

# 离子束溅射沉积光学薄膜速率分布

汤雪飞 范正修 王之江

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

**提要** 本文应用高斯型离子束流强度分布计算了离子束溅射沉积光学薄膜的沉积速率分布, 结果表明, 沉积速率空间分布偏离余弦分布, 峰值位置随溅射离子束入射角改变并受离子束高斯半径的影响。实验结果与之相符。

**关键词** 薄膜, 离子束溅射沉积, 沉积速率分布

## Optical coating deposition rate distribution by ion beam sputtering

*Tang Xuefei, Fan Zhengxiu, Wang Zhijiang*

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

**Abstract** Deposition rate distribution of optical coating deposited by ion beam sputtering were calculated using Gaussian distribution of ion beam intensity. The results show that the deposition rate distribution deviates from that of the cosine distribution, the position of peak value depends on the incident angle and Gaussian radius of ion beam. The experimental results agree with the theoretical results perfectly.

**Key words** thin film, ion beam sputter deposition, deposition rate distribution

## 1 引言

离子束溅射沉积(IBSD)的光学薄膜具有高的吸附力和堆积密度, 低的散射和光学吸收, 及较少的杂质污染等<sup>[1~4]</sup>, 常用于高性能的光学系统。但离子束溅射沉积技术也有其局限性, 主要体现在低的沉积速率。提高沉积速率, 要求基板尽量靠近溅射靶, 这样做会减小符合均匀性要求的基板面积。为了在满足均匀性要求的前提下, 获得尽可能高的沉积速率, 离子束溅射沉积系统的优化设计变得尤其重要, 我们应依据离子束溅射沉积速率分布来合理安排离子源、溅射靶和基板。

离子束溅射沉积由于入射靶面的溅射离子强度并非均匀分布, 溅射区有一定的面积, 不能作为一点源或简单的面源来处理其沉积速率分布。本文应用高斯型离子束流强度分布计算了具有一定束斑的离子束以不同入射角溅射沉积的速率分布, 并通过离子束溅射金属 Zr 靶沉积 ZrO<sub>2</sub> 薄膜的实验加以比较验证, 为优化离子束溅射沉积系统的设计提供了有用的依据。

## 2 计算模型

基板上点  $S$  处的薄膜沉积速率分布是每一离子束元溅射靶原子在这一点上产生的速率的总和：

$$d(S) = \iint_{\text{target}} g(s,T) I_{(T)} dT \quad (1)$$

式中  $I_{(T)}$  是靶上  $T$  点的入射离子强度, 根据高斯型强度分布给出;  $g(s,T)$  是在  $T$  点单位入射离子强度下, 基板上  $S$  点处单位面积接收靶原子的溅射概率, 由余弦分布给出, 求解积分方程式(1)可得离子束溅射沉积的速率分布。

## 3 实验安排

图 1 是实验中的离子束溅射沉积示意图。使用  $\phi 100$  mm Kaufman 型宽束聚焦离子枪, 焦距  $L = 150$  mm, 焦斑半径  $r_0 = 20$  mm, 离子能量 1000 eV, 束流为 100 mA。基板架和离子枪保持固定, 靶面可绕  $y$  轴转动。基板位置是这样定的: 当离子束入射角  $\alpha = 45^\circ$  时, 基板架与靶面平行。 $\phi 20$  mm K<sub>9</sub> 玻璃基板的中心呈一直线放在基板架上, 与  $x$  和  $z$  轴在同一平面内, 这时基板中心的  $y$  坐标为 0。

为了考察不同入射角度下离子束溅射沉积速率分布, 进行了下列三组实验:

(1) 离子束入射角  $\alpha = 45^\circ$ , 这时靶面与基板平行, 靶面到基板的距离为 105 mm; (2) 在实验(1)的状态下绕  $y$  轴顺时针转动靶面  $10^\circ$ , 这时  $\alpha = 55^\circ$ ; (3) 在实验(1)状态下绕  $y$  轴逆时针转动靶面  $10^\circ$ , 这时  $\alpha = 35^\circ$  (靶面转动时坐标同时转动)。

