小靶大基片镀膜的膜厚均匀性分析

陈海峰，薛莹洁

（陕西科技大学 机电工程学院，西安 710021）

摘 要：目的 通过改变传统基片与靶材的相对运动方式，来实现小靶材在大面积基片上的均匀镀膜。**方法** 采用基片绕中心轴做匀速旋转运动，靶材沿着基片半径做直线间歇运动，并建立了相应的理论模型，通过数值分析软件 MATLAB 对膜厚进行分析拟合，研究靶基距、偏心距、靶材运动方式对膜层均匀度的影响。**结果** 在靶基距 H=30 mm 时，膜厚均匀性主要受到两个重要参数的影响：靶材在各径向运动等距点的停顿时间 T 和移动步长 d。与靶材在各径向运动等距点的停顿时间 T=C（C 为常数）的情况相比，当靶材的停顿时间 T 与其在基片上的覆盖面积 A 成正比增加时，膜厚的均匀性得到极大的改善。同时，膜厚的均匀性很大程度上取决于靶材的移动步长，膜层之间的差异性随着移动步长的减小而减小，结果显示当移动步长 d=5 mm 时的膜厚均匀性最佳。改善基片中心附近的膜厚分布可以通过增加靶基距来实现，结果显示在偏心距 e=0 mm、靶基距 $H\geqslant$70 mm 时，膜厚相对偏差 δ 均小于 0.1。**结论** 该方法改变了传统靶材固定不动的方式，在薄膜沉积过程中，通过调节靶材的移动步长和停顿时间，能有效减小膜层之间的差异，从而获得均匀度较高的薄膜，对实际生产具有指导意义。

关键词：磁控溅射；沉积速率；理论模型；膜厚均匀性；停顿时间；移动步长

中图分类号：TG174.442 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2017)02-0108-05

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.02.017

Film Thickness Uniformity of a Small-target Large-substrate Coating

CHEN Hai-feng, XUE Ying-jie

(School of Mechanic and Electronic Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi′an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to produce more uniform film in large substrate deposited with a small target by changing the relative motion between target and traditional substrate. With the substrate rotated at a constant speed around the center shaft, the target performed rectilinear intermittent motion along the substrate radius and relevant theoretical model was set up, then numerical analysis software MATLAB was used to analyze and fit film thickness and study the effects of target-to-substrate distance, eccentric distance and target motion mode on film uniformity. When the target-to-substrate distance H=30 mm, the film thickness uniformity was affected by two important parameters: target dwell time T and moving step size d of the target at each equidistant point of radial motion. Compared with the target dwell time T=C (C is a constant), the film thickness uniformity increased significantly when target dwell time T changed in direct proportion to the target cover area on the rotating substrate. Meanwhile, the film thickness uniformity depended on moving step size of the target, the deviation between each film gradually reduced as the target moving step decreased, the results showed that the film uniformity was the best when the target moving step size d was 5 mm. The distribution of film thickness near the center of substrate could be improved by increasing the target-to-substrate distance, the relative deviation of film thickness δ was less than 0.1 with eccentric distance e=0 mm and target-to-substrate distance $H\geqslant$70. By changing the traditional coating process with a stationary target and a rotary substrate, this

收稿日期：2016-07-14；修订日期：2016-10-15

Received：2016-07-14；**Revised**：2016-10-15

作者简介：陈海峰（1964—），男，博士，教授，主要研究方向为材料加工工程。

Biography：CHEN Hai-feng(1964—), Male, Doctor, Professor, Research focus: materials processing engineering.

new method is applicable to large substrate coating, which can realize higher uniformity and fewer differences between each layer of the film by adjusting moving step size and dwell time of the target during the process of film deposition. All the conclusions are of guiding significance to actual industrial production.

