



# 基于磁控溅射系统的大尺寸 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜沉积模型与性能研究

肖厚恩<sup>1a</sup>, 王顺利<sup>1b,2</sup>

(1. 浙江理工大学, a. 材料科学与工程学院; b. 理学院, 杭州 310018;

2. 浙江理工大学常山研究院有限公司, 浙江 衢州 324200)

**摘要:** 薄膜型  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  光电探测器具有成本低廉、性能优异、可重复性高等优点, 实现  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜大尺寸均匀生长对批量制备薄膜型  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  光电探测器具有重要意义。为了实现大尺寸  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的高效生长, 采用 Matlab 软件对磁控溅射系统中倾斜圆形平面靶与旋转水平工作台上  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜沉积模型进行了仿真, 分析了靶基距和溅射靶转动角度对薄膜性能的影响, 并进行了实验验证。结果表明: 靶基距的增加会提高沉积薄膜的均匀性, 在一定的靶基距下溅射靶转动角度的增加会使薄膜均匀性先提高后降低,  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜均匀性实验分析结果与仿真结果基本一致; 在靶基距为 100 mm、溅射靶转动角度为  $35^\circ$  的条件下, 在蓝宝石衬底上沉积得到了平均厚度偏差为 1.27% 的  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜; 以沉积的薄膜批量制备  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  光电探测器, 得到的光电探测器对 254 nm 的光源具有基本一致的光响应。该研究为大批量制备高质量  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜探测器提供了一定的理论依据。

**关键词:**  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ; 磁控溅射; 大尺寸; 倾斜圆型平面靶; Matlab

**中图分类号:** TB43

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851 (2024) 05-0310-09

**引文格式:** 肖厚恩, 王顺利. 基于磁控溅射系统的大尺寸  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜沉积模型与性能研究[J]. 浙江理工大学学报 (自然科学), 2024, 51(3): 310-318.

**Reference Format:** XIAO Hou'en, WANG Shunli. Research on the deposition model and properties of large-size  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  thin films based on magnetron sputtering system[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2024, 51(3): 310-318.

## Research on the deposition model and properties of large-size $\text{Ga}_2\text{O}_3$ thin films based on magnetron sputtering system

XIAO Hou'en<sup>1a</sup>, WANG Shunli<sup>1b, 2</sup>

(1a. School of Materials Science & Engineering; 1b. School of Science, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang Sci-Tech University Changshan Research Institute Co., Ltd., Quzhou 324200, China)

**Abstract:** Thin-film type  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  photodetectors possess advantages such as low cost, excellent performance, and high repeatability, making large-size and uniform growth of  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  thin films of great significance for the mass production of such photodetectors. To achieve the efficient growth of large-size  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  films, a simulation of  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  film deposition model was conducted by using Matlab software in the magnetron sputtering system, considering the inclined circular plane target and rotating horizontal workbench. The effects of target-to-substrate distance and sputtering target rotation angle on film properties were analyzed, followed by experimental validation. The simulation results show that an increase in target-substrate distance enhances the uniformity of the deposited film and that an increase in spray target rotation angle enhances the uniformity of the film at first and then decreases it under a certain

收稿日期: 2023-03-27 网络出版日期: 2024-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(62274148); 浙江省自然科学基金(LY20F040005); 浙江理工大学科研启动基金资助项目(20062224-Y)

作者简介: 肖厚恩(1996—), 男, 湖北仙桃人, 硕士研究生, 主要从事半导体物理与器件方面的研究。

通信作者: 王顺利, E-mail: slwang@zstu.edu.cn

target-substrate distance. Additionally, the experimental results of  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  film uniformity analysis are generally consistent with the simulation results. Under the conditions of a target-to-substrate distance of 100 mm and a sputtering target rotation angle of  $35^\circ$ , a  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  film with an average thickness deviation of 1.27% is obtained on a sapphire substrate. The  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  photodetectors are then mass-produced from the deposited films, which shows a basic consistent response to a 254 nm light source. This study provides a certain theoretical basis for the mass production of high-quality  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  thin film detectors.

**Key words:**  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ; magnetron sputtering; large-scale; tilted circular planar targets; Matlab

## 0 引言

$\text{Ga}_2\text{O}_3$  是一种具有优异光学性质和稳定物理化学性质的氧化物半导体,具有约 4.9 eV 的带隙,带隙对应的吸收边为 254 nm,是制备日盲探测器的理想材料<sup>[1-3]</sup>。同时, $\text{Ga}_2\text{O}_3$  还具有超高的临界击穿场强(约 8 MV/cm)和高的 Baliga 品质因数(约为 GaN 器件的 4 倍、SiC 器件的 10 倍、Si 器件的 3444 倍),在高压、大功率、高效率和小体积电子器件制备方面具有极大的潜力<sup>[4-5]</sup>。 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  光电探测器的研制一般有单晶、薄膜以及纳米结构 3 个方向。制备单晶型  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  光电探测器通常需要较高的暗电流,成本较高;纳米结构型  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  光电探测器在大量制备时难以做到性能稳定;而薄膜型  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  日盲紫外探测器具有制备简单、可重复性高、性能优异等特点,具有巨大的商业化应用前景。

