材料、结构及工艺

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20250529001

生长温度对金属衬底上原子层沉积氮化铝薄膜质量的影响

徐呈甲[1,2,3],朱 鹏[2,3],杨亚霖[1,2,3],权佩雯[1,2,3],顾 泓[2,3]*

(1. 中国科学技术大学 纳米科学技术学院,合肥 230026; 2. 材料科学姑苏实验室,江苏 苏州 215125;
3. 苏州实验室,江苏 苏州 215125)

摘 要: 采用等离子体增强原子层沉积(PEALD)的方法,在钨(W)金属上制备了氮化铝(AlN)薄膜,系统研究生长温度对AlN薄膜生长质量的影响,并揭示薄膜生长行为的机理,确定PEALD在W衬底上生长高质量AlN晶体的最佳温度条件。通过X射线衍射仪、椭圆偏振光谱仪、扫描电子显微镜、X射线光电子能谱以及半导体参数测试仪等方法,对薄膜的晶体结构、折射率、生长速度、表面形貌、成分以及电阻率进行表征和分析。结果表明,在200℃～350℃的生长温度范围内,AlN薄膜晶体质量随生长温度的升高而逐步提高;而在350℃～400℃内,AlN薄膜晶体质量随生长温度的升高而降低。研究确定PEALD生长AlN晶体的最佳温度窗口为300℃～350℃,此温度范围内AlN的生长是自限性的,生长速度(GPC)稳定在0.056 nm/cycle。当生长温度为350℃时,得到的AlN晶体质量最优,其中AlN(002)晶面衍射峰的半高宽为0.64°,薄膜的电阻率为8.57×10^{11} Ω·cm。该研究为相关高性能器件的开发奠定坚实的工艺基础。

关键词: 等离子增强原子层沉积; 氮化铝薄膜; 温度; 晶体质量

中图分类号: TN304.2 **文章编号:** 1001－5868(2025)05－0872－07

Effect of Growth Temperature on the Quality of Atomic Layer Deposited Aluminum Nitride Thin Films on Metallic Substrates

XU Chengjia[1,2,3], ZHU Peng[2,3], YANG Yalin[1,2,3], QUAN Peiwen[1,2,3], GU Hong[2,3]

(1. School of Nanoscience and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, CHN;
2. Gusu Lab of Material Science, Suzhou 215125, CHN; 3. Suzhou Lab, Suzhou 215125, CHN)

Abstract: Aluminum nitride (AlN) thin films were prepared on tungsten (W) substrates via plasma-enhanced atomic layer deposition (PEALD). This study investigates the influence of growth temperature on the quality of AlN thin films and elucidates the mechanisms governing their growth behavior. The optimal temperature conditions for depositing high-quality crystalline AlN films on W substrates by PEALD were determined. The crystallinity, refractive index, growth-per-cycle (GPC), surface morphology, composition, and resistivity were characterized using X-ray diffraction, spectroscopic ellipsometry, scanning electron microscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, and semiconductor parameter analysis. Experimental results demonstrate that crystal quality improves progressively with increasing temperature between 200℃ and 350℃ but deteriorates at 350℃～400℃. An optimal temperature window of 300℃～350℃ was identified for self-limiting AlN growth,

收稿日期:2025－05－29.
基金项目:姑苏创新创业领军人才项目(ZXL2021383).
* 通信作者:顾 泓

exhibiting a stable GPC of 0.056 nm/cycle. At 350℃, the highest crystal quality was achieved, with a 0.64° full width at half maximum for the AlN (002) diffraction peak and a resistivity of 8.57×10^{11} Ω·cm. This study establishes a solid process foundation for the development of related high-performance devices.