KEY WORDS: magnetron sputtering; deposition rate; theoretical model; film thickness uniformity; dwell time; moving step size

在真空镀膜中，膜厚的均匀性直接影响镀膜设备的性能，一般情况下都要求镀膜面内的膜厚分布尽可能均匀一致，即薄膜具有较好的均匀性[1]。针对磁控溅射镀膜而言，其具有较高的沉积速度、较低的制造成本以及适用于难熔金属以及化合物等优点，因此被广泛地应用于各个领域，尤其是在大面积基片镀膜中发挥着不可替代的作用。为了在大面积基片上得到均匀的膜层，近年来很多学者提出了不同的方法和思路，如合理的电场与磁场设计，优化靶材的机械结构，增加挡板机构等[2—5]。

在传统的镀膜工艺中，常采用靶材固定、基片自转或公自转的方式来提高膜厚的均匀性[6—8]，这种方法仅适用于基片相对较小的情况，针对大面积的基片，本文提出了一种新的镀膜方法，采用靶材间歇运动、基片自转的方式来实现大面积基片的均匀镀膜。

1　厚度分布理论模型

图 1 为平面磁控溅射示意图[9]，其中靶材表面和基片相对平行，H 为靶面到基片的距离，e 为基片自转中心轴与靶中心法线的偏心距离，r 为靶面小面元 dB 距靶中心的距离，其中 r_1 和 r_2 所围成的圆环区域为靶材刻蚀区，R 为从靶面小面元 dB 溅射到基板上的一点 Q 到基片中心的距离，S 为 dB 与点 Q 之间的距离，γ 为溅射角。靶面面元 dB 的极角为 α，基片面元 dA 的极角为 β，面元 dA 与面元 dB 在基片上投影 dB'的直线距离为 L。本模型设定的基片形状为圆形，在实际镀膜过程中，基片可以为任意不规则平面，可以看作是以基片最长边为直径、最长边的中心为圆心的圆平面[10]。

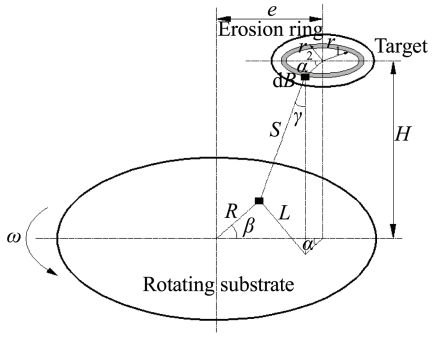


图 1　平面磁控溅射示意

Fig.1 Schematic diagram of planar magnetron sputtering

由图 1 所示的几何关系，各参数之间的数学关系可表示为：

$$S^2 = H^2 + L^2 = H^2 + (e - R\cos\beta - r\cos\alpha)^2 + (R\sin\beta + r\sin\alpha)^2 \tag{1}$$

$$\cos\gamma = H / S \tag{2}$$

在大多数情况下，磁控溅射过程的粒子入射能量较小且镀膜环境的真空度较高，为了简化计算模型，需要对圆平面磁控溅射系统做以下假设[11—12]：

1）靶材为平面小圆靶且与基片相对平行，靶材的刻蚀区域为圆环带，其内外径分别为 r_1 和 r_2，假设所有的溅射粒子均来自该刻蚀区域，在该区域内靶材受到入射离子的均匀溅蚀。

2）靶材刻蚀区域附近的磁场很强，因此大量的二次电子在电磁场的作用下被限制在该区域内做摆线运动，使大量惰性气体发生离化，粒子垂直入射靶材表面发生强烈溅射。

3）因为溅射原子质量相对氩气较大，因此认为两者碰撞不会使溅射原子方向发生偏移[13]。通常情况下认为被溅射出的薄膜原子飞溅到基片上后直接参与成膜，不发生扩散或移动，其角分布规律满足简单的余弦分布，用 $\cos^n\gamma$ 表示。

4）靶面被溅射出的粒子在从靶面飞向基片的过程中受到气体分子的影响会发生散射，其沉积在基片上的概率与路径 S 成反比。

基于以上四条假设，从靶面小面元 dB 溅射到基片上 Q 点的薄膜沉积速率为：

$$\mathrm{d}v = \frac{m(n+1)\cos^n\gamma}{2\pi\rho S} \tag{3}$$

式中：m 和 ρ 分别为薄膜粒子的质量和密度；n 为角分布系数。基片绕着中心轴做旋转运动，假设溅射时间足够长且靶材在 r_1、r_2 内被均匀刻蚀，则薄膜的沉积速率可以表示为：

$$v = \int_0^{2\pi}\int_0^{2\pi}\int_{r_1}^{r_2} \frac{m(n+1)H^{n+1}r}{2\pi\rho S^{n+1}}\mathrm{d}\alpha\mathrm{d}\beta\mathrm{d}r \tag{4}$$

