏高以及表面粗糙度控制困难等关键技术挑战,制约了其在逻辑器件和存储器件中的规模化应用<sup>[2, 12-18]</sup>。

目前,针对Ru薄膜的热型ALD沉积,研究人员已开发出多种前驱体源和共反应物体系。例如,零价Ru前驱体Ru(DMBD)(CO)<sub>3</sub>/O<sub>2</sub>体系可实现无沉积延迟的低电阻率Ru薄膜<sup>[13]</sup>;二价Ru前驱体RuCp<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>体系在SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>复合衬底上存在250次循环的沉积延迟<sup>[14]</sup>;Ru(EtCp)<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>体

系在SiO<sub>2</sub>衬底上存在200次循环的沉积延迟但仍可成功制备Ru薄膜<sup>[15]</sup>;此外,八价Ru前驱体RuO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>体系在100 °C的低温条件下也可制备低电阻率Ru薄膜<sup>[16]</sup>。其中,Ru(EtCp)<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>体系因其前驱体成本低、共反应物安全性高,符合大面积工业化生产需求,但仍存在沉积延迟、电阻率偏高及沉积温度窗口不确定等问题<sup>[17]</sup>。因此,本文基于Ru(EtCp)<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>体系,系统研究循环次数、反应物脉冲时间及沉积温度等参数对利用ALD技术制备的Ru薄膜性能的影响规律,以期开发高可靠性钌互连技术提供实验依据。

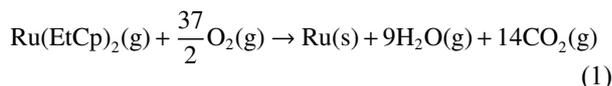
## 1 实验方法

### 1.1 Ru薄膜的原子层沉积制备

实验选用双(乙基环戊二烯)钌(Ru(EtCp)<sub>2</sub>)作为前驱体(纯度99.9999%,南京爱牟源科学器材有限公司),高纯氧气(纯度99.999%)作为反应气体,氮气作为吹扫气体,在SiO<sub>2</sub>衬底上沉积Ru薄膜。本实验所用SiO<sub>2</sub>衬底的基础参数为:厚度200 nm,粗糙度0.64 nm,电阻率大于10<sup>5</sup> Ω·cm。

ALD的典型工艺参数为:前驱体温度90 °C,沉积温度250~350 °C,循环次数100~500次。实

验中 ALD 工艺包括两个半反应: 首先, 源瓶中的前驱体 ( $\text{Ru}(\text{EtCp})_2$ ) 经  $\text{N}_2$  载气携带, 通过脉冲气动阀进入反应腔, 并在衬底上吸附反应, 再通入  $\text{N}_2$  吹扫残留前驱体及反应副产物, 完成第一个半反应; 随后, 通入由质量流量计控制流量的  $\text{O}_2$ , 经脉冲气动阀进入反应腔, 与衬底上吸附的单体反应后, 通入  $\text{N}_2$  吹扫残留  $\text{O}_2$  及副产物, 完成第二个半反应, 以上步骤为一个完整循环。前驱体通入时间为 1~5 s,  $\text{O}_2$  脉冲时间为 2~14 s,  $\text{N}_2$  吹扫时间为 20 s。反应方程式<sup>[19]</sup> 为:



## 1.2 测试与表征

采用椭偏仪 (SE-VM-L 型光谱椭偏仪, 颐光科技) 测量沉积的 Ru 薄膜厚度; 使用原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM, 牛津仪器) 通过轻敲模式测试表面粗糙度; 通过场发射扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM, SIGMA HD) 观察表面形貌与截面结构; 化学组成通过 X 射线光电子能谱 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS, Thermo Scientific) 表征; 晶体结构由 X 射线衍射仪 (X-Ray diffractometer, XRD, Smartlab) 测定; 电学性能采用四探针测试仪 (CXT2665/2666, 常州欣阳电子科技有限公司) 进行分析和评价。