Key words: plasma-enhanced atomic layer deposition; aluminum nitride film; temperature; crystal quality

0　引言

氮化铝(AlN)作为一种宽禁带半导体材料的典型代表(禁带宽度为6.2 eV),凭借其优异的热导率、化学稳定性及高击穿场强等特性,在半导体器件领域具有广泛的应用[1-2]。随着新型器件的研发以及微电子工艺集成化的发展,在金属衬底上生长*c*轴取向AlN薄膜的需求日益迫切[3]。然而,在金属上实现*c*轴取向AlN薄膜的生长仍然面临严峻挑战。对比已有的金属衬底的研究结果发现:Tai等在钴(Co)衬底上成功生长了AlN薄膜,其取向晶面有(100)和(002),(002)晶面的取向性较弱,这是由于AlN与Co之间存在较大的晶格失配度,抑制了(002)晶面的优先生长[4];Inoue等在钌(Ru)衬底上成功生长了AlN薄膜,但是由于AlN与Ru之间存在15%的晶格失配度,生长的AlN晶体质量较差[5];Inoue等在铜(Cu)衬底上成功生长了AlN薄膜,但是AlN与Cu之间存在较大的晶格失配度,生长的AlN薄膜质量不佳[6]。因此,选择合适的衬底是生长(002)取向晶面AlN的关键。相比之下,W与AlN之间的晶格失配度仅为1.7%[7],被视为实现*c*轴取向AlN薄膜的极具潜力的理想金属衬底之一。采用W金属作为AlN薄膜生长的衬底对AlN薄膜质量的研究具有重要意义。

目前,制备AlN薄膜的技术主要有金属有机物化学气相沉积(MOCVD)技术[8]、磁控溅射技术[9]和原子层沉积(ALD)技术[10]等。其中,ALD技术基于自限制表面反应原理,通过交替通入不同前驱体并在基底表面发生饱和化学吸附,从而实现单原子层级别的薄膜可控生长[11]。等离子体增强原子层沉积(PEALD)通过引入高活性等离子体源,显著降低了反应活化能,使其能够在相对较低的温度下沉积高质量的薄膜材料,这为解决热敏感基底(如某些金属或预集成器件结构)上的AlN生长难题提供了解决方案[12-14]。然而,针对在W衬底上制备AlN薄膜,PEALD生长温度工艺对薄膜生长机制的系统研究少有报道。

本文采用PEALD方法,以TMA和NH_3为前驱体,在W金属上生长了AlN薄膜,利用X射线衍射仪、椭圆偏振光谱仪、扫描电子显微镜、X射线光电子能谱以及半导体参数测试仪系统研究了生长温度(200℃～400℃)对AlN薄膜材料晶体质量的影响,并探究其生长机理。本研究旨在揭示温度影响薄膜生长行为的机理,确定PEALD在W衬底上生长高质量AlN晶体的最佳温度条件,为相关高性能器件的开发奠定工艺基础。

1　实验部分

采用p型(100)取向的Si(500 μm)/SiO_2(300 nm)作为衬底,制备了Ti(10 nm)/W(100 nm)作为金属层,经过丙酮、异丙醇、乙醇、去离子水超声清洗后氮气吹干备用。薄膜的制备采用等离子增强原子层沉积设备(PEALD R-200,Picosun)。使用TMA和等离子体化的NH_3分别作为Al源和N源的前驱体,以Ar作为载气,TMA通入时间为0.1 s,吹扫时间为8 s,NH_3脉冲时间为4.5 s,吹扫时间为10 s,AlN薄膜的生长温度分别为200℃,250℃,300℃,350℃和400℃,生长的循环次数为260次。

薄膜的反应过程如图1所示,AlN薄膜的形成基于两个半反应,可分为四个步骤:(1)首先通入TMA前驱体,TMA会和W表面活性位点发生吸附,形成中间反应体;(2)进行吹扫,载气氩气(Ar)被引入反应室,以清除其中多余的前驱体和反应生成的副产物;(3)通入N源,等离子体化的NH_3被通入反应室,与前一步形成的中间反应体发生化学反

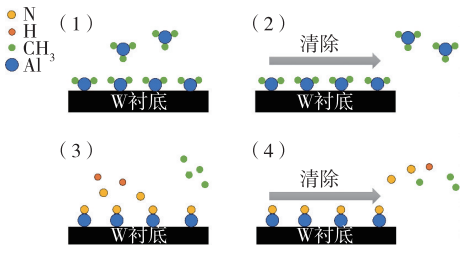


图1　PEALD沉积AlN薄膜的反应过程[15]