其中，m 和 ρ 都是常数且对结果影响不大，故不予考虑[14]。为了便于对比，取溅射环的内径为外径的一半，并分析溅射原子满足余弦分布（n=1）时的沉积速率以及薄膜厚度分布情况，将公式(1)—(2)带入简化后的薄膜沉积速率表达式(4)中，可得：

$$v = \frac{H^2}{\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^{2\pi}\int_{r_1}^{r_2} \frac{r}{H^2 + (e - R\cos\beta - r\cos\alpha)^2 + (R\sin\beta + r\sin\alpha)^2}\mathrm{d}\alpha\mathrm{d}\beta\mathrm{d}r \tag{5}$$

2　靶材和基片运动方式的确定

为了得到大面积均匀性较好的薄膜，图 2 为靶材和基片的相对运动方式，其中基片做匀速旋转运动，靶材沿着基片半径做间歇运动[10]，P_1、P_2、P_3…为径向运动等距点，间距为 d，靶材中心点依次与 P 点重合，停留时间为 T，假设靶材停留在图 2 所示位置 P_3 点，则靶材停留时间为 T_3，在基片上扫描过的面积为 A_3，则基片上每一环带的膜厚 t 分布如式（6）所示，其中 i 为正整数。

$$t_i = v_i T_i \tag{6}$$

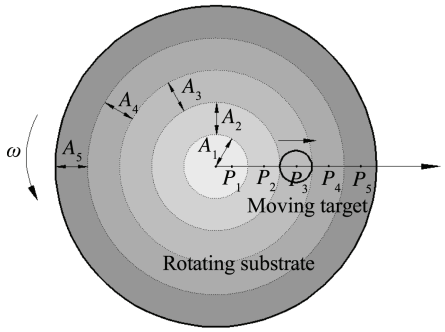


图 2　靶材和基片的相对运动方式

Fig.2 The relevant movement between target and substrate

由公式（5）可知，薄膜的沉积速率与刻蚀环外径 r_2 有很大关系，取基片直径ϕ300 mm，刻蚀环外径 r_2=10 mm。为了便于比较，取刻蚀环内径 r_1 为外径的一半，并研究相对沉积速率分布与靶基距 H 和偏心距 e 的关系[15—16]，将薄膜沉积速率方程导入 MATLAB 中，模拟结果如图 3 和图 4 所示。当靶材中心轴与基片中心轴重合（e=0 mm）时，在一定范围内，膜厚的均匀性随着靶基距 H 的增大而变好，但膜层厚度和薄膜沉积速率均减小，为了保证膜厚的均匀性以及正常的沉积速率，本文取 H=30 mm 来研究薄膜的均匀性。图 4 为靶基距 H=30 mm 时，偏心距 e 与薄膜沉积速率的关系，可知随着偏心距 e 的增

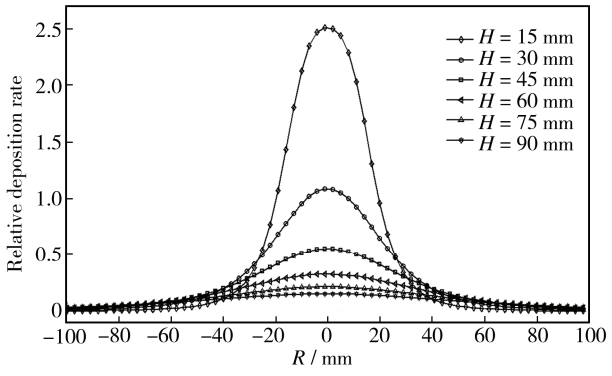


图 3　靶基距 H 与薄膜沉积速率的关系(e=0 mm)

Fig.3 Film deposition rate with different target-to-substrate vertical distance H at e=0 mm

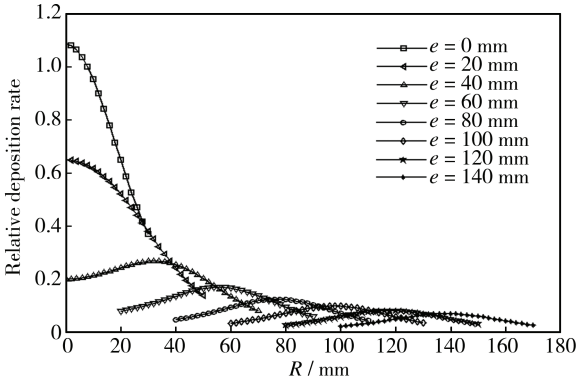


图 4　偏心距 e 与薄膜沉积速率的关系（H=30 mm）

Fig.4 Film deposition rate with different eccentric distance e at H=30 mm.

