

文章编号: 1005-5630(2011)01-0078-05

靶材刻蚀对磁控溅射镀膜厚度分布的影响*

张勇喜, 金秀, 胡雯雯, 宋姝, 张玲玲, 张岳

(沈阳仪表科学研究院 汇博光学技术公司, 辽宁 沈阳 110043)

摘要: 为考察实际磁控溅射镀膜生产过程中由于靶材不断刻蚀消耗而造成的膜厚分布变化, 文中就圆形磁控溅射靶建立了沉积模型, 采用泰勒级数展开方式得到了薄膜分布的三阶近似解, 并采用数值积分的方法计算出不同溅射角分布和靶基距时新靶和旧靶的相对厚度分布。计算结果表明溅射角分布的变化对膜厚分布影响较小, 而靶基距变化影响较大; 随着靶基距增加, 旧靶材与新靶材的膜厚分布差距逐步减小。为验证计算结果, 对新靶材和旧靶材进行了简单实验, 实验结果与计算结果相符。

关键词: 磁控溅射; 膜厚分布; 数值积分; 泰勒级数

中图分类号: O 484.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2011.01.018

Influence of target erosion on film distribution in magnetron sputtering process

ZHANG Yongxi, JIN Xiu, HU Wenwen, SONG Shu, ZHANG Lingling, ZHANG Yue

(HB Optical Technology Co., Ltd., Shenyang Academy of Instrumentation Science, Shenyang 110043, China)

Abstract: To investigate how film thickness distribution is changed when target etched continuously in magnetron sputtering process, a deposition model is found for circular magnetron sputtering target, which is applied in manufacturing. Taylor series expansion is adopted to calculate a third order approximate solution for film thickness distribution. And numerical integration method is applied to calculate film distribution for both new and etched target with different angular distribution of sputtering and target-substrate distance. The calculate results show that sputtering angle has minor effect on film thickness distribution; oppositely, target-substrate distance has great impact on this. With the target substrate distance increases, the differences of film thickness distribution between new and etched target is reduced gradually. To verify this results, a experiment is carried out correspondly, which shows the same results to the calculating ones.

Key words: magnetron sputtering; film thickness distribution; numerical integration; Taylor's series

引言

在各种薄膜制备方法中, 溅射具有膜层质量好, 镀膜速度稳定的优点, 因而近年来被逐步用于镀制高精密薄膜。此外, 溅射还具有膜料装载充足, 膜料利用率高的优点, 在大面积薄膜镀制上也被广泛使用。之前许多人的研究证实, 溅射镀膜的均匀性受到磁场、真空度、充气、靶基距等众多因素的影响^[1-4]。但是这些研

* 收稿日期: 2010-08-13

作者简介: 张勇喜(1977-), 男, 江西南丰人, 工程师, 工程硕士, 主要从事光学薄膜方面的研究。

究都是基于均匀溅射和平面靶材的条件,而实际生产过程中靶材在不断被刻蚀,形貌发生较大变化,而靶材形貌的变化很有可能造成薄膜分布的变化。为获得均匀分布的薄膜,常采用修正挡板以获得更大的均匀区。对于电子枪蒸发源或电阻蒸发源,其蒸发状态可以做得很稳定,修正挡板一般不用修改或更换。对于溅射镀膜,如果在整个靶材使用过程中膜厚分布在不断变化,那么均匀性修正手段也需要随之调整,这将严重影响生产。现就靶材刻蚀对磁控溅射镀膜厚度分布的影响进行理论和实践研究。

1 模型建立

文中以圆形溅射靶为研究对象。在实际生产中,靶材不断被刻蚀,表面形貌发生变化,因此,基于以下条件建立物理模型。

(1) 靶面各点的溅射特性呈轴心对称,即靶上某点的溅射量 m 只是该点所处半径 r 的函数。

(2) 溅射粒子垂直入射,靶材形貌的变化不改变溅射状态,即虽然靶材形貌发生变化,但溅射状态与新靶(平面靶)相同,形貌的变化只改变靶上各点到基片的距离。

(3) 靶面任意点看作一面源,溅射出的薄膜原子离开靶表面的角分布为简单的余弦分布^[5],即 $\cos^N\theta$ 。

(4) 由于磁控溅射过程需要不断充入工作气体,溅射出的靶材原子与气体原子存在一定的碰撞,即靶材原子会被散射掉一部分。由于磁控溅射的工作气压一般为 $0.1\sim 2\text{Pa}$,气体较稀薄,所以散射的影响为:膜层原子沉积到基片上的概率与其路径成反比^[6,7]。