应生长AlN;(4)再次进行吹扫,载气Ar被引入反应室,以清除其中多余的N源和反应生成的副产物,确保自限性反应的进行。反应方程式如下[15]:

$$S^{*}+Al(CH_3)_3 \rightarrow S\text{-}Al(CH_3)_2^{*}+CH_4$$

$$S\text{-}AlCH_3^{*}+Plasma(NH_3^{*}) \rightarrow S\text{-}AlN+CH_4$$

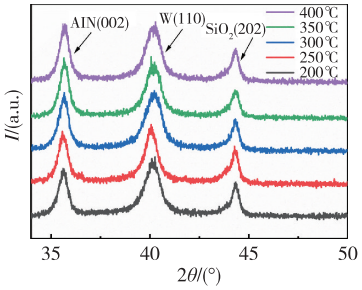
其中,"S"为衬底,"*"为活性位点。这两个半反应交替进行,通过控制循环次数,可以在W金属上逐层沉积AlN薄膜。在PEALD中,等离子体NH_3可以提供额外的能量,促进化学反应,提高反应速率和薄膜质量。

2 结果与讨论

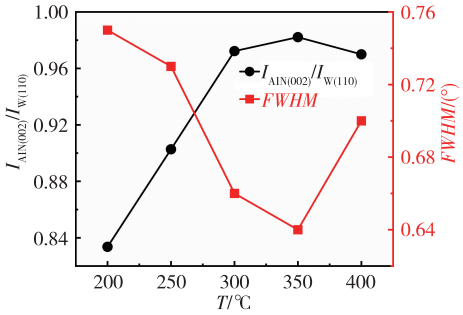
为研究AlN薄膜的晶体结构随生长温度的变化规律,使用X射线衍射仪(XRD,SmartLabX,日本理学株式会社)对AlN薄膜进行物相表征。以W(110)的强度作为基准,对不同温度的AlN薄膜XRD测试结果进行归一化处理,结果如图2(a)所示。图中2θ=40.1°对应于金属W(110)晶面的衍射峰,2θ=44.3°对应于衬底SiO_2(202)晶面的衍射峰,2θ=35.7°对应于AlN(002)晶面的衍射峰。

在以W金属为衬底的AlN薄膜XRD结果中,仅观察到AlN(002)晶面衍射峰,无其他晶面衍射峰存在。这是因为等离子体NH_3通过表面扩散寻找到能量最低的稳定吸附位点,并促使AlN晶粒优先沿能量最低的(002)晶面(即c轴取向)生长[16]。

图2(b)进一步绘制了AlN(002)晶面衍射峰与W(110)晶面衍射峰相对强度之比以及AlN(002)晶面衍射峰的半高宽(FWHM)随生长温度的变化关系。可以观察到在200℃~350℃的生长温度范围内,随着温度的升高,AlN和W的相对强度之比逐渐上升,表明AlN(002)衍射峰强度提高,(002)晶面衍射峰的半高宽从0.75°降低到0.64°,结晶性增强,晶体质量提高。这是根据热力学原理,当温度较低时,等离子体NH_3的热运动能量较低,无法与衬底的活性位点进行有效结合;随着生长温度的升高,反应粒子获得更高的热运动能量,促进了(002)取向的晶体生长[17]。在350℃~400℃的温度范围内,AlN(002)晶面的衍射峰和W(110)晶面的衍射峰相对强度之比逐渐下降,表明AlN(002)衍射峰强度下降,(002)晶面衍射峰的半高宽从0.64°增加到0.70°,结晶性降低,晶体质量降低。这是因为在高温下,TMA分子发生了过度热分解,原子的脱附概率显著提高,在基底表面的停留时间变短,不利于薄膜的稳定生长[18]。由此可知,在350℃左右AlN薄膜的生长模式发生了一定的转变。



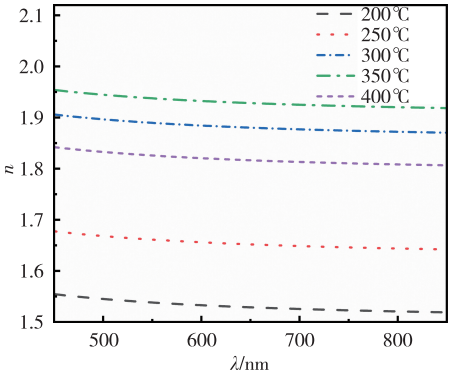
(a) 不同生长温度下AlN薄膜的X射线衍射图



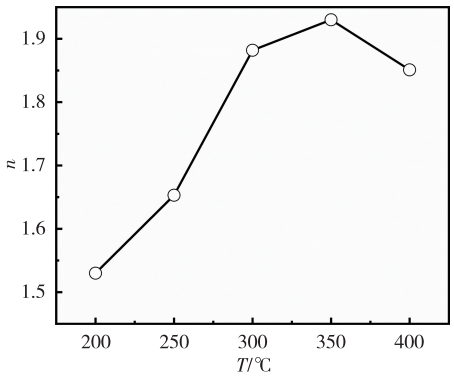
(b) 不同生长温度下AlN和W的相对强度之比以及AlN(002)晶面衍射峰的半高宽的变化