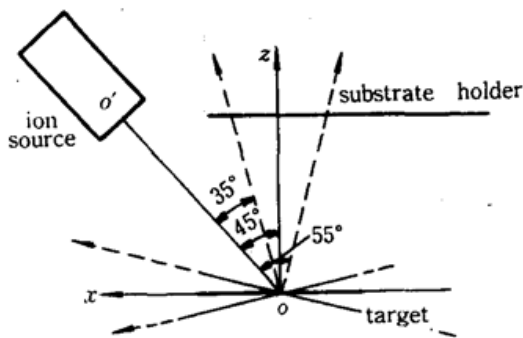


Fig. 1 Schematic configuration of IBSD experiment

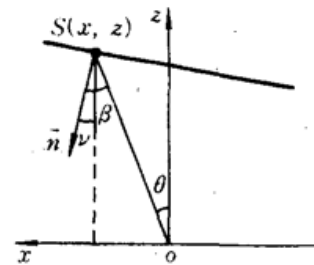


Fig. 2 Schematic for angle distribution calculation

我们使用金属 Zr 靶制备  $ZrO_2$  单层膜<sup>[4]</sup>, 沉积时间一小时。根据光谱仪绘出的薄膜透过率谱线计算薄膜光学厚度, 并算出沉积速率, 得到沉积速率平面分布  $d(x, z)$ 。根据基板中心的坐标  $(x, z)$ , 及基板平面与靶面的夹角  $\nu$ , 可以从沉积速率平面分布  $d(x, z)$  换算出沉积速率的角度分布  $d_0(\theta)$ , 如图 2 所示。 $S(x, z)$  是基板上一点, 沉积速率为  $d_0(x, z)$ ,  $\vec{n}$  为基板平面的方向矢量,  $\nu$  为  $\vec{n}$  与  $z$  轴的夹角, 这时,

$$\theta = \text{arctg}(x/z); \quad \beta = \theta + \nu; \quad l^2 = x^2 + z^2$$

$$\text{则} \quad d_0(\theta) = d(x, z) l^2 / \cos \beta \quad (2)$$

为了便于比较, 对理论计算结果和实验结果均作归一化处理。

## 4 结果与讨论

表 1, 表 2, 表 3 为离子束溅射入角度 ( $\alpha$ ) 分别为  $45^\circ, 55^\circ, 35^\circ$  时沉积速率分布的实验结

果,表中 $x$ 为基板中心在各自坐标系中 $x$ 轴坐标, $\theta$ 为基板中心位置矢量与 $z$ 轴的夹角; $d(x)$ 为基板平面 $x$ 方向的沉积速率分布, $d_0(\theta)$ 为换算得出的角度分布,两者均归一化处理。表中带“\*”号的基片号是由原始的沉积速率实验结果插值得出的极值点。

Table 1 Deposition rate distribution with  $\alpha = 45^\circ$

| Substrate                | 1            | 2           | 3*           | 4            | 5             | 6             | 7             | 8            | 9             | 10            |
|--------------------------|--------------|-------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| $x$ (mm)                 | 40           | 17          | -2           | -6           | -29           | -52           | -62           | -102         | -142          | -182          |
| Deposition rate (nm/min) | 11.00        | 13.08       | 13.60        | 13.50        | 12.39         | 10.05         | 8.19          | 4.79         | 2.61          | 1.43          |
| $d(x)$                   | 0.803        | 0.962       | 1.000        | 0.993        | 0.911         | 0.739         | 0.602         | 0.352        | 0.192         | 0.105         |
| $\theta$                 | $20.9^\circ$ | $9.2^\circ$ | $-1.1^\circ$ | $-3.3^\circ$ | $-15.4^\circ$ | $-26.3^\circ$ | $-30.6^\circ$ | $44.2^\circ$ | $-53.5^\circ$ | $-60.0^\circ$ |
| $d_0(\theta)$            | 0.953        | 0.969       | 0.969        | 0.967        | 0.986         | 0.995         | 0.913         | 0.924        | 0.885         | 0.815         |