加，薄膜沉积速率整体呈下降趋势，也可以表示为靶材在每一个径向运动等距点 P_i 处的停留时间 T_i 恒定时的膜厚分布情况。

当靶材在每一径向运动等距点的停顿时间相同时，即 T_1:T_2:T_3…=1:1:1…，基片上薄膜的相对膜厚如图 5 曲线 b 所示，薄膜厚度随偏心距 e 的增加呈递减趋势，由几何关系可知，为了在整个基片上得到均匀性较好的薄膜，就要使每一环带上的膜厚变化尽可能减小，即保证固定靶材沉积功率不变的情况下，靶材所在每一环带的基片自转速率相对于靶材恒定，即靶材在各径向运动等距点停留时间 T 和扫描面积 A 之间的关系可表示为 T_1:T_2:T_3…=A_1:A_2:A_3…，为了与优化前的曲线做比较，相应的基片转速 ω 也增加为原来的 4 倍，如图 5 曲线 a 所示，当基片半径大于 20 mm 后，基片上各环带上的薄膜厚度差异明显减小，随着偏心距 e 的增加呈水平分布。

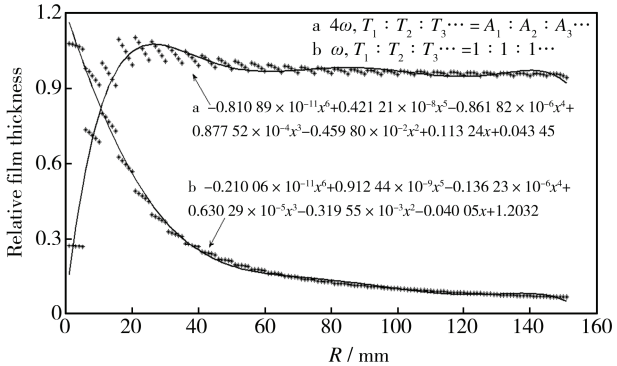


图 5　靶材在径向运动等距点距离 d=5 mm 下的薄膜厚度分布（i 为正整数）

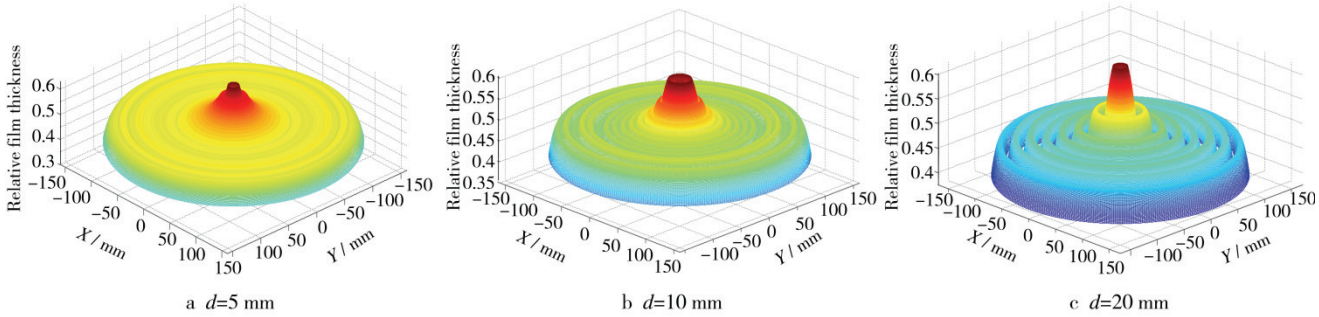
Fig.5 Film thickness distribution with different target moving step at d=5mm (i *positive integer*)