(5) 靶上某点的溅射量与该点实际刻蚀深度成正比。

(6) 基片与靶面平行,且轴心相同。

如图1,根据假定条件6,溅射靶和基片都是轴心对称的,那么只需计算基片 X 正半轴上各点的薄膜厚度便可得到镀膜的均匀性情况。积分和有限元法^[8]常用于推算膜厚分布,现采用常规的积分法。

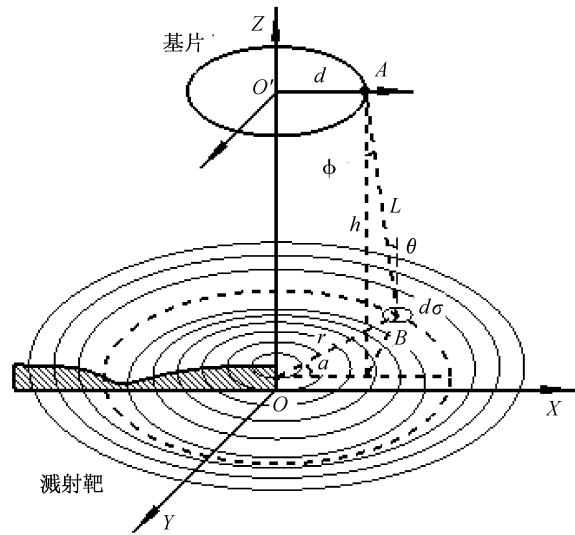


图1 圆形靶溅射示意图

Fig. 1 Magnetron sputtering of circular target

2 理论分析

根据假定条件(3)和(4),基片 X 轴上 A 点(A 点到基片中心的距离为 d)接受靶上 B 点的镀膜厚度^[9]为:

$$t_s = \frac{m \cos \phi \cdot \cos^N \theta}{\pi \mu L^2} \cdot \frac{1}{L} \quad (1)$$

式(1)中, m 为 B 点溅射率, μ 为膜层密度; L 为 A 点到 B 点的直线距离, α 为 B 点到圆心的连线与 X 轴的夹角, θ 为溅射面源法线与溅射镀膜方向的夹角, ϕ 为基片法线与镀膜方向的夹角。根据图1, h 为 A 点到 B 点的垂直高度,再根据假定条件(6),那么有: $\theta = \phi = h/L$, $L^2 = h^2 + r^2 + d^2 - 2rd \cos \alpha$ 。

假定 B 点所在的面元 $d\sigma (= r dr d\alpha)$ 与 B 点具有相同溅射特性,那么 A 点的厚度为:

$$t = t_s \cdot d\sigma = \frac{m}{\pi \mu L^3} \cdot \frac{h}{L} \cdot \left(\frac{h}{L}\right) \cdot d\sigma = \frac{mh^{N+1}r}{\pi \mu L^{N+4}} \cdot dr d\alpha \quad (2)$$

假设溅射靶的半径为 R ,而靶各点的溅射特性是轴心对称的,那么,对整个靶面进行积分,可得到 A 点的总厚度 T 。

$$\begin{aligned} T &= \iint \frac{mh^{N+1}}{\pi \mu L^{N+4}} \cdot r dr d\alpha = \frac{1}{\pi \mu} \int_0^R \int_0^{2\pi} \frac{mh^{N+1} r dr d\alpha}{(h^2 + r^2 + d^2 + 2rd \cos \theta)^{(N+4)/2}} \\ &= \frac{2}{\pi \mu} \int_0^R \frac{mh^{N+1} r dr}{(h^2 + r^2 + d^2)^{N+4/2}} \int_0^\pi \left(1 - \frac{2rd}{h^2 + r^2 + d^2} \cos \alpha\right)^{-(N+4)/2} d\alpha \end{aligned} \quad (3)$$

将上式用泰勒级数展开,采用 3 阶近似计算,舍去余项^[10],最后得:

$$T = \frac{2}{\mu} \int_0^R \frac{mh^{N+1}r}{(h^2+r^2+d^2)^{(N+4)/2}} \cdot dr + \frac{(N+4)(N+6)\pi^2}{12\mu} \int_0^R \frac{mh^{N+1}d^2r^3}{(h^2+r^2+d^2)^{(N+8)/2}} \cdot dr \quad (4)$$