实现大尺寸  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的高效生长是薄膜型  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  光电探测器达成市场化应用的前提,目前主流的大尺寸  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的制备方法为 CVD 法<sup>[6-8]</sup>,但该制备方法效率较低,影响了  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  日盲探测器的规模化应用。磁控溅射沉积薄膜是大面积高效制备高质量薄膜的常用方法<sup>[9-11]</sup>。为了使沉积得到的薄膜厚度均匀且可控,研究人员对磁控溅射系统做了大量的理论和实验研究<sup>[12-15]</sup>。王誉等<sup>[16]</sup>采用直流磁控溅射系统,建立了不同靶基距下小圆形平面靶沉积薄膜的厚度分布理论模型,发现靶基距的增大会提高膜厚分布的均匀性。付学成等<sup>[17]</sup>利用磁控溅射系统,研究了水平静止工作台上倾斜小圆形平面靶沉积薄膜的厚度分布情况,通过调整溅射靶转动角度沉积得到了非均匀度小于 0.6% 的氮化钽薄膜。上述研究表明,调节靶基距和溅射靶转动角度可有效提高沉积薄膜的均匀性,因此采用磁控溅射有望实现均匀  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的大规模制备。

Matlab 是一款用于数据分析、图像处理、动态系统建模和仿真等的数学软件,能快速高效地进行科学计算和数学建模<sup>[18]</sup>。本文采用 Matlab 软件建

立了磁控溅射系统中倾斜圆型平面靶在水平旋转工作台上沉积薄膜的厚度分布模型,分析靶基距和溅射靶转动角度对沉积薄膜均匀性的影响;通过实验对模型进行了验证,同时解释了出现偏差的原因。基于实验条件下的最佳参数制备得到了均匀性良好的  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜并以此制备了光电性能基本一致的  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜探测器。本文为高效制备高质量大尺寸  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜提供了新的思路。

## 1 数学模型构建与仿真

### 1.1 溅射源平行于水平工作台的数学模型

以 Ar 原子为例,磁控溅射沉积薄膜的原理是通过靶与基底的正负偏压之间的巨大电场,使工作气体原子 Ar 电离, $\text{Ar}^+$  离子在电场的加速下轰击位于负电位的靶材;靶材粒子在  $\text{Ar}^+$  离子的轰击下获得能量并从靶材表面溅射飞出,从而在衬底上沉积形成薄膜。通过对磁控溅射实际情况进行模拟,本文提出如下 3 点假设:

a) 由于靶中环形区域的磁场很强,大量的电子被束缚在环形区域,使气体电离并发生的溅射。因此,在镀膜过程中,靶材上会出现刻蚀环。本文假定所有的溅射粒子来自刻蚀环,且刻蚀环区域的靶材被均匀的溅射。

b) 靶材粒子溅射的角分布为近似余弦分布。本文假定溅射粒子的角分布为简单的余弦分布。

c) 靶材粒子在向衬底溅射过程中与工作气体原子碰撞而被散射的现象一般不能忽略,但工作气压一般仅为 1 Pa 左右,较为稀薄。因此,本文假定溅射粒子飞行过程中被散射,其沉积在衬底上的几率与飞行距离成反比。

这 3 条假定不会使拟合结果产生很大误差。

在此假设下,水平状态下小圆形平面靶溅射示意图如图 1 所示。由于此时圆形靶与工作台平行且轴线重合,工作台旋转并不会影响薄膜厚度分布。假设单位时间内从刻蚀环溅射出的靶材质量为  $m$ ,靶材密度为  $\rho$ ,对刻蚀环进行微分,则刻蚀环上微小

面溅射源质量  $dm = \frac{m}{2\pi} d\theta$ 。已知微小溅射面在平面基板上沉积的薄膜厚度分布公式为  $T = \frac{mh^2}{\pi\rho(h^2+b^2)^2}$ , 其中  $b$  为微小面源距平面上任意点  $P$  的水平距离<sup>[19]</sup>。设点  $P$  相距轴心距离为  $R$ , 刻蚀环半径为  $r$ , 靶基距为  $h$ , 则由余弦定理可知:  $b = R^2 + r^2 - 2Rr\cos\theta$ ; 溅射环上微小面源在  $P$  点沉积的薄膜厚度  $dT = \frac{mh^2 d\theta}{2\pi^2\rho(h^2+R^2+r^2-2Rr\cos\theta)^2}$ 。积分可得环形溅射源在平行平面上沉积薄膜厚度公式为<sup>[17]</sup>:

$$T = \frac{mh}{\pi\rho} \cdot \frac{h^2 + R^2 + r^2}{[(h^2 + R^2 + r^2 + 2Rr)(h^2 + R^2 + r^2 - 2Rr)]^{3/2}} \quad (1)$$

设点  $P$  的坐标为  $(x, y)$  或  $(R, \varphi)$ , 这两个坐标的关系为:

$$x = R\cos(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

$$y = R\sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

$$R = x^2 + y^2 \quad (4)$$

其中:  $\omega$  为工作台的旋转角速度,  $\varphi$  为点  $P$  的初始方位角,  $t$  为工作台的旋转时间。

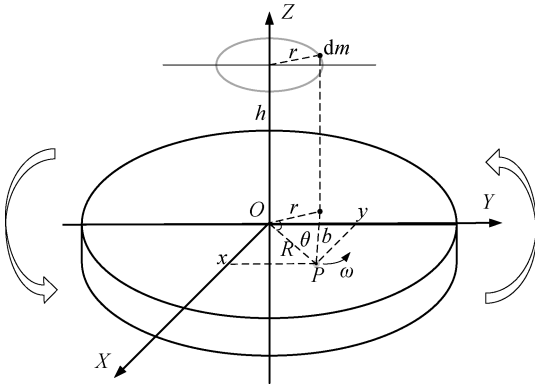


图1 溅射源与旋转工作台轴心重合时溅射示意图

## 1.2 溅射源倾斜于水平工作台的数学模型

溅射源倾斜于水平工作台的数学模型示意图如图2所示。初始靶基距为  $h_0$ , 圆形靶距离转动节点  $O_2$  的距离为  $l$ , 且转动角度为  $\theta$ , 转动节点  $O_2$  与工作台旋转中心  $O_1$  的垂直距离  $O_2M$  为  $h_0 + l$ , 水平距离  $MO_1$  为  $a$ 。由于工作台所在平面与溅射源平面之间存在夹角, 在旋转的过程中其上任一点  $P$  与溅射源平面的相对距离  $h_1$  以及与溅射源轴心的相对距离  $R_1$  在不停地变化。