3　膜厚分布模拟

通过以上分析可知，当靶材在每个径向运动等距点的停留时间 T_i 相同时，薄膜的沉积速率 v 随着偏心距 e 的增加而逐渐减小，薄膜厚度分布情况较差。当

T_i 和 A_i 成比例增加时，则靶材所在每一环带的基片的自转速率相对于靶材恒定，此时，薄膜厚度分布取决于径向运动等距点 P_i 的间距 d，取 d=5、10、20 mm 进行膜厚仿真，模拟结果如图 6 所示。

由模拟结果可看出，径向运动等距点的间距 d 对基片膜厚均匀性具有很大的影响，当 d=20 mm 时，膜厚的分布情况最差，且各环带膜厚呈现中间厚边缘薄的特点，这是由于间距 d 较大使各环带内的膜厚呈现明显差异，厚度波动较大，如图 6 所示，在固定环带内，膜厚呈现由中心向边缘递减的趋势。随着间距 d 的减小，膜厚均匀性有很大的改善，当 d=5 mm 时，膜厚的均匀性最好，如图 6a 所示。模拟结果表明：随着径向运动等距点间距 d 的减小，薄膜厚度分布的均匀性逐渐增加。



a d=5 mm　　b d=10 mm　　c d=20 mm

图 6　径向运动等距点间距分别为 5、10、20 mm 时的膜厚分布

Fig.6 The film thickness distribution with different target moving step at d=5, 10, 20 mm

4　膜厚分布优化

由以上分析结果可知，当基片面积足够大时，能获得大面积的均匀薄膜，但是当基片面积较小时，薄膜的均匀性并不理想，离中心较近的膜层厚度分布的波动较大，因此该方法并不适用于基片面积较小时的情况。针对基片中心附近膜厚分布不均匀的状况，需要采取其他方式进行优化。如图 3 为偏心距 e=0 mm 时不同靶基距 H 对薄膜沉积速率的影响，可知随着靶基距的增加，薄膜速度分布曲线呈现由中心向边缘递减的趋势，但均匀性逐渐变好。针对上述基片在[−20，20]区间内的膜厚分布不均，可以采取传统的调节靶基距的方式来增加薄膜的均匀性，则相对膜厚偏差 δ 可以用式（7）来描述：

$$\delta=\frac{|v_i-\bar{v}_i|}{\bar{v}_i},R\in[-20,20] \tag{7}$$

式中：i 为正整数。图 7 为不同靶基距下的相对膜厚偏差，可知在小范围区间内，随着靶基距的增加，薄膜的沉积速率分布有较大的改善，当靶基距 H 大于 70 mm 后，膜厚相对偏差均在 0.1 以下，在实际应用中，可以根据不同的膜厚均匀性要求来选择合适的靶基距[17]。膜厚相对偏差 δ 在不同靶基距下的三维分布见图 8，由曲面分布图可明显看出，当靶基距较小时，膜厚相对偏差的波动较大，随着半径的增加先减小后增大，随着靶基距的增加，膜厚相对偏差沿半径方向趋于平坦。

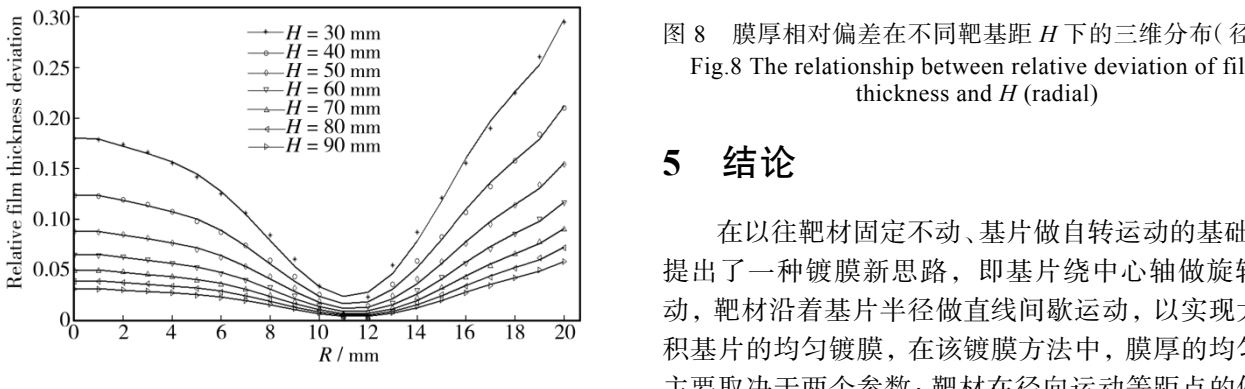


图 7　不同靶基距 H 下的膜厚相对偏差（径向）

Fig.7 The relative deviation of film thickness with different H (radial)