式(4)只适合采用数值积分的方法计算。由于靶是轴心对称的,所以实用靶材的 m 和 h 都是 r 的函数,所以在计算前必须先确定两者随 r 的变化情况。图 2 为图 1 中溅射点 B 旋转到 X 轴的剖面图。如图 2,假设靶半径 r 处的刻蚀深度为 S_r ,那么,半径 r 处的溅射量 m_r 应该与靶材刻蚀深度 S_r 成正比,即 $m_r \propto S_r$; A 点到 B 点的垂直高度 h_r 等于新平面靶时的靶基距离 H 加上刻蚀深度,即: $h_r = H + S_r$ 。由于只计算相对膜厚,所以可以假定靶材刻蚀最深点的溅射量为 100,那么有: $m_r = 100 \times S_r / S_{\max}$ 。

为获得实际靶材的刻蚀情况,现采用万能工具显微镜对即将用完的靶材进行了测量,测量间隔为 0.5mm。受篇幅限制表 1 只列举了间隔 5mm 的测量数据(r, S_r),及按上述方法计算出的溅射量(m_r)。

表 1 靶材实测数据

Tab. 1 Measured data for target

r (mm)	S_r (mm)	m_r
0	0.20	5.15
5	0.23	5.98
10	0.37	9.53
15	0.75	19.52
20	1.44	37.51
25	2.50	65.22
30	3.72	97.00
35	2.50	65.22
40	0.77	20.08
45	0.37	9.53
50	0.31	7.96

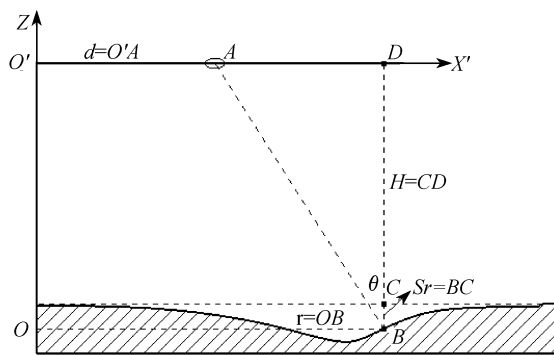


图 2 溅射靶剖面图

Fig. 2 Sputtering target orthographic

用程序计算 T 时积分半径 dr 可以取得足够小,但溅射量和靶基距不需要如此精细的数据,只需要用表 1 数据,靶半径每增加 0.5mm 更换一次即可(相当于分段积分),如此可以简化程序和减少数据量。

在式(4)中还有参数 N 需要给定。在实际镀膜时,溅射工艺的变化会改变膜料发射的角分布,即 N 随工艺有较大变化。为全面考察靶材刻蚀对均匀性影响,计算了 $N=0.5, 1$ 和 2 及 $H=25\text{mm}, 50\text{mm}$ 和 110mm 共 9 种情况,归一化结果如图 3、图 4、图 5。图中实线为新平面靶,虚线为使用后的旧靶。从图中可以看出,随着靶基距增加,不但膜层的均匀性提高,而且新靶和旧靶的膜厚分布变化很小。 N 的变化在一定程度上会改变膜厚分布,但随着靶基距增加,影响逐步减弱。

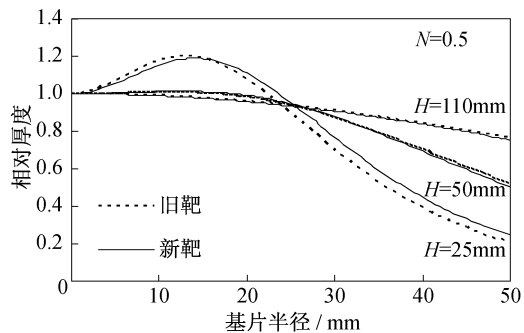


图 3 $N=0.5$ 时,新、旧靶薄膜相对厚度分布
Fig. 3 Film thickness distribution of new and etched target, $N=0.5$

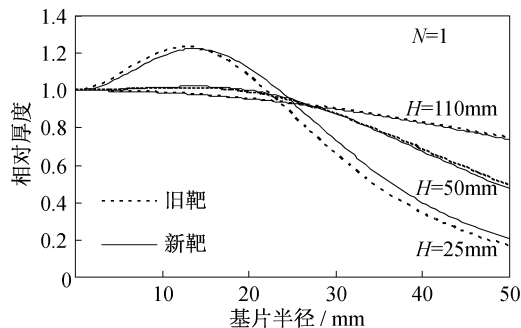


图 4 $N=1$ 时,新、旧靶薄膜相对厚度分布
Fig. 4 Film thickness distribution of new and etched target, $N=1$