## 2 结果与讨论

### 2.1 ALD 循环次数对 Ru 薄膜沉积的影响

图 1 展示了在 300 °C、100~500 次循环次数下,  $\text{SiO}_2$  衬底上沉积 Ru 薄膜的 SEM 和 AFM 图像。前驱体通入时间、 $\text{O}_2$  通入时间和  $\text{N}_2$  吹扫时间分别为 5 s、10 s 和 20 s。从图中可以看出, 当循环次数为 100 次时, SEM 观测显示 Ru 颗粒呈离散岛状分布, 未能形成连续薄膜, 表明存在成核延迟; 当循环次数增至 300 次时, Ru 逐渐形成较粗的长条形块状颗粒并开始覆盖整个衬底表面; 当循环次数达到 500 次时, 最终形成较为平整的连续薄膜。图 2 (a)~(d) 分别展示了  $\text{SiO}_2$  衬底上 Ru 薄膜的厚度 (测量次数为 3 次)、表面均方根粗糙度 ( $R_q$ )、Ru 纳米颗粒的平均粒径以及方阻和电阻率随沉积循环

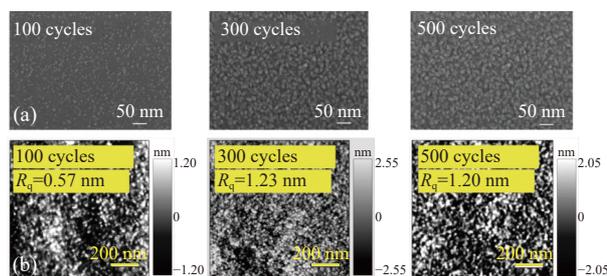


图 1 100 次、300 次和 500 次循环次数下  $\text{SiO}_2$  衬底上沉积的 Ru 薄膜的 (a) SEM 和 (b) AFM 图像

Fig. 1 (a) SEM and (b) AFM images of Ru thin films deposited on  $\text{SiO}_2$  substrates after 100, 300, and 500 cycles

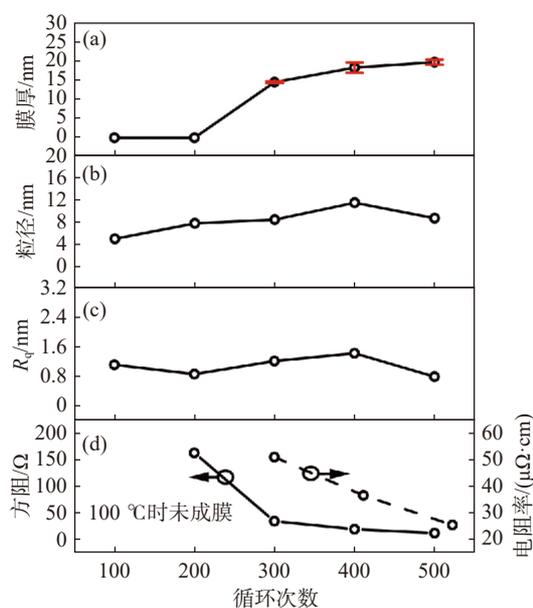


图 2  $\text{SiO}_2$  衬底上沉积的 (a) Ru 薄膜厚度、(b) Ru 纳米颗粒的平均粒径、(c) Ru 表面均方根粗糙度以及 (d) Ru 薄膜方阻和电阻率随沉积循环次数的变化关系

Fig. 2 (a) Ru film thickness, (b) average Ru nanoparticle size, (c) Ru surface root-mean-square roughness, and (d) Ru film sheet resistance and resistivity deposited on  $\text{SiO}_2$  substrates as a function of ALD cycles