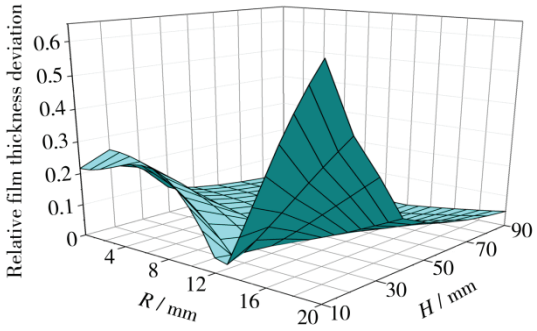


图 8　膜厚相对偏差在不同靶基距 H 下的三维分布（径向）

Fig.8 The relationship between relative deviation of film thickness and H (radial)

5　结论

在以往靶材固定不动、基片做自转运动的基础上，提出了一种镀膜新思路，即基片绕中心轴做旋转运动，靶材沿着基片半径做直线间歇运动，以实现大面积基片的均匀镀膜，在该镀膜方法中，膜厚的均匀性主要取决于两个参数：靶材在径向运动等距点的停留时间 T 和径向运动等距点的间距 d。结合模拟结果，可得出以下结论：

1）当偏心距 e=0 mm 时，薄膜的沉积速率 v 随着靶基距 H 的增加逐渐减小，但膜厚的均匀性有所改善；当靶基距 H=30 mm 时，随着偏心距 e 的增加，薄膜沉积速率 v 整体减小，在每一区间内的薄膜沉积速率曲线呈现由中心到边缘递减的趋势。

2）若靶材在各径向运动等距点的停顿时间 T_i 是影响薄膜厚度分布的重要因素，当 T_i 为一恒定值时，膜厚随着偏心距 e 的增加呈递减趋势，膜厚分布较差；当 T_i 随着靶材在基片上的覆盖面积 A_i 成比例增加时，膜厚随着偏心距 e 的增加逐渐趋于稳定，其均匀性得到很大的改善。

3）当靶停顿时间 T_i 随其在旋转基片上的覆盖面积 A_i 成比例增加时，影响薄膜厚度分布的主要因素取决于径向运动等距点的间距 d，当 d 的取值较大时，各区间的膜厚值波动较大，区间内的膜厚呈现中间厚，边缘薄的特点，随着 d 的减小，膜厚均匀性得以改善，并在 d=5 mm 时的效果最佳。

对于基片面积较大的情况，运用该方法可以得到均匀性较好的薄膜，但针对基片中心附近膜厚值波动较大的情况，采取传统的调整靶基距的方法能方便有效地实现膜厚均匀分布，以上结论对实际生产具有指导意义。

参考文献

[1] 于贺, 吴志明, 王涛. 平面磁控溅射薄膜厚度均匀性的研究概述[J]. 真空, 2010(3): 9—15.
YU He, WU Zhi-ming, WANG Tao. A Survey of Thickness Uniformity of Thin Films Deposited by Planar Magnetron Sputtering Process[J].Vacuum, 2010(3): 9—15.

[2] 董宏奎, 赵建华, 林日乐, 等. 薄膜均匀性的分析研究[J]. 压电与声光, 2006(5): 578—580.
DONG Hong-kui, ZHAO Jian-hua, LIN Ri-le, et al. Study and Analysis on the Film Uniformity[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2006(5): 578—580.

[3] 朱琳, 王金武, 刘壮, 等. PP 基材表面磁控共溅射制备新型阻隔薄膜的研究[J]. 包装工程, 2015, 36(9): 73—76.
ZHU Lin, WANG Jin-wu, LIU Zhuang, et al. Preparation of Novel Composite Barrier Films by Magnetron Co-sputtering on PP Substrate[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(9): 73—76.