点  $P$  在圆形靶轴线的法平面上相对轴线的坐

标为:

$$x_1 = R\cos(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

$$y_1 = (R\sin(\omega t + \varphi) + a - (h_0 + l)\tan\theta)\cos\theta \quad (6)$$

此时点  $P$  相对溅射源平面的距离为:

$$h_1 = \frac{h_0 + l}{\cos\theta} + y_1 \tan\theta - l \quad (7)$$

相对于溅射源轴心的距离为:

$$R_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \quad (8)$$

将式(5)~(8)重新代入式(1), 得到溅射源倾斜状态下水平旋转工作台上衬底的膜厚分布公式:

$$T = \frac{m}{\pi\rho} \int_0^t \frac{(h_1^2 + R_1^2 + r^2)h_1 dt}{[(h_1^2 + R_1^2 + r^2 + 2Rr)(h_1^2 + R_1^2 + r^2 - 2Rr)]^{3/2}} \quad (9)$$

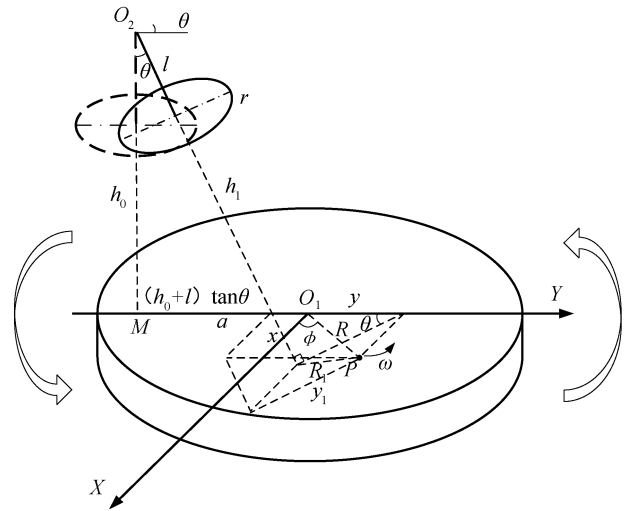


图2 溅射源倾斜于旋转工作台时溅射示意图

## 1.3 使用 Matlab 对模型进行仿真

平均厚度偏差表示薄膜厚度偏差的值, 其值越小薄膜的均匀性越好, 其计算公式为:

$$A = \frac{|T - \bar{T}|}{T} \quad (10)$$

将实际测量的  $a = 80$  mm、 $r = 18$  mm、 $l = 120$  mm 以及不同的  $\theta$  和  $h_0$  带入式(9)~(10)中, 计算得到的平均厚度偏差( $\times 100\%$ )结果如表1所示。从表1可知: 随着  $h_0$  逐渐增大, 薄膜的平均厚度偏差逐渐减小,  $h_0$  对膜厚分布均匀度的影响逐渐减小; 随着溅射源转动角度  $\theta$  的增大, 薄膜的厚度偏差先减小后增大。

令工作台中心  $O_2$  点沉积的薄膜厚度为  $T_0$ , 用  $T/T_0$  表示  $P$  点相对于中心点的膜厚, 即相对厚

度,以此衡量沉积薄膜的均匀性。图 3(a)为  $h_0=120\text{ mm}$  时不同溅射靶转动角度下沉积的薄膜沿工作台 Y 轴方向的相对厚度分布。初始条件下沉积的薄膜均匀性很差,中间较厚、外围较薄,随着转动角度的增大外围厚度逐渐增加,直至超过边缘区域的薄膜厚度,在  $35^\circ\sim 40^\circ$  范围内沉积的薄膜均匀度最好(见图 3(a))。为了进一步探索沉积薄膜的最

佳厚度,在  $h_0=120\text{ mm}$  的条件下,对溅射靶转动角度范围为  $35.0^\circ\sim 40.0^\circ$  的相对厚度分布进行拟合,拟合结果如图 3(b)所示,对应的相对厚度偏差如表 2 所示,在  $\theta=38.5^\circ$  时沉积得到的薄膜均匀性最好,此时的平均厚度偏差为  $0.391\%$ 。图 3(c)为  $\theta=38.5^\circ$  时不同的  $h_0$  下沉积薄膜的相对厚度分布,薄膜厚度变化规律与表 1 所总结规律相一致。