Table 2 Deposition rate distribution with  $\alpha = 55^\circ$

| Substrate                | 1            | 2            | 3*          | 4            | 5             | 6             | 7             | 8             | 9             |
|--------------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $x$ (mm)                 | 42           | 18           | 10          | -4           | -25           | -47           | -68           | -88           | -108          |
| Deposition rate (nm/min) | 11.33        | 12.42        | 12.45       | 11.99        | 10.58         | 8.33          | 6.25          | 4.50          | 3.38          |
| $d(x)$                   | 0.910        | 0.998        | 1.000       | 0.963        | 0.850         | 0.669         | 0.502         | 0.361         | 0.272         |
| $\theta$                 | $23.3^\circ$ | $10.0^\circ$ | $5.5^\circ$ | $-2.2^\circ$ | $-12.9^\circ$ | $-22.5^\circ$ | $-30.2^\circ$ | $-36.1^\circ$ | $-41.0^\circ$ |
| $d_0(\theta)$            | 0.877        | 0.887        | 0.897       | 0.917        | 0.966         | 0.992         | 1.000         | 0.964         | 0.973         |

Table 3 Deposition rate distribution with  $\alpha = 35^\circ$

| Substrate                | 1            | 2            | 3             | 4              | 5             | 6             |
|--------------------------|--------------|--------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
| $x$ (mm)                 | 20.5         | -2.5         | -18.0         | -25.5          | -48.5         | 71.5          |
| Deposition rate (nm/min) | 8.91         | 10.42        | 10.65         | 10.58          | 9.08          | 7.08          |
| $d(x)$                   | 0.837        | 0.978        | 1.000         | 0.993          | 0.853         | 0.665         |
| $\theta$                 | $10.7^\circ$ | $-1.4^\circ$ | $-10.0^\circ$ | $-14.24^\circ$ | $-26.7^\circ$ | $-37.7^\circ$ |
| $d_0(\theta)$            | 0.998        | 0.988        | 0.977         | 0.978          | 0.948         | 0.937         |

图 3 为  $\alpha = 45^\circ$  时沉积速率在基板平面上的分布。图中“ $\Delta$ ”表示根据表 1 ~ 3 数据绘制的实验点,实线是在实际离子束焦斑  $r_0 = 20$  mm 时的理论计算曲线,虚线是取  $r_0 = 0$  时的理论计算曲线。

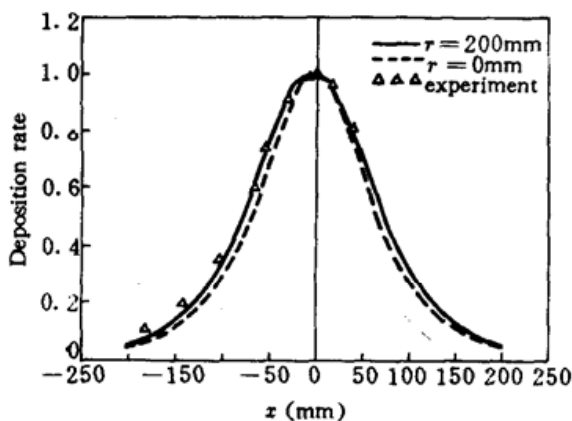


Fig. 3 Deposition rate distribution with  $\alpha = 45^\circ$

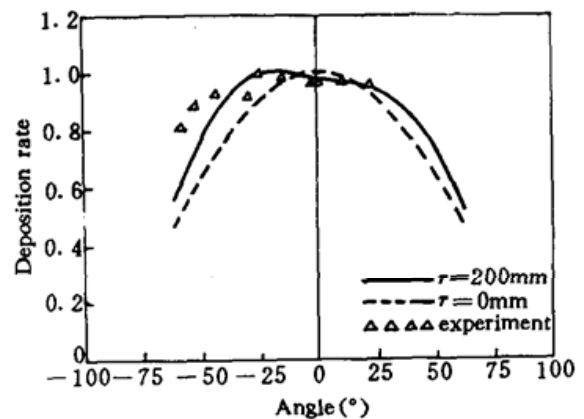


Fig. 4 Angle distribution of deposition rate with  $\alpha = 45^\circ$

图 4 为  $\alpha = 45^\circ$  时沉积速率空间角度分布。图 5 为  $\alpha = 45^\circ$  时沉积速率在基板平面的分布图。