图2 不同生长温度下AlN薄膜的XRD分析

为进一步探索生长的AlN的光学特性,采用椭偏光谱仪(SE,M-2000DI,美国Woollam)测试AlN薄膜的折射率。图3(a)为不同生长温度下AlN薄膜的折射率(n)随波长的变化曲线。可以看到,当波长逐渐增大时,n呈现出下降的趋势。提取632.8 nm波长处[19]的n值,图3(b)为该波长下AlN薄膜的n随生长温度的变化曲线。可以看到,在200℃~350℃的生长温度范围内,随着温度的提高,AlN薄膜的n逐渐上升。



(a) 不同生长温度下AlN薄膜的折射率随波长的变化



（b）不同生长温度下 AlN 薄膜的折射率变化

图 3　不同生长温度下 AlN 薄膜的折射率分析

这是由于 AlN(002)取向结晶度提高，晶体柱状排列更加整齐，缺陷密度减少，n 趋向于 AlN 晶体的标准值 2.1[20]。当温度为 350℃时，生长的 AlN 的 n 最大，AlN(002)取向结晶度最高，晶体柱状排列最整齐。在 350℃～400℃温度内，AlN 薄膜的 n 有所下降，表明相应的薄膜(002)取向结晶度降低，晶体柱状排列整齐度下降。

如图 4 所示，进一步采用椭偏光谱仪测试不同生长温度下薄膜的厚度，用 Cauchy 模型进行拟合，得到生长速度(GPC)随温度的变化关系。

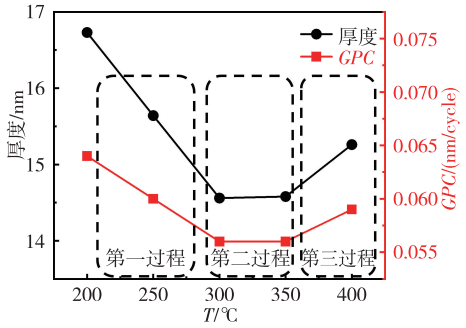
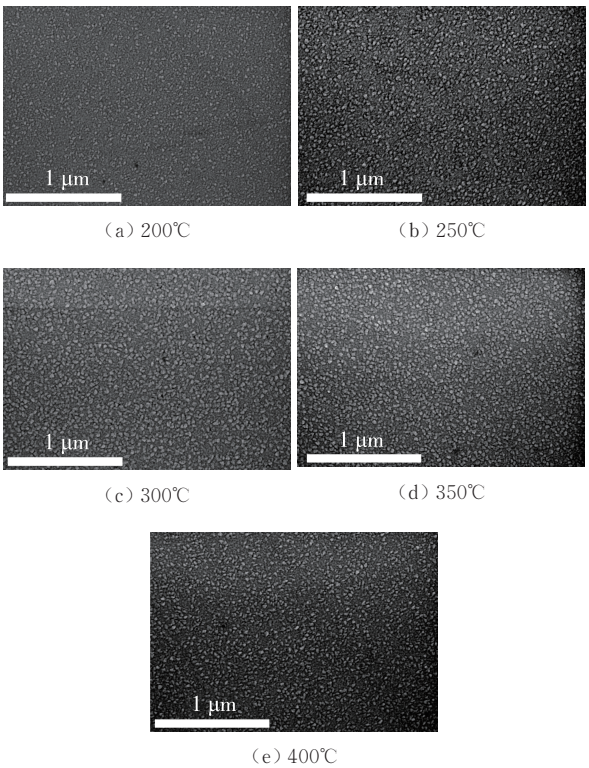