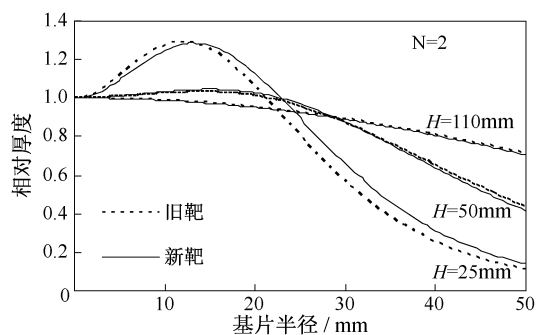
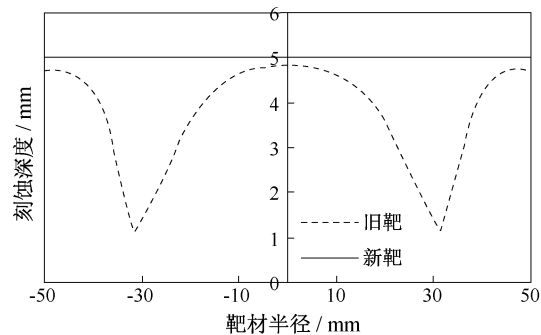
图5 $N=2$ 时,新、旧靶薄膜相对厚度分布Fig. 5 Film thickness distribution of new and etched target, $N=2$ 

图6 靶材剖面图

Fig. 6 Sectional drawing of targets

3 实验过程及结果

3.1 实验条件

采用自主设计研发的JSD550溅射镀膜机;圆形磁控溅射靶直径100mm;靶材为5mm厚的Ni-Cr合金靶材;溅射电源为美国AE公司的pinnacle™ 3000;靶面与基片平行,初始距离为110mm,基片固定不动;工作气体为Ar,流量10sccm;底真空度为 3×10^{-3} Pa,溅射真空度为0.22Pa;真空室温度为常温。

3.2 薄膜制备过程

现对一块旧靶和一块新靶材进行试验,靶材剖面如图6。溅射镀膜的基本条件保持不变。为消除靶面可能存在的氧化物,正式镀膜前进行了充足的预溅射。镀膜时,溅射电源采用恒功率模式,以100W和150W的溅射功率对每一块靶分别进行2次实验。

3.3 测试结果及分析

采用光功率计和精密位移平台沿样品的直径方向测量其光密度。为了便于比较,将测试数据归一化,结果如图7、图8。虽然文中不是直接检测膜层的物理厚度而是间接检测样品的光密度值,但是对于厚度较厚的金属薄膜,光密度 OD 与膜层厚度 d 成正比关系^[11],即: $OD=K \times d$,所以检测光密度即等同于检测物理厚度。从实验结果可以看出,文中所选靶基距等于110mm时,100W溅射功率试验样品的边缘膜厚相对中心差30%,与图4中 $H=110$ mm的计算结果比较接近;而150W的试验结果与图3中 $H=110$ mm的计算结果比较接近。总体来说,新靶和旧靶的膜厚分布差别较小,也与计算结果一致;溅射功率的变化会改变膜厚分布,与文献[3]和[4]所述相符。

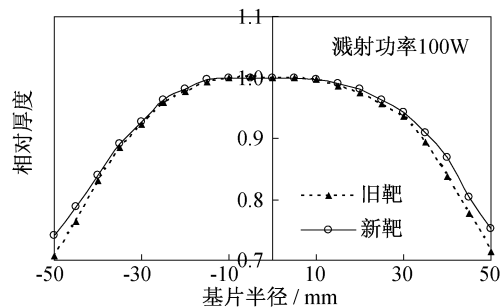


图7 100W溅射功率时相对厚度

Fig. 7 Film thickness under sputtering power 100W

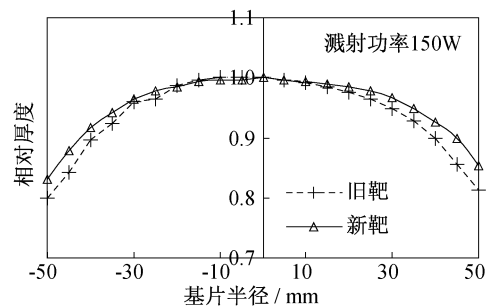


图8 150W溅射功率时相对厚度

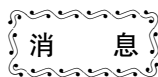
Fig. 8 Film thickness under sputtering power 150W