次数的变化情况。

由图 2 (a) 可知, 当循环次数低于 200 次时,  $\text{SiO}_2$  衬底上未能形成连续的 Ru 薄膜, 因此图 2 (d) 无法测到低于 200 次循环的电阻率。当循环次数增至 500 次时, 薄膜厚度增长至 19.7 nm。AFM 分析表明, 在  $\text{SiO}_2$  衬底上 Ru 薄膜的粗糙度随循环次数增加未发生明显变化, 而沉积的 Ru 颗粒粒径随循环次数增加而逐渐增大。此外, 随着循环次数的增加,  $\text{SiO}_2$  衬底上 Ru 薄膜的方阻在 200 次循环后开始突然下降, 当循环次数超过 300 次后, 尽管方

阻仍呈下降趋势,但变化趋于平缓。四探针测试结果表明,300 ℃下 SiO<sub>2</sub> 衬底上沉积的 Ru 薄膜电阻率为 25.6 μΩ·cm。从 SEM 与 AFM 结果可知,在 SiO<sub>2</sub> 衬底上沉积 Ru 薄膜的过程中,初期颗粒尺寸小且分布不均匀,薄膜连续性差,颗粒间存在较大的层错和空隙,未能形成有效的导电网络。随着沉积循环次数的增加,Ru 晶粒逐渐生长,尺寸增加并覆盖整个衬底表面;虽然表面粗糙度有所增加,但晶粒间空隙逐渐被填充,晶界散射效应随薄膜连续性的改善而显著减弱<sup>[20-21]</sup>,导致导电性上升。

## 2.2 脉冲时间与氧含量对 Ru 薄膜沉积的影响

图 3 展示了不同的前驱体 Ru(EtCp)<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 脉冲时间对 Ru 薄膜沉积每循环膜厚增长量 (growth per cycle, GPC) 的影响。沉积循环次数固定为 500 次,通过调节前驱体 Ru(EtCp)<sub>2</sub> 与 O<sub>2</sub> 的脉冲时间,探究其对 SiO<sub>2</sub> 衬底上 Ru 薄膜沉积的影响。在 Ru 薄膜沉积过程中,首先将前驱体 Ru(EtCp)<sub>2</sub> 吸附于衬底表面,O<sub>2</sub> 脉冲时间固定为 7 s。随着前驱体脉冲时间从 1 s 延长至 5 s,Ru 薄膜的沉积速率从 0.0404 nm·循环<sup>-1</sup> 增加至 0.0486 nm·循环<sup>-1</sup>。延长前驱体脉冲时间使衬底表面的吸附量和反应时间增加,从

而促进了 Ru 薄膜的生长。前驱体 Ru(EtCp)<sub>2</sub> 吸附后与 O<sub>2</sub> 发生反应,固定前驱体脉冲时间为 5 s。当 O<sub>2</sub> 脉冲时间从 2 s 增加至 7 s 时,Ru 薄膜的 GPC 随 O<sub>2</sub> 脉冲时间的延长而提高;当 O<sub>2</sub> 脉冲时间进一步从 7 s 增加至 14 s 时,生长速率趋于饱和,并在 10 s 脉冲时间时达到 0.0510 nm·循环<sup>-1</sup>。

此外,表 1 展示了 SiO<sub>2</sub> 衬底上 ALD Ru 薄膜在刻蚀测试前后的 XPS 元素含量分析结果,图 4 展示了其中 O 1s 和 Ru 3p 元素在刻蚀前后的含量变化。采用 2000 eV Ar 离子枪进行刻蚀,刻蚀速率经中国计量科学研究院标准 SiO<sub>2</sub> 膜校准验证为 0.2 nm·s<sup>-1</sup>,刻蚀时间设定为 50 s。分析结果表明,SiO<sub>2</sub> 衬底上 Ru 薄膜在刻蚀前后,O 1s 的含量从 38.17% 下降至 7.06%,而 Ru 3p 的含量从 51.02% 增加至 90.99%,表明所制备的 Ru 薄膜中存在氧元素杂质,其来源包括环境吸附氧及 RuO<sub>2</sub>。刻蚀后 Ru 薄膜表面氧元素含量显著下降,而内部 Ru 含量大幅上升,因此可推断氧元素杂质主要存在于制备获得的 Ru 薄膜表面,这与文献 [16] 的研究结果一致。