[4] 宋青竹, 张以忱, 孙足来, 等. 磁控溅射镀膜膜厚均匀性设计方法[J]. 真空, 2010(6): 6—9.
SONG Qing-zhu, ZHAN Yi-chen, SUN Zu-lai, et al. Design Method for the Thickness Uniformity of Thin Films Deposited by Magnetron Sputtering Process[J].Vacuum, 2010(6): 6—9.

[5] 方明, 郑伟军, 吴明, 等. 平面行星夹具均匀性修正挡板设计方法研究[J]. 真空科学与技术学报, 2006(4): 286—289.
FANG Ming, ZHENG Wei-jun, WU Ming, et al. Improved Design of Uniformity Mask for Flat Planetary Fixture [J].Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2006(4): 286—289.

[6] 张以忱.真空镀膜设备[M].北京: 冶金工业出版社, 2015.
ZHANG Yi-chen. The Equipment of Vacuum Coating[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015.

[7] 高士铁. 小靶大基片多工位磁控溅射镀膜膜厚均匀性研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
GAO Shi-tie. Research of Film Uniformity on Small Target and Large Substrate by Magnetron Sputtering with Multi-workbench[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.

[8] FU C L, YANG C R, HAN L G, et al. The Thickness Uniformity of Films Deposited by Magnetron Sputtering with Rotation and Revolution[J]. Surface & Coating Technology, 2006, 200: 3678—3689.

[9] MENG X Q , FAN X J, GUO H X. A New Formula on the Thickness of Films Deposited by Planar Cylindrical Magnetron Sputtering[J]. Thin Solid Films, 1998, 335: 279—283.

[10] 金扬利, 邱阳, 赵华, 等. 小靶材实现大平面基片均匀性膜层沉积的方法[J]. 真空, 2014(3): 30—32.
JIN Yang-li, QIU Yang, ZHAO Hua, et al. Deposition Method of Uniform Film on Large Substrate by Lesser Target[J]. Vacuum, 2014(3): 30—32.

[11] FAN Q H, CHEN X H, ZHANG Y. Computer Simulation of Film Thickness Distribution in Symmetrical Magnet Magnetron Sputtering[J]. Vaccum, 1995, 46(3): 229—232.

[12] SWANN S. Film Thickness Distribution in Magnet on Sputtering[J]. Vacuum, 1988, 38(8—10): 791—794.

[13] 范正修, 薛松生, 何朝玲. 磁控溅射薄膜的厚度分布[J]. 应用科学学报, 1993, 11(2): 136—139.
FAN Zheng-xiu, XUE Song-sheng, HE Chao-ling. The Thickness Distribution of Thin Film Deposited with Magnetro-sputtering[J]. Journal of Applied Sciences, 1993, 11(2): 136—140.

[14] 张以忱, 高士铁, 陈旺. 小圆平面靶磁控溅射镀膜均匀性研究[J]. 真空, 2010, 47(2): 21—26.
ZHANG Yi-chen, GAO Shi-tie, CHEN Wang. On the Film Thickness Uniformity via Magnetron Sputtering with Small Circular Plane Target[J]. Vacuum, 2010, 47(2): 21—26.

[15] 杜晓松, 李杰, 蒋亚东. 离轴溅射法中最佳几何参量的预测[J]. 真空, 2007, 44(3): 5—8.
DU Xiao-song, LI Jie, JIANG Ya-dong, et al. Prediction on the Optimal Geometry for Off-axis Sputtering Process [J]. Vacuum, 2007, 44(3): 5—8.

[16] 徐均琪, 易红伟, 蔡长龙, 等. 磁控溅射膜厚均匀性与靶-基距关系的研究[J]. 真空, 2004(2): 25—28.
XU Jun-qi, YI Hong-wei, CAI Chang-long, et al. Relationship between Target-substrate Distance and Thickness Uniformity of Films Deposited by Magnetron Sputtering [J].Vacuum, 2004(2): 25—28.

[17] 惠迎雪, 杭凌侠, 徐均琪, 等. 不同磁控溅射模式膜厚均匀性研究[J]. 西安工业学院学报, 2003, 23(1): 32—36.
HUI Ying-xue, HANG Ling-xia, XU Jun-qi, et al. Study on the Thickness Uniformity of Films Deposited by Magnetron Sputtering or Unbalanced Magnetron Sputtering[J]. Journal of Xi′an Institute of Technology, 2003, 23(1): 32—36.