表 1 不同工作台与转动中心垂直距离  $h_0$  和转动角度  $\theta$  下沉积薄膜的平均厚度偏差 %

$h_0/\text{mm}$	$\theta/(^\circ)$											
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
20	13.301	13.891	14.662	15.251	15.245	14.311	12.754	11.138	8.772	4.486	3.397	
30	12.724	13.185	13.633	13.780	13.349	12.272	10.793	8.950	6.229	2.462	3.604	
40	11.999	12.283	12.444	12.268	11.606	10.474	8.972	7.005	4.339	1.544	3.634	
50	11.186	11.294	11.227	10.838	10.052	8.888	7.370	5.421	2.987	1.183	3.553	
60	10.339	10.296	10.061	9.537	8.684	7.513	6.022	4.180	2.030	1.098	3.421	
70	9.499	9.335	8.983	8.377	7.496	6.343	4.917	3.223	1.351	1.170	3.269	
80	8.693	8.439	8.008	7.357	6.473	5.359	4.022	2.487	0.894	1.293	3.113	
90	7.938	7.618	7.138	6.468	5.599	4.539	3.300	1.919	0.640	1.370	2.962	
100	7.240	6.876	6.368	5.696	4.856	3.857	2.718	1.479	0.509	1.412	2.818	
110	6.604	6.211	5.690	5.028	4.225	3.291	2.247	1.134	0.454	1.430	2.683	
120	6.027	5.617	5.095	4.452	3.689	2.819	1.863	0.863	0.451	1.432	2.557	

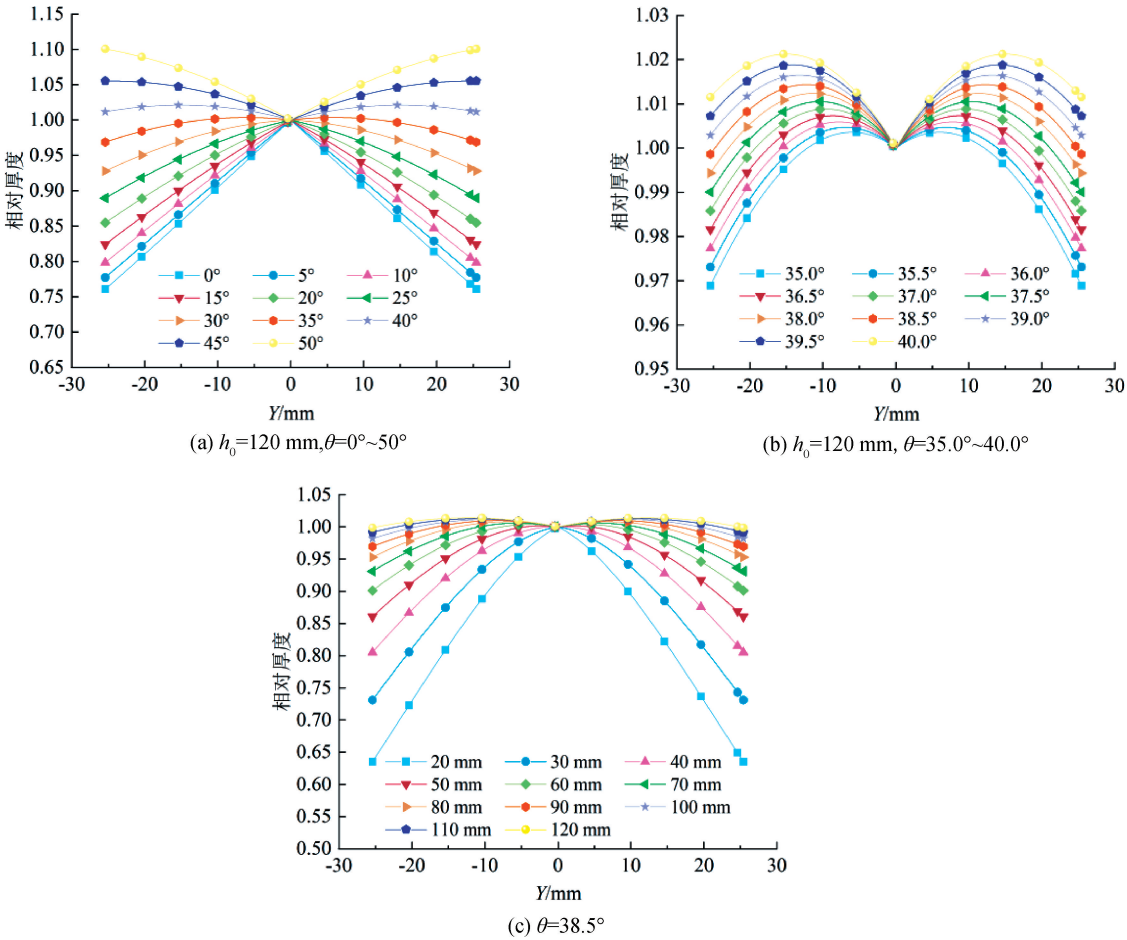


图 3 溅射靶不同倾斜角度和靶基距下的相对膜厚分布示意图



表 2  $h_0=120\text{ mm}$  时不同转动角度  $\theta$  下沉积薄膜的平均厚度偏差 %

$h_0/\text{mm}$	$\theta/(^{\circ})$										
	35.0	35.5	36.0	36.5	37.0	37.5	38.0	38.5	39.0	39.5	40.0
120	0.863	0.765	0.667	0.573	0.497	0.443	0.408	0.391	0.392	0.412	0.451

2 实验验证

2.1 实验材料与仪器

主要实验材料:5 cm(2 英寸) $\text{Al}_2\text{O}_3$  衬底(c 面, 天通控股股份有限公司);去离子水、无水乙醇和丙酮(上海阿拉丁生化科技股份有限公司); $\text{Ga}_2\text{O}_3$  靶材(纯度 99.99%,北京中科言诺新材料科技有限公司);高纯银(纯度 99.99%,北京中科言诺新材料科技有限公司)。