图 4　不同生长温度下 AlN 薄膜的厚度和 GPC

结果发现，在 200℃～300℃的生长温度范围内，GPC 呈现单一下降趋势；在 300℃～350℃内，GPC 约为 0.056 nm/cycle 且保持平稳；在 350℃～400℃内，GPC 进一步提升。综合上述的 XRD 和 SE 测试结果分析可知，在 PEALD 生长 AlN 薄膜过程中发生了三个生长过程：第一个过程发生在 200℃～300℃的生长温度范围内，当生长温度较低时，TMA 的吸附模式为物理吸附，此时 GPC 较大，随着生长温度的提高，TMA 转为化学吸附，AlN 薄膜开始单层生长，因此 GPC 下降[21]；第二个过程发生在 300℃～350℃温度范围内，此过程 AlN 的生长是自限性的，即当反应物耗尽时，表面生长反应终止，表面达到“自饱和”状态[22]，表现为 GPC 较稳定，其值为 0.056 nm/cycle，此温度区间即为 AlN 晶体生长的最佳温度窗口；第三个过程发生在 350℃～400℃内，GPC 进一步提升，这是因为 TMA 发生分解，生长的表面结构开始不稳定，由原子层逐层生长模式转化为近似化学气相沉积的生长模式[12]。

为分析薄膜的形貌特征，采用扫描电子显微镜（SEM，SU8600，日立）研究了生长温度对 AlN 薄膜表面形貌的影响规律，如图 5 所示。可以看出，不同生长温度下制备的 AlN 薄膜均连续完整，呈无裂纹的颗粒状结构，展现出良好的均匀性与连续性。