表 1 SiO<sub>2</sub> 衬底上 ALD Ru 薄膜在刻蚀测试前后的 XPS 元素含量分析

Table 1 XPS elemental composition analysis of ALD Ru thin films on SiO<sub>2</sub> substrates before and after etching tests

衬底	元素	光电子峰/eV	含量/%	是否刻蚀
SiO <sub>2</sub>	Ru 3p	461.87	51.02	否
SiO <sub>2</sub>	Ru 3p	461.94	90.99	是
SiO <sub>2</sub>	O 1s	531.40	38.17	否
SiO <sub>2</sub>	O 1s	530.51	7.06	是

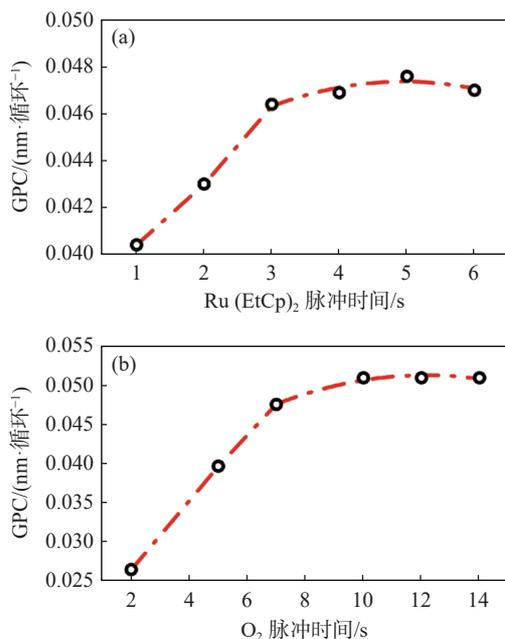


图 3 前驱体 (a) Ru(EtCp)<sub>2</sub> 和 (b) O<sub>2</sub> 脉冲时间对 Ru 薄膜沉积 GPC 的影响

Fig. 3 Effect of pulse duration of precursor (a) Ru(EtCp)<sub>2</sub> and (b) O<sub>2</sub> on the GPC of Ru thin films

图 4(b) Ru 3p 谱中,位于 462 eV 和 484 eV 附近的两个峰对应金属态 Ru,而 488 eV 和 466 eV 附近的两个峰则对应 RuO<sub>2</sub>(实际沉积过程中,由于氧含量变化对结合能的影响,峰值可能存在一定偏移)。图 4(a) O 1s 谱中,530 eV 峰对应含氧键。530 eV 峰中 O—C(绿色)、O—H/C=O(蓝色)和 O—Ru(红色)的特征信号,表明薄膜表面存在吸附氧以及反应生成的 RuO<sub>2</sub>。此外,刻蚀后 O—C 和 O—H/C=O 相对于 O—Ru 的强度下降,进一步体现了刻蚀后薄膜表面吸附氧含量的降低。这表明,ALD 沉积过程中大部分吸附氧存在于薄膜表面,而 RuO<sub>2</sub> 杂质则分布于整个薄膜中。刻蚀后薄膜内