主要实验仪器:GZK103-A 磁控溅射仪(靶基距调整范围为 20~100 mm,溅射靶转动角度调整范围为 0~35°,郑州成越科学仪器有限公司);S-4800 场发射扫描电子显微镜(日本日立有限公司);D8 DISCOVERX 射线衍射仪(XRD, Bruker 公司);Nx-Hivie 原子力显微镜(AFM, Park Systems 公司)和 CY-EVP170 S-1S-A 高真空热蒸发镀膜仪(郑州成越科学仪器有限公司)。

2.2  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的制备

先后使用丙酮、无水乙醇、去离子水清洁  $\text{Al}_2\text{O}_3$  衬底,随后将其放入干燥箱中,使用氮气吹干,待其充分干燥后将其放入磁控溅射仪工作台的正中心。调节靶基距和溅射源倾斜角度,先后使用机械泵和分子泵对腔室内抽真空,待压强降至  $1\times10^{-4}\text{ Pa}$  后通入流量为 170 mL/min 的氩气,此时腔体内压强为 1 Pa。打开射频源开始溅射,设置溅射功率为 100 W,工作台温度为室温,溅射时间为 2 h。

2.3  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  探测器的制备

将沉积好的薄膜置于掩模版上,并放入热蒸发仪的真空室中,将纯度为 99.99%的银粒放于蒸发坞上,关闭舱门;先后使用机械泵和分子泵将真空室内的压强抽至  $1\times10^{-3}\text{ Pa}$ ,然后开启电流电压源以加热蒸发坞,待银粒熔融后调整电流使银的沉积速率为  $0.4\text{ \AA/s}$ ,待沉积的银厚度达到 100 nm 后逐步关闭电流电压源,停止沉积。

3 结果与讨论

3.1  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的表征

基于上述磁控溅射沉积模型,本文制备了  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜,并对靶基距 100 mm、溅射靶转动角度

为 35°条件下沉积的  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜进行测试。为了确定溅射沉积的  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的成分结构,使用 XRD 对  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜进行测试,结果如图 4(a)所示。图 4(a)显示:除了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  衬底的(0006)峰外,样品在 20°~40°区间内出现了明显的非晶  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  的馒头峰,表明沉积得到了非晶形态的  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜。 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的紫外可见吸收光谱和拟合的光学带隙如图 4(b)及其插图所示, $\text{Ga}_2\text{O}_3$  的吸收边约为 264 nm,计算得到其对应的光学带隙为 4.7 eV,这是因为薄膜中较多的氧空位产生了低于导带最小值的施主能级,导致带隙减小<sup>[20]</sup>。为了进一步对沉积的  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜进行表征,本文对  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜进行了 XPS 光谱的测试,并用 C 1s 的标准结合能 284.8 eV 对测得的结果进行了校准,结果如图 4(c)~(d)所示。Ga 3d 峰的中心分别位于 20.4 eV 和 19.8 eV,分别对应于  $\text{Ga}^{3+}$  和  $\text{Ga}^{2+}$  态。O 1s 光谱分为 530.7 eV 的 O(Ⅰ)峰和 531.8 eV 的 O(Ⅱ)峰,分别对应于晶格位点中的  $\text{O}^{2-}$  离子和薄膜中的 O 空位缺陷<sup>[21]</sup>。从图 4(e)可以看到  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  纳米花较好地沉积在了衬底上,表面形态十分均匀<sup>[22]</sup>。图 4(f)表明: $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜表面粗糙度较低,计算得到 RMS(粗糙度均方根)仅为 1.672 nm。由此可知制备得到的  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜表面均匀,质量良好。

3.2  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的均匀性分析

使用 SEM 测试  $h_0=100\text{ mm}$  时不同溅射靶转动角度下及  $\theta=35^\circ$  时不同靶基距下沉积的薄膜沿工作台 Y 轴方向的截面厚度,薄膜相对厚度分布值如图 5(a)~(b)所示。图 5(a)~(b)表明:在转动角  $\theta$  分别为 5°、15°、25°和 35°时薄膜的平均厚度偏差分别为 5.872%、4.462%、2.695%和 1.331%,在  $h_0$  分别为 20、40、60、80 mm 和 100 mm 时薄膜的平均厚度偏差分别为 11.618%、7.355%、4.453%、2.598%和 1.327%,与表 1 中拟合的结果基本一致。

为了进一步说明沉积薄膜厚度的均匀性,在 2 英寸蓝宝石衬底上取如图 5(c)所示的取样点,并测量了在  $h_0=100\text{ mm}$ 、 $\theta=35^\circ$  的条件下沉积的薄膜在取样点的膜厚,其 SEM 测试结果如图 5(d)所示。从图 5(d)中可以看出沉积得到的  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜在中心区域厚度基本保持一致,边缘区域厚度相对较低,膜厚从 1.35  $\mu\text{m}$  逐渐降低至 1.31  $\mu\text{m}$ ,平均厚度偏

差为 1.270%，略低于理论值的 1.479%。出现这种偏差可能是因为溅射时靶粒子流分为直接流和扩散流两部分，前者经过与背景气体分子多次碰撞依然保持初始运动方向，后者经碰撞后速度减慢，运动方

向改变，直接流在靶附近，扩散流离靶较远。由于扩散流在衬底边缘附近的密度略大于衬底中心位置的密度，对薄膜外围补偿较多，使得边缘区域实际膜厚变大，平均厚度偏差低于理论计算值<sup>[17]</sup>。