（a）200℃　（b）250℃

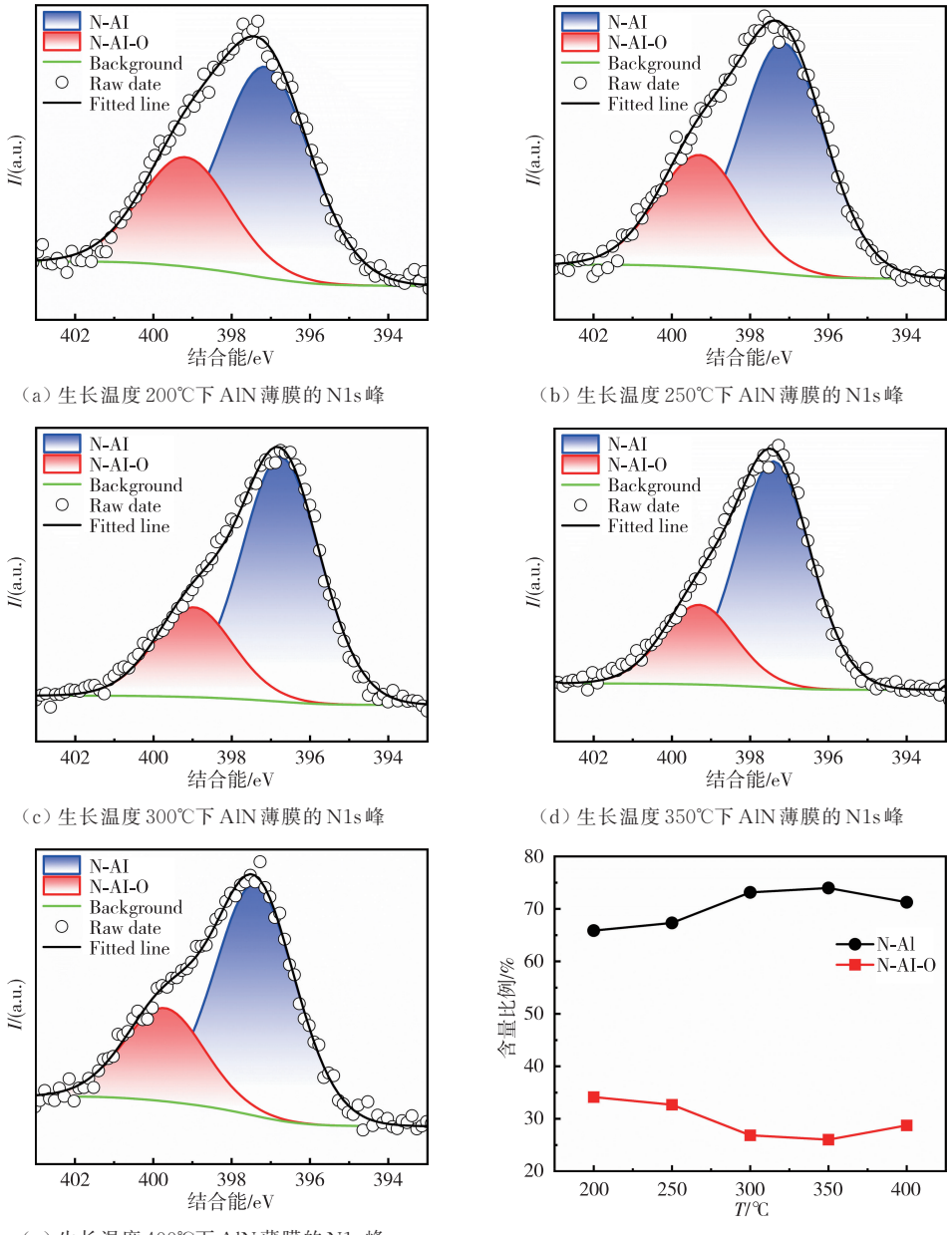
（c）300℃　（d）350℃

（e）400℃

图 5　不同生长温度下 AlN 薄膜的 SEM 图像

为研究 AlN 薄膜的成分，采用 X 射线光电子能谱仪（XPS，PHI 5000 Versaprobe Ⅱ）对 AlN 薄膜进行表征。如图 6(a)～(e)所示，为 AlN 薄膜在不同生长温度下 Nls 峰的 XPS 图谱。通过 XPS 对 AlN 薄膜进行半定量的元素分析，结合高斯和洛伦兹函数的组合对 Nls 精细谱进行曲线拟合，从 AlN 薄膜表面获得的 N1s 高分辨率 XPS 光谱拟合成两个子峰，分别代表 N—Al 键和 N—Al—O 键，具体峰位已与标准 C1s 峰 248.8 eV 相校准。如图 6(f)为不同生长温度下 AlN 薄膜 N—Al 键和 N—Al—O 的含量百分比。从图中可以看到，在 200℃～350℃的生长

温度范围内，随着温度的升高，N—Al—O键含量减少，N—Al键在薄膜中含量的占比在逐渐增加。一般认为，当AlN薄膜生长温度较低时，氧原子倾向于占据氮空位从而掺杂进入晶体。而在本研究中由于AlN薄膜的结晶程度随着温度的升高而提高，薄膜中的氮空位减少，从而降低了氧原子占据氮空位的概率，进而减少了薄膜中的氧杂质的浓度[23-24]。在350℃～400℃内，N—Al键含量相对下降，这可能是因为TMA发生分解，导致N—Al键合不完整，形成氮空位等点缺陷，破坏晶体的长程有序性。这一结果与XRD分析结果一致，证明生长温度对应AlN薄膜的杂质组成和含量同样有重要的影响，在窗口温度下生长更有利于提升晶体纯度和质量。



（a）生长温度200℃下AlN薄膜的N1s峰　（b）生长温度250℃下AlN薄膜的N1s峰

（c）生长温度300℃下AlN薄膜的N1s峰　（d）生长温度350℃下AlN薄膜的N1s峰

（e）生长温度400℃下AlN薄膜的N1s峰　（f）不同生长温度下AlN薄膜中N—Al键和N—Al—O的含量百分比

图6　不同生长温度下AlN薄膜的XPS分析

为研究AlN薄膜的电学特性，重新采用PEALD方法在200℃～400℃生长温度范围内，在W金属上制备相同厚度的AlN薄膜，并通过器件加工工艺在生长所得的AlN薄膜上方进一步制备了金属欧姆电极，采用半导体参数测试仪（Keithley 4200）对五组不同生长温度下的器件进行*I-V*测试，

计算出AlN薄膜的电阻率，结果如图7所示。可以看到，在200℃～350℃的生长温度范围内，随着温度的升高，AlN薄膜的电阻率逐渐上升，这是因为AlN(002)取向结晶度提高，内部缺陷减少，薄膜的质量提高[25]。当生长温度为350℃时，生长的AlN薄膜的电阻率最大，AlN(002)取向结晶度最高，电阻率为8.57×10^{11} Ω·cm。在350℃～400℃温度范围内，AlN薄膜的电阻率开始下降，这是由于相应的薄膜(002)取向结晶度降低，薄膜的结晶质量下降。