从图中可以看出,  $r_0 = 20 \text{ mm}$  时的理论计算结果与  $r_0 = 0$  时的理论计算结果相比有较大的偏差。角度分布的结果尤其明显。当  $r_0 = 0$  时沉积速率的角度分布为标准余弦分布, 这是把溅射靶源作为点源处理的结果, 这时角度分布与溅射入射角  $\alpha$  无关, 极大值在  $\theta = 0^\circ$  处。当  $r_0 = 20 \text{ mm}$  时, 角度分布的理论计算结果偏离了余弦分布, 与溅射入射角  $\alpha$  有关。极值点的分布发生了变化,  $\alpha = 45^\circ$  时,  $\theta_{\max} = -18.9^\circ$ ,  $\alpha = 55^\circ$  时,  $\theta_{\max} = -24.5^\circ$ ,  $\alpha = 35^\circ$  时,  $\theta_{\max} = 4.3^\circ$ , 随着  $\alpha$  角的增大, 极值点角度偏离靶面法线方向, 朝入射角度的镜面反射角方向偏移。

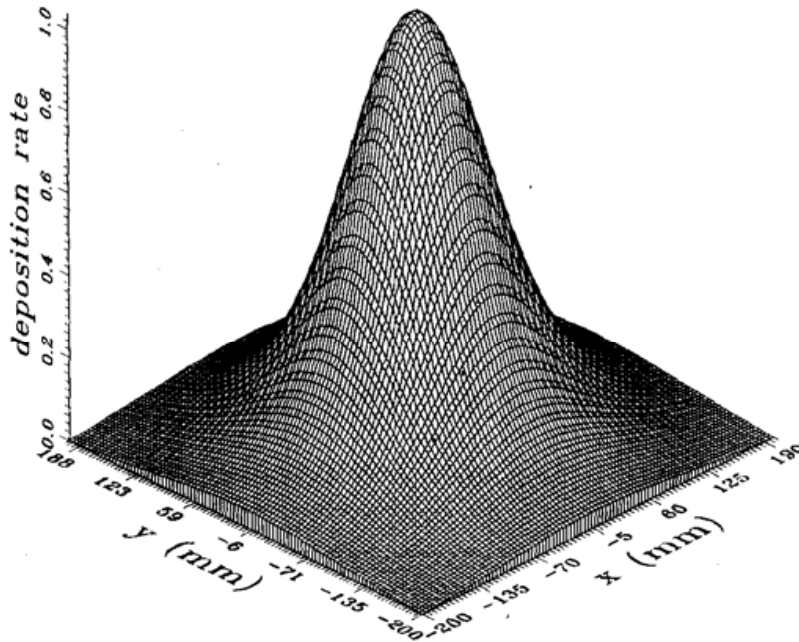


Fig. 5 Deposition rate distribution on substrate plane with  $\alpha = 45^\circ$

从图中可以看出, 在与靶面法线夹角较小 ( $< 30^\circ$ ) 的情况下, 实验结果与理论结果吻合得很好, 当角度接近溅射入射角的镜面反射角时, 由于溅射镜面的反射, 溅射原子的概率分布偏离了余弦分布, 使理论结果与实验结果有所偏离。另外这时实验沉积的膜片膜厚较薄, 容易产生测量误差。实验证明, 根据实际离子源参数 (焦距、焦斑半径、入射角), 用高斯型离子束强度分布计算的离子束溅射沉积分布与实际结果相符, 可用于薄膜均匀性计算和离子束溅射沉积系统设计。

以上的三组实验, 是离子源和基板架固定, 转动靶面下进行的, 从实验结果和计算结果均可看出, 当  $\alpha$  角从  $35^\circ$  转动  $55^\circ$  时, 空间角度分布的极值点从  $4.3^\circ$  变化到  $-24.5^\circ$ , 平面分布  $d(x)$  的极值点也从  $-16 \text{ mm}$  变化到  $12 \text{ mm}$ 。在实际应用中, 我们可以在基板转动的同时, 绕  $y$  轴来回转动靶面, 使沉积速率极值点在基板上一定范围内振荡, 将有助于均匀性的改善。

### 参 考 文 献

- 1 J. M. E. Harper, Ion beam deposition in thin film process, J. L. Vossen, W. Kern, eds, Academic Press, 1978, 1
- 2 H. R. Kaufman, *J. Vac. Sci. Technol.*, A4, 764(1986)
- 3 J. Backer et al., *SPIE*, 1019, Thin Film Technologies (3), 32(1988)
- 4 Tang Xuefei et al., *SPIE*, 1519, International Conference on Thin Film Physics and Applications, 96(1991)