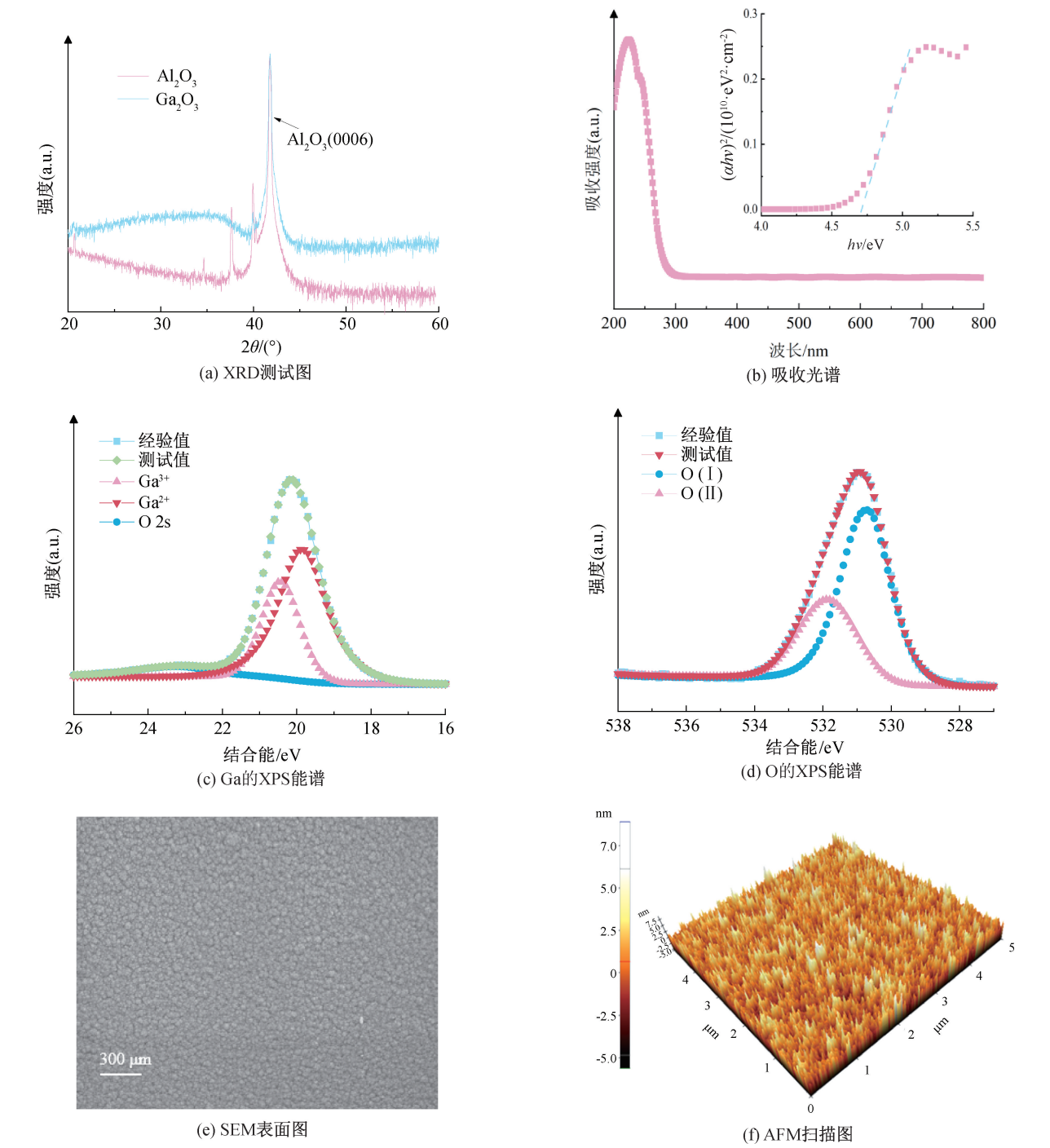


图 4 沉积 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜在不同仪器下的测试结果

注:图(b)中插图为拟合的光学带隙。

3.3 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 探测器的光电性能分析

为了进一步探究所制备薄膜的均匀性,在制备的 Ag/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 探测器中根据探测器距离中心的位置选取了 16 个探测器(见图 6(a))。对这些探测器

在 1300 μW/cm<sup>2</sup> 的 254 nm 光照和 5 V 的偏压下进行了 *I*-*t* 测试,结果分别如图 6(b)—(c)所示。图 6(b)为边缘区域薄膜所制备的探测器 *I*-*t* 测试图,由于衬底外围薄膜的沉积受到一定的扩散流溅射粒

子的影响,薄膜厚度有一定波动,同时由于测试误差的存在,探测器的光电流有小范围的波动。图 6(c)为中间区域的探测器  $I-t$  测试图,这一区域的薄膜沉积主要受到直接流溅射粒子的影响,薄膜相对均

匀。结合图 6(b)—(c)可以看出,制备的探测器的光电性能基本一致,光电流和暗电流分别约为 500 nA 和 0.1 nA,光暗比为  $5\times 10^3$ 。