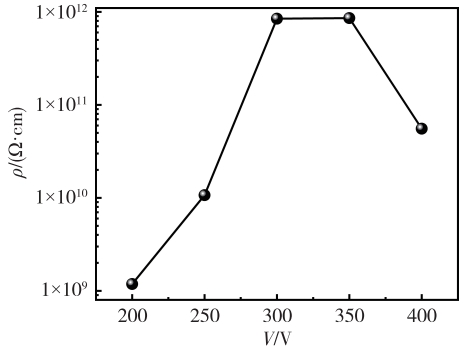


图7　不同生长温度下AlN薄膜的电阻率变化

3　结论

采用PEALD技术于W金属上成功生长了AlN薄膜，对薄膜的晶体结构、折射率、生长速度、表面形貌、成分以及电阻率进行了表征和分析。结果表明，生长温度对AlN薄膜的生长和性质有明显的影响，在200℃～350℃的生长温度范围内，AlN薄膜(002)取向结晶性增强，生长质量逐步提高，而在350℃～400℃内，AlN薄膜(002)取向结晶性降低，生长质量降低。通过进一步分析，确定AlN晶体生长的最佳温度窗口为300℃～350℃，此温度范围内AlN的生长是自限性的，GPC为0.056 nm/cycle。当生长温度为350℃时，得到的AlN晶体质量最好，其中AlN(002)晶面衍射峰的半高宽为0.64°，薄膜的电阻率为8.57×10^{11} Ω·cm。

本工作首次系统揭示了PEALD生长温度工艺参数在W衬底上对AlN薄膜c轴取向生长和微观结构的调控规律，并明确了最佳的生长温度参数，为在W金属上集成AlN基器件提供了关键的技术支撑和可靠的工艺指导，具有重要的实际应用价值。

参考文献：

[1] Qiu P, Liu H, Zhu X L, et al. Atomic layer deposition and application of group Ⅲ nitrides semiconductor and their alloys[J]. Acta Physica Sinica, 2024, 73(3): 038102.

[2] Iqbal A, Mohd-Yasin F. Reactive sputtering of aluminum nitride (002) thin films for piezoelectric applications: a review[J]. Sensors, 2018, 18(6): 1797.

[3] Zhang K, Zhao X, Han Y, et al. Mechanism analysis and highly scaled aluminum nitride-based self-rectifying memristors[J]. Advanced Electronic Materials, 2022, 8(11): 2200702.

[4] Nguyen T, Fleming Y, Bender P, et al. Low-temperature growth of AlN films on magnetostrictive foils for high-magnetoelectric-response thin-film composites[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(26): 30874-30884.

[5] Inoue S, Okamoto K, Nakano T, et al. Characteristics of single crystalline AlN films grown on Ru(0001) substrates[J]. Journal of Crystal Growth, 2006, 297(2): 317-320.

[6] Inoue S, Okamoto K, Matsuki N, et al. Epitaxial growth of AlN on Cu(111) substrates using pulsed laser deposition[J]. Journal of Crystal Growth, 2006, 289(2): 574-577.

[7] Li G, Wang W, Yang W, et al. Epitaxial growth of group Ⅲ-nitride films by pulsed laser deposition and their use in the development of LED devices[J]. Surface Science Reports, 2015, 70(3): 380-423.

[8] Qin H, He N, Han C, et al. Perspectives of ferroelectric wurtzite AlScN: material characteristics, preparation, and applications in advanced memory devices[J]. Nanomaterials, 2024, 14(11): 986.

[9] Pingen K, Wolff N, Mohammadian Z, et al. III-nitride magnetron sputter epitaxy on Si: controlling morphology, crystal quality, and polarity using Al seed layers[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(26): 34294-34302.

[10] Motamedi P, Cadien K. Structural and optical characterization of low-temperature ALD crystalline AlN[J]. Journal of Crystal Growth, 2015, 421: 45-52.

[11] 雷星航，王国政，杨继凯. 原子层沉积过程中腔室内前驱体分布的模拟研究[J]. 半导体光电，2023，44(1)：81-86.
Lei Xinghang, Wang Guozheng, Yang Jikai. Simulation of precursor distribution in chamber during atomic layer deposition[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(1): 81-86.