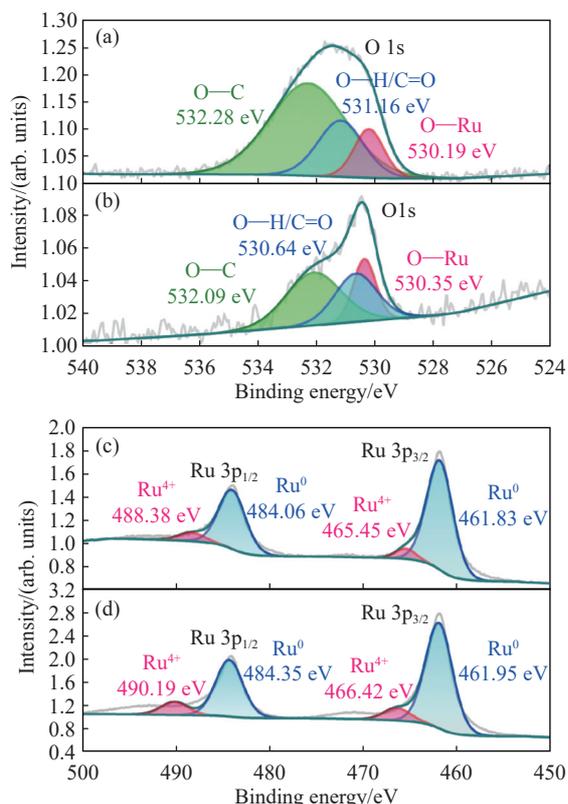


图4 SiO<sub>2</sub> 衬底上 Ru 薄膜在刻蚀测试前后的 XPS 元素谱图。(a)刻蚀前和(b)刻蚀后的 O 1s 谱; (c)刻蚀前和(d)刻蚀后的 Ru 3p 谱

Fig. 4 Elemental spectra acquired via XPS before and after etching tests for Ru thin films on SiO<sub>2</sub> substrates. O 1s spectra (a) before and (b) after etching; Ru 3p spectra (c) before and (d) after etching

部的 Ru 主要以单质态存在。

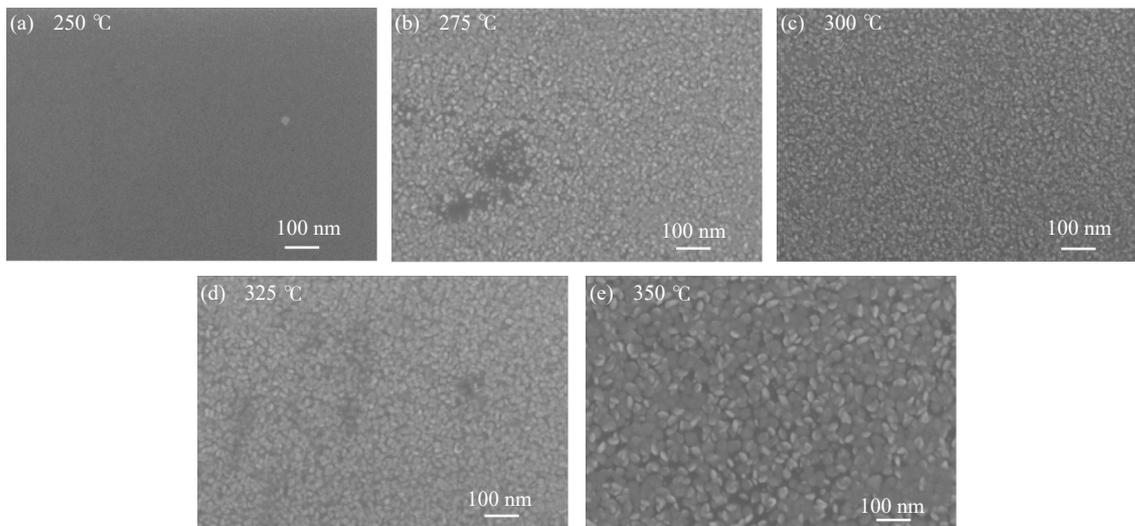


图6 (a)250 °C、(b)275 °C、(c)300 °C、(d)325 °C 和(e)350 °C 下在 SiO<sub>2</sub> 衬底上沉积 Ru 薄膜的 SEM 图

Fig. 6 SEM images of Ru thin films deposited on SiO<sub>2</sub> substrates at (a) 250 °C, (b) 275 °C, (c) 300 °C, (d) 325 °C, and (e) 350 °C