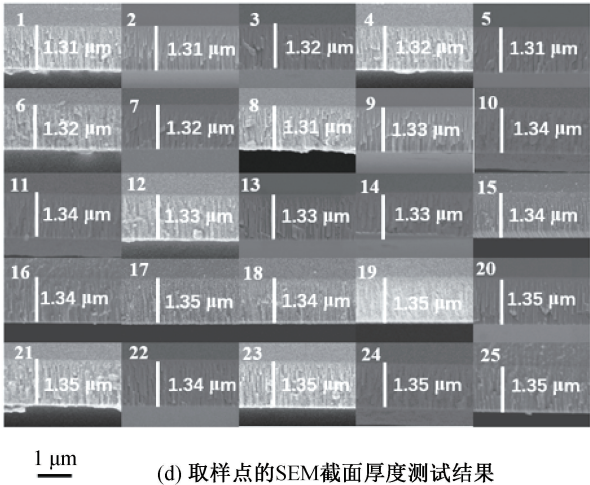
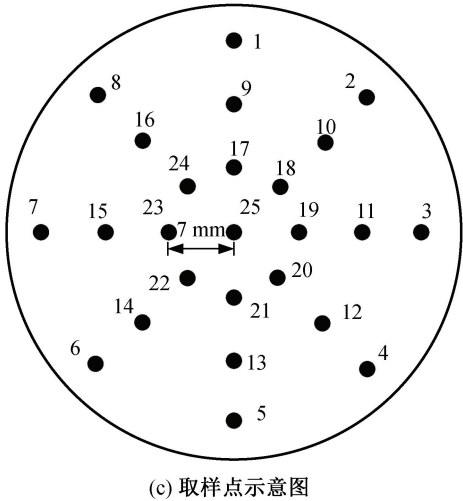
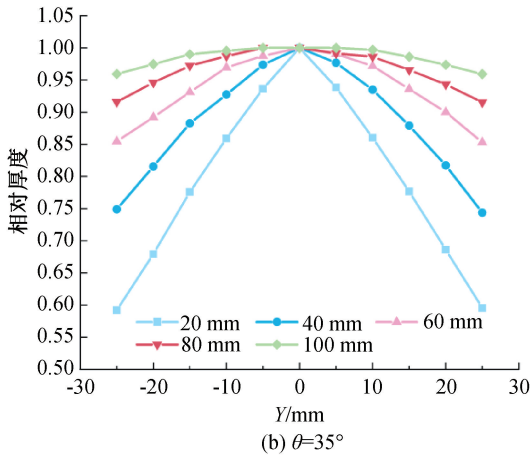
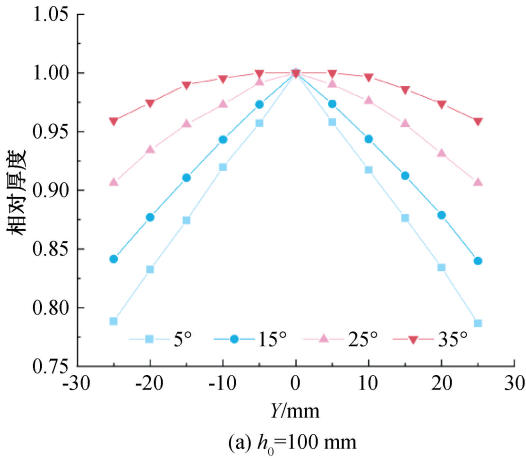


图 5 沉积薄膜在取样点的厚度测试结果

#### 4 结 论

为了实现大尺寸均匀  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的高效生长,本文建立了倾斜圆形平面靶在水平旋转工作台上磁控溅射沉积薄膜的厚度分布模型,通过对模型进行实验验证,实现了大尺寸  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的均匀生长,并以此制备了  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  光电探测器,对其性能进行了探究,主要结论如下:

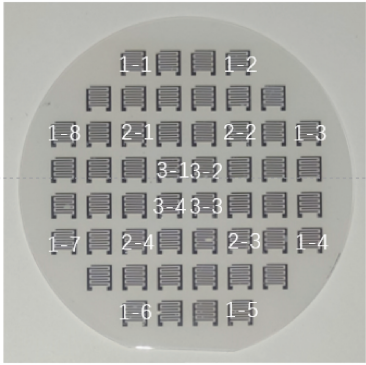
a)在建立的倾斜圆形平面靶磁控溅射沉积薄膜的模型下,随着靶基距的增加,沉积薄膜的平均厚度偏差逐渐减小,薄膜的均匀性变好,但其对沉积薄膜均匀性的影响也越来越小;在靶基距一定时,随着溅射靶转动角度的增加,沉积薄膜的均匀性先提高后降低。

b)建立的理论模型较为贴合实际情况,在不同

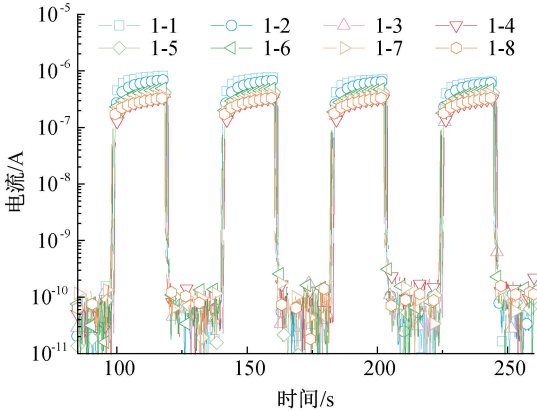
的靶基距和溅射靶转动角度下对模型进行了验证实验,实验结果与拟合结果基本一致。在靶基距为 100 mm、溅射靶转动角度为  $35^\circ$  的条件下,在蓝宝石上沉积的  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的平均厚度偏差为 1.27%,以沉积的薄膜批量制备的  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  深紫外探测器在 254 nm 的紫外光照射下具有基本一致的光响应和光暗比,制备的探测器具有良好的均一性和可重复性。

本文建立的磁控溅射沉积薄膜的厚度分布模型有效模拟了磁控溅射沉积  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的实际情况,这对  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的大尺寸生长以及薄膜基  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  日盲探测器的大批量制备具有一定的借鉴意义。但由于器件的光电流不仅受到薄膜厚度的影响,还受到薄膜中缺陷、金半接触等的影响,因此探测器的光电流会存在一定的波动。未来可以通过高温退火、