[12] Tang W H, Liu B W, Zhang B C, et al. Low temperature depositions of GaN thin films by plasma-enhanced atomic layer deposition[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(9): 098101.

[13] 成天乐，曹　发，李　佳，等. 原子层沉积低温生长α-MoO_3薄膜[J]. 半导体光电，2022，43(3)：567-572.
Cheng Tianle, Cao Fa, Li Jia, et al. Low temperature growth of polycrystalline molybdenum oxide thin films by atomic layer deposition[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(3): 567-572.

[14] 李　佳，王文樑，季小红. 衬底表面处理对原子层沉积法生长GaN薄膜的影响[J]. 半导体光电，2021，42(3)：375-379，417.
Li Jia, Wang Wenliang, Ji Xiaohong. Effect of substrate

pretreatment on the growth of GaN films prepared by atomic layer deposition[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(3): 375-379, 417.

[15] Feng J H, Tang L D, Liu B W, et al. Low-temperature growth of AlN thin films by plasma-enhanced atomic layer deposition[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(11): 117302.

[16] Nguyen T, Adjeroud N, Glinsek S, et al. A film-texture driven piezoelectricity of AlN thin films grown at low temperatures by plasma-enhanced atomic layer deposition[J]. APL Materials, 2020, 8(7): 071101.

[17] 邱洪宇, 王馨颐, 段 彰, 等. GaAs衬底上等离子体增强原子层沉积GaN薄膜[J]. 半导体光电, 2023, 44(4): 573-579.
Qiu Hongyu, Wang Xinyi, Duan Zhang, et al. Plasma-enhanced atomic layer deposition of GaN thin films on GaAs substrate[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(4): 573-579.

[18] Karnopp J, Neto N A, Vieira T, et al. Exploring TMA and H_2O flow rate effects on Al_2O_3 thin film deposition by thermal ALD: insights from zero-dimensional modeling[J]. Coatings, 2024, 14(5): 578.

[19] 瞿敏妮, 乌李瑛, 董学谦, 等. 原子层沉积超薄氮化铝薄膜的椭圆偏振光谱法表征[J]. 微纳电子技术, 2022, 59(2): 169-174.
Qu Minni, Wu Liying, Dong Xueqian, et al. Ellipsometry characterization of ultrathin AlN film grown by atomic layer deposition[J]. Micronanoelectronic Technology, 2022, 59(2): 169-174.

[20] Giba A E, Pigeat P, Bruyère S, et al. Controlling refractive index in AlN films by texture and crystallinity manipulation[J]. Thin Solid Films, 2017, 636: 537-545.

[21] Miao M, Cadien K. AlN PEALD with TMA and forming gas: study of plasma reaction mechanisms[J]. RSC Advances, 2021, 11(20): 12235-12248.

[22] De Coster V, Poelman H, Dendooven J, et al. Designing nanoparticles and nanoalloys for gas-phase catalysis with controlled surface reactivity using colloidal synthesis and atomic layer deposition[J]. Molecules, 2020, 25(16): 3735.

[23] Zhang X Y, Peng D C, Han J, et al. Effect of substrate temperature on properties of AlN buffer layer grown by remote plasma ALD[J]. Surfaces and Interfaces, 2023, 36: 102589.

[24] Gungor N, Alevli M. Oxygen incorporation in AlN films grown by plasma-enhanced atomic layer deposition [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2022, 40(2): 022404.

[25] 莫敏静, 刘 哲, 马紫腾, 等. 沉积条件对室温下磁控溅射AZO薄膜微结构与光电性能的影响[J]. 半导体光电, 2022, 43(3): 561-566, 577.
Mo Minjing, Liu Zhe, Ma Ziteng, et al. Effect of deposition conditions on microstructure and photoelectric properties of AZO films by magnetron sputtering at room temperature[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(3): 561-566, 577.

作者简介：

徐呈甲(2000—),男,山东省济南市人,硕士研究生,主要从事氮化物半导体薄膜的生长和新型存储器件研究;

顾 泓(1988—),女,江苏省苏州市人,博士,副研究员,主要研究方向包括氮化物半导体材料原子层外延生长、氮化物材料新型神经形态器件及氮化物材料存算一体芯片研究。