结合沉积循环次数对电阻率的影响可以推断: 随着循环次数的增加, 薄膜厚度增大, 表面 O—Ru 键含量占薄膜整体化学键的比例逐渐降低, 电阻率随之下降。由晶粒不连续性以及表面 O—Ru 键杂质引起的电子散射效应逐渐减弱, 电阻率随循环次数的增加而逐渐降低。图 5 为 300 °C 和 325 °C 下 Ru 薄膜在 SiO<sub>2</sub> 衬底上的晶向 XRD 图谱, 循环次数为 500 次。可以看出, 300 °C 下 Ru 晶向无明显选择性, 但随着温度升高至 325 °C, Ru(002) 晶向的结晶度略有下降。

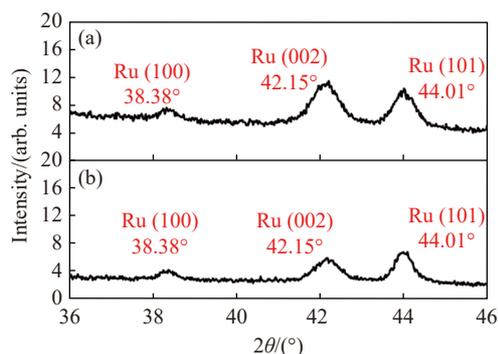


图5 (a)300 °C 和(b)325 °C 下 Ru 薄膜在 SiO<sub>2</sub> 衬底上的晶向 XRD 图谱

Fig. 5 XRD patterns of Ru thin films on SiO<sub>2</sub> substrates at a temperature of (a) 300 °C and (b) 325 °C

### 2.3 温度对 Ru 薄膜沉积的影响

图 6 为 250 °C、275 °C、300 °C、325 °C 和 350 °C 下于 SiO<sub>2</sub> 衬底上沉积 Ru 薄膜的 SEM 图, 沉积循

环次数为 300 次,工艺参数为前驱体脉冲时间 5 s、氧气脉冲时间 10 s、氮气吹扫时间 20 s。在沉积温度为 250 °C 时, SiO<sub>2</sub> 衬底上无法形成连续薄膜;随着温度升高, Ru 颗粒逐渐铺满衬底表面,并在 300~325 °C 区间内可形成连续性较好的薄膜,但其粗糙度略有上升。

图 7 展示了 300 次循环下沉积于 SiO<sub>2</sub> 衬底上的 Ru 薄膜厚度随沉积温度的变化,测量结果为 3 次重复实验的平均值。结果表明,在 250 °C 和 275 °C 下未能形成连续薄膜。300 °C 和 325 °C 下的薄膜厚度通过椭偏仪测得;而在 350 °C 时,因椭偏仪无法准确拟合薄膜厚度数据(误差过大),故采用 SEM 截面图来读取厚度。可以看出,采用 ALD 技术在 SiO<sub>2</sub> 衬底上沉积 Ru 薄膜时,存在合适的温度窗口,在一定温度范围内可获得成膜质量较高的薄膜,但温度过高则会破坏薄膜的连续性。

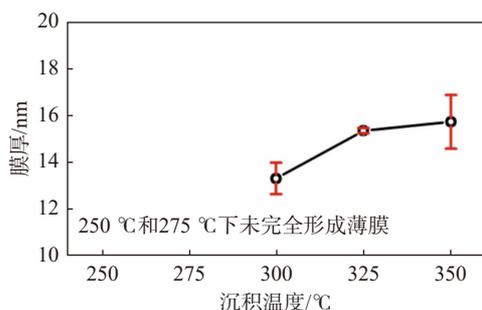


图 7 300 次循环下 SiO<sub>2</sub> 衬底上沉积 Ru 薄膜的膜厚随沉积温度的变化

Fig. 7 Film thickness of Ru film deposited on SiO<sub>2</sub> substrate at different deposition temperatures with 300 cycles