4 结束语

在磁控溅射镀膜中,溅射功率、充气流量、真空度等工艺虽然对膜厚分布有一定的影响,但影响最大的还是靶基距。从理论分析已经得出当选取较大的靶基距时,旧靶的膜厚分布与新靶相差很小,所以当新靶的均匀性调整好,在以后的生产过程中虽然靶材在不断消耗,但均匀性修正手段不必调整。由于随着靶基距增加,薄膜的沉积效率急剧下降,从而对镀膜生产极为不利,因此靶基距的选择要根据实际生产情况综合考虑。

参考文献:

- [1] 胡作启,李佐宜,缪向水,等.磁控溅射薄膜的厚度均匀性理论研究[J].华中理工大学报,1996,24(1):89-92.
- [2] 张苏维,魏文忠,杨 晖.靶形对溅射薄膜厚度均匀影响的研究[J].武汉大学学报,1992(3):43-47.
- [3] 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.
- [4] 温培刚,颜 悦,张官理,等.磁控溅射沉积工艺条件对薄膜厚度均匀性的影响[J].航空材料学报,2007,27(3):66-68.
- [5] 范正修,薛松生,何朝玲.磁控溅射薄膜的膜厚分布[J].应用科学学报,1993,11(2):136-140.
- [6] 应根裕,黄守忠.淀积 α -Si:H薄膜的磁控靶[J].真空科学与技术,1985,5(5):30-37.
- [7] 唐伟忠.薄膜材料制备原理、技术及应用[M].北京:冶金工业出版社,2003:69.
- [8] 阴晓俊,费书国,章月洲,等.有限元法计算膜厚均匀性[J].光学仪器,2001,23(5-6):5-10.
- [9] 唐晋发,顾培夫,刘 旭,等.现代光学薄膜技术[M].杭州:浙江大学出版社,2006:271-273.
- [10] 孟宪权,范湘军,郭怀喜.平面磁控溅射成膜生长速率及厚度均匀性计算[J].薄膜科学与技术,1994,7(12):318-323.
- [11] 王力衡,黄运添.薄膜技术[M].北京:清华大学出版社,1991:73-80.



我首台大气二氧化碳探测拉曼激光雷达研制成功 填补我国大气二氧化碳空间分布探测技术空白

由中科院安徽光学精密机械研究所承担的中科院重点装备“二氧化碳拉曼激光雷达”不久前研制成功,并通过中科院组织的专家组验收。

二氧化碳拉曼激光雷达系统是我国第一台具有自主知识产权的探测大气温室气体二氧化碳时空分布的激光雷达系统,能够全方位探测大气二氧化碳浓度距离分布。二氧化碳拉曼激光雷达与二氧化碳分析仪观测结果表明具有很好的一致性。该系统探测范围水平方向大于 2000m,垂直方向大于 3000m,探测分辨力 30m,探测精度(方差)在 1000m 范围内优于 1%,在 3000m 范围内优于 3%。专家组对激光雷达系统进行了现场测试,测试显示系统各项指标均符合或部分超过实施方案的设计指标。

最近几十年来,由于人类活动导致大气中温室气体和污染气体的浓度急剧增加,但目前人们对大气二氧化碳的了解远远不够,至今仍非常缺乏大气二氧化碳垂直分布的数据。研究表明,大气中二氧化碳的浓度是逐年增加的,但增加的二氧化碳只是人类和自然净排放的三分之二,还有约三分之一不知去向。气候变化预测与环境评估离不开二氧化碳分布的数据,目前二氧化碳垂直分布探测的方法非常少,虽然可以利用气球探空、飞机和火箭等进行采集测量,但这些方法非常麻烦,费用巨大,是一般科学研究无法完成的,迄今我国还没有二氧化碳空间分布的数据。

专家指出,二氧化碳拉曼激光雷达填补了我国大气二氧化碳空间分布探测技术空白,对完成好“监测气候变化的过程和要素”等气候变化监测预测预警,应对气候变化专项行动重点任务具有重要意义。

(摘自《科技日报》)