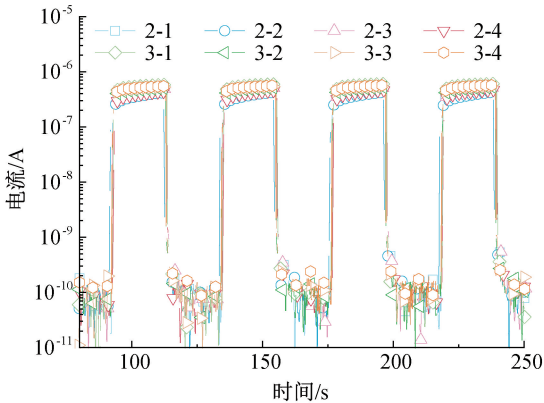




(a) 沉积薄膜上镀银电极及取样位置



(b) 外围位置探测器的 I-t 测试图



(c) 中间位置探测器的 I-t 测试图

图 6 制备的电极及对应位置的 I-t 测试图

表面等离子处理等工艺减少薄膜内部缺陷、改善表面态,以提高探测器的稳定性。

参考文献:

[1] Guo D, Guo Q, Chen Z, et al. Review of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based optoelectronic devices [J]. Materials Today Physics, 2019, 11(22): 100157.

[2] 王丹, 王晓丹, 马海, 等. Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 材料的掺杂研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(15): 306-312.

[3] 王江, 罗林保. 基于氧化镓日盲紫外光电探测器的研究进展 [J]. 中国激光, 2021, 48(11): 7-37.

[4] Zhang M L, Liu Z, Yang L L, et al.  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based power devices: A concise review [J]. Crystals, 2022, 12 (3): 406.

[5] Zhang J C, Dong P F, Dang K, et al. Ultra-wide bandgap semiconductor Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> power diodes [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 3900.

[6] Zheng Y X, Feng Z X, Bhuiyan A F M A U, et al. Large-size free-standing single-crystal  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> membranes fabricated by hydrogen implantation and lift-off [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2021, 9(19): 6180-6186.

[7] Park S Y, Ha M T, Kim K H, et al. Enhanced

thickness uniformity of large-scale  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> epilayers grown by vertical hot-wall mist chemical vapor deposition [J]. Ceramics International, 2022, 48(4): 5075-5082.

[8] Ciobanu V, Ceccone G, Jin I, et al. Large-sized nanocrystalline ultrathin  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> membranes fabricated by surface charge lithography [J]. Nanomaterials, 2022, 12(4): 689.

[9] 崔岁寒, 郭宇翔, 陈秋皓, 等. 高功率脉冲磁控溅射仿真技术研究进展 [J]. 中国表面工程, 2022, 35(5): 23-41.

[10] 乔阳阳, 刘明雪, 刘琼溪, 等. 磁控溅射技术在纺织领域的应用研究进展 [J]. 现代纺织技术, 2023, 31(2): 204-217.

[11] 杨富国, 陈晓娟, 北原晶子, 等. 中频磁控溅射镀膜技术的进展 [J]. 材料保护, 2020, 53(S1): 64-65.

[12] 朱国. 磁控溅射镀膜相关物理过程的多尺度模拟与实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019: 22-25.

[13] 陈长平, 余鹏程, 陈峰武, 等. 高靶材利用率高镀膜均匀性条形溅射靶的设计与实现 [J]. 中国集成电路, 2021, 30(7): 70-73.

[14] 王永清, 沈懿璇, 万真真, 等. 辉光放电磁控溅射靶材利用率和刻蚀均匀性方法研究与进展 [J]. 冶金分析, 2021, 41(8): 54-63.



[15] Mian M S, Nakano T, Okimura K. Improvement of the uniformity of structural and electrical properties of transparent conductive Al-doped ZnO thin films by inductively coupled plasma-assisted radio frequency magnetron sputtering [J]. Thin Solid Films, 2023, 769: 139752.

[16] 王誉,张茂彩,辛博,等. 直流磁控溅射膜厚分布实测与数值模拟研究[J]. 真空科学与技术学报, 2022, 42(1): 37-45.

[17] 付学成, 徐锦滨, 乌李瑛, 等. 小圆形平面靶倾斜磁控溅射镀膜均匀性研究[J]. 真空, 2021, 58(4): 1-5.

[18] 朱本铄, 裴鑫, 姜茜, 等. 基于 MATLAB 对 PP/PLA 复合材料薄膜均匀性评估方法[J]. 材料科学与工程学报, 2020, 38(1): 117-122.

[19] Mao L Y, Geng Y Q, Cao Y Z, et al. Uniform high-reflectivity silver film deposited by planar magnetron sputtering [J]. Vacuum, 2021, 185(12): 109999.

[20] Lim H, Kim D, Yeon Cha S, et al. Crystallization and bandgap variation of non-stoichiometric amorphous  $\text{Ga}_2\text{O}_{3-x}$  thin films during post-annealing process[J]. Applied Surface Science, 2022, 585(1): 152771.

[21] Liu H, Xu C X, Pan X H, et al. The photoluminescence properties of  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  thin films [J]. Journal of Electronic Materials, 2020, 49(8): 4544-4549.

[22] Tezel N S, Tezel F M, Kariper İ A. Surface and electro-optical properties of amorphous  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  thin films [J]. Applied Physics A, 2019, 125(3): 198.

(责任编辑:张会巍)