此外,电阻率随温度的变化呈现先降低后升高的趋势,且在 325 °C 时获得了最优电学性能,方阻为 18 Ω,而当温度升至 350 °C 时方阻显著增加至 59 Ω。这主要得益于 Ru 薄膜在 300~325 °C 区间内形成的较为连续的膜层。结合 SEM 图分析可知,高温下颗粒粗化导致 Ru 颗粒间距扩大、接触点减少,同时异常生长的颗粒形成了微裂纹或空隙,阻断了原本连续的电子传输路径;此外,晶界缺陷的增加进一步加剧了电子散射,最终破坏了导电网络的整体连续性。

上述结果表明,ALD 沉积 Ru 薄膜存在最佳温度(325 °C),为获得低电阻的连续 Ru 薄膜,需对沉积温度进行精确控制。

### 3 结论

本文研究了 ALD 工艺参数对 Ru 薄膜导电特性的影响规律,得出以下主要结论:

(1)循环次数对 SiO<sub>2</sub> 衬底上 Ru 薄膜生长及电学性能的调控作用显著。当 ALD 循环次数低于 200 次时,薄膜呈离散岛状结构,导电性较差;经过 500 次循环后,薄膜实现连续覆盖,电阻率降至 25.6 μΩ·cm。这是由于沉积过程中颗粒逐渐填充空隙,晶界散射减弱,从而有效降低了电阻率。

(2)揭示了前驱体与氧气脉冲时间窗口对薄膜性能的影响及杂质氧的分布特征。优化后的最佳脉冲时间参数为前驱体 5 s、氧气 10 s,在此条件下薄膜沉积速率可达 0.0510 nm·循环<sup>-1</sup>。XPS 分析表明,薄膜主体为 Ru 单质,纯度达 90% 以上,但表面在未刻蚀前存在占比约 38% 的氧元素,主要包括 RuO<sub>2</sub> 杂质及环境吸附氧。表面吸附氧和 RuO<sub>2</sub> 杂质导致电子散射增强,而表面刻蚀后氧含量降至 7.06% 以下。

(3)沉积温度对薄膜结晶度与连续性的调控存在最佳窗口(300~325 °C)。在 325 °C 下, SiO<sub>2</sub> 衬底薄膜的方阻达到最优值(18 Ω);而在 350 °C 下,连续薄膜遭到破坏,方阻显著增加至 59 Ω。

#### 参考文献:

- [1] 李亚强, 马晓川, 张锦秋, 等. 芯片制程中金属互连工艺及其相关理论研究进展 [J]. *表面技术*, 2021, 50(7): 24-43.  
LI Y Q, MA X C, ZHANG J Q, et al. Research progress of metal interconnection technology and related theory in chip fabrication [J]. *Surface Technology*, 2021, 50(7): 24-43.
- [2] 张仁耀, 郭俊梅, 闻明, 等. 贵金属 Ru 的制备、性能及应用研究进展 [J]. *材料导报*, 2021, 35(21): 21243-21248.  
ZHANG R Y, GUO J M, WEN M, et al. Research progress on preparation, properties and application of precious metal ruthenium [J]. *Materials Reports*, 2021, 35(21): 21243-21248.
- [3] KOTSUGI Y, HAN S M, KIM Y H, et al. Atomic layer deposition of Ru for replacing Cu-interconnects [J]. *Chemistry of Materials*, 2021, 33(14): 5639-5651.
- [4] 苗虎, 李刘合, 旷小聪. 原子层沉积技术发展概况 [J]. *真空*, 2018, 55(4): 51-58.  
MIAO H, LI L H, KUANG X C. Development of atomic layer deposition technology [J]. *Vacuum*, 2018, 55(4): 51-58.
- [5] 廖荣, 康唐飞, 邓世杰, 等. 原子层沉积技术的应用现状及发

- 展前景 [J]. *传感器与微系统*, 2021, 40(10): 5-9.
- LIAO R, KANG T F, DENG S J, et al. Application status and development prospect of ALD technology[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2021, 40(10): 5-9.
- [6] 廖荣, 刘慧君, 柯嘉聪, 等. 原子层沉积  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的制备与性能研究 [J]. *功能材料与器件学报*, 2019, 25(2): 94-98.
- LIAO R, LIU H J, KE J C, et al. Preparation and properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films deposited by atomic layer[J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2019, 25(2): 94-98.
- [7] NA C Y, NO C, LIM B, et al. Suppression of defect formation in atomic-layer deposited  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin films by addition of  $\text{AlF}_3$  cycles[J]. *Vacuum*, 2025, 236: 114154.
- [8] GAN X W, WANG T, WU H, et al. ZnO deposited on Si (111) with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  buffer layer by atomic layer deposition[J]. *Vacuum*, 2014, 107: 120-123.
- [9] LEE J Y, KIM C R, HEO J H, et al. Effect of buffer layer annealing on ZnO thin films grown by using atomic layer deposition[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2009, 55(6): 2556-2559.
- [10] ZHANG X Y, HSU C H, LIEN S Y, et al. Temperature-dependent  $\text{HfO}_2/\text{Si}$  interface structural evolution and its mechanism[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2019, 14(1): 83.
- [11] JANČOVIČ P, HUDEC B, DOBROČKA E, et al. Resistive switching in  $\text{HfO}_2$ -based atomic layer deposition grown metal-insulator-metal structures[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 312: 112-116.
- [12] 张学峰. 集成电路中金属互连工艺的研究进展 [J]. *半导体技术*, 2023, 48(12): 1053-1061.
- ZHANG X F. Research progress of metal interconnect technology in integrated circuits[J]. *Semiconductor Technology*, 2023, 48(12): 1053-1061.
- [13] AUSTIN D Z, JENKINS M A, ALLMAN D, et al. Atomic layer deposition of ruthenium and ruthenium oxide using a zero-oxidation state precursor[J]. *Chemistry of Materials*, 2017, 29(3): 1107-1115.
- [14] AALTONEN T, ALÉN P, RITALA M, et al. Ruthenium thin films grown by atomic layer deposition[J]. *Chemical Vapor Deposition*, 2003, 9(1): 45-49.
- [15] YIM S S, LEE D J, KIM K S, et al. Nucleation kinetics of Ru on silicon oxide and silicon nitride surfaces deposited by atomic layer deposition[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(11): 113509.
- [16] MINJAUW M M, DENDOOVEN J, CAPON B, et al. Near room temperature plasma enhanced atomic layer deposition of ruthenium using the  $\text{RuO}_4$ -precursor and  $\text{H}_2$ -plasma[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, 3(19): 4848-4851.
- [17] ROTHMAN A, SEO S, WOODRUFF J, et al. Enhanced nucleation mechanism in ruthenium atomic layer deposition: Exploring surface termination and precursor ligand effects with  $\text{RuCpEt}(\text{CO})_2$ [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2024, 42(5): 052402.
- [18] MIIKKULAINEN V, LESKELÄ M, RITALA M, et al. Crystallinity of inorganic films grown by atomic layer deposition: overview and general trends[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(2): 021301.
- [19] KOZODAEV M G, LEBEDINSKII Y Y, CHERNIKOVA A G, et al. Temperature controlled Ru and  $\text{RuO}_2$  growth via  $\text{O}^{\bullet}$  radical-enhanced atomic layer deposition with  $\text{Ru}(\text{EtCp})_2$ [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2019, 151(20): 204701.
- [20] ZHANG X, HAN J, PLOMBON J J, et al. Nanocrystalline copper films are never flat[J]. *Science*, 2017, 357(6349): 397-400.
- [21] SU C, SU X. Impact of grain size and grain size distribution on the resistivity of metal nanocrystalline systems[J]. *Computational Materials Science*, 2015, 108: 62-65.