

矩形平面直流磁控溅射装置工作区域磁场分析

邱清泉¹, 励庆孚¹, Yu Jiao², Jim Finely²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. R&D Center, Pennsylvania Pittsburgh Glass Industries Inc., Pittsburgh 15238, USA)

摘要: 通过分析磁场对磁控溅射过程的影响, 总结出了矩形平面直流磁控溅射装置工作区域磁场的设计原则, 并给出了两种磁体结构. 采用有限元方法对一套装置的磁场进行了计算, 磁场计算结果与测量值吻合较好. 基于上述分析计算, 研究了磁场分布对靶材刻蚀形貌的影响, 并进一步提出了具体的磁场改进措施. 采用分流条垫补方法可以改进磁场分布, 如果磁场水平分量呈马鞍形分布, 靶材的利用率可以提高, 采用磁极斜面结构对磁场分布的改进意义不大. 另外, 错开磁体间安装接缝和对永磁体精确充磁能够有效提高工作区域磁场分布的均匀性.

关键词: 磁控溅射; 永磁; 磁场; 刻蚀

中图分类号: TN305 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)12-1441-05

Magnetic Field in Working Region of Rectangular Planar DC Magnetron Sputtering Apparatus

Qiu Qingquan¹, Li Qingfu¹, Yu Jiao², Jim Finely²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. R&D Center, Pennsylvania Pittsburgh Glass Industries Inc., Pittsburgh 15238, USA)

Abstract: Analyzing the influence of the magnetic field on magnetron sputtering process, the principles of the magnetic field design for the working region of the rectangular planar DC magnetron sputtering apparatus are summarized, and two feasible magnet configurations are proposed. The magnetic field distribution of one apparatus is evaluated by finite element method to well coincide with the measurements. Simultaneously, the influence of the magnetic field distribution on the target erosion is investigated, and detailed measures for improving the magnetic field are proposed. The magnetic field is improved by shimming method with the shunt bar, and the horizontal magnetic field component with saddle distribution enables to enhance the target utilization. The inclined pole shoe has little benefit to the magnetic field. In addition, staggering the joint gap between the magnets and precisely magnetizing the permanent magnet facilitate enhancing the uniformity of the magnetic field in the working region.

Keywords: magnetron sputtering; permanent magnet; magnetic field; erosion

矩形平面直流磁控溅射系统广泛应用于玻璃和其他材料制作薄膜的过程中, 所采用的矩形靶的整体结构如图1所示, 一般由两段直道和两段弯道组成, 类似于跑道结构. 其直道区域的截面结构如图2所示, 主要包括磁体、靶材、基座以及用于磁场改进的分流条等部件. 相对于热蒸发、离子镀等镀膜系

统, 磁控溅射沉积镀膜系统具有高的沉积率, 低的基板温度的优点, 适合于沉积难熔金属材料, 并可以保证大面积镀膜的均匀性. 然而, 该系统也存在缺点, 就是靶材的利用率比较低, 通常低于30%^[1]. 靶材利用率的提高对于降低生产成本具有很大的现实意义, 目前靶材利用率通常通过改变磁体的几何结构

来获得理想磁场形状^[2-4]或控制磁场随时间变化^[5-6]的方法进行改善。

矩形平面直流磁控溅射装置的磁场为三维分布,在该装置的工作区域,即大部分直道区域,磁场分布几乎是一致的,然而在端部区域,由于弯道磁体的影响,磁场分布发生变化,在矩形靶的对角线位置容易出现反常刻蚀现象,给镀膜过程带来不利的影响^[2]。有关反常刻蚀的理论以及矩形靶端部区域磁场与工作区域磁场的配合已在文献^[7]中进行了详细研究,本文将重点对矩形磁控溅射装置工作区域的磁场进行分析。

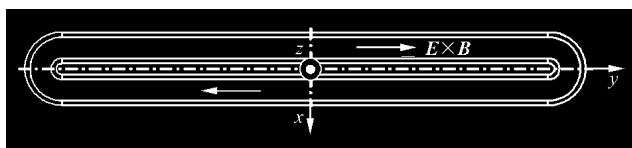


图1 矩形平面磁控溅射靶的整体结构

1 磁场对磁控溅射过程的影响

磁控溅射主要包括放电等离子体输运、靶材刻蚀、薄膜沉积等过程,磁场对磁控溅射各个过程都会产生影响。磁场的主要作用是维持系统较高的等离子体密度,降低放电电压。在合适的电场和磁场强度下,图2所示的磁镜场位形可以有效地约束靶表面发射出的二次电子,这些电子不会直接向阳极运动,而是在阴极表面做螺旋形的 $E \times B$ 漂移运动,如图3所示。电子在正交电场和磁场下的漂移速度 v_d 与电场强度成正比,与磁场强度成反比。这将大大提高电子与中性气体之间的碰撞频率,通过电离中性气体,可以使离子密度增加,这就使对靶轰击的离子密度增加,溅射速率提高。磁场的存在还可以使溅射系统在较低气压下运行,低的气压可以使离子在鞘层区域减少碰撞,以比较大的动能轰击靶材,并且能够降低溅射出的靶材原子和中性气体的碰撞,防止靶材原子被散射到器壁或被反弹到靶表面,提高薄膜沉积的速率和质量。

2 磁场设计

2.1 磁场的设计原则

磁场的初始设计对靶材利用率、溅射的速率、薄膜沉积的速率和效率都有密切的影响。磁场作为装置的一个固定参数,磁场设计的目标在于得到比较高的靶材利用率、溅射速率和功率效率,然后通过调整电源功率、气体压强以及基板的运动速度来控制镀膜的速度和质量。

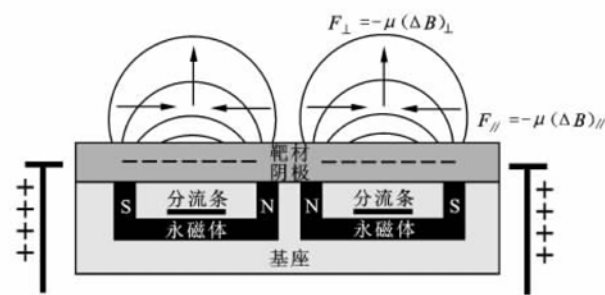


图2 矩形平面磁控溅射靶的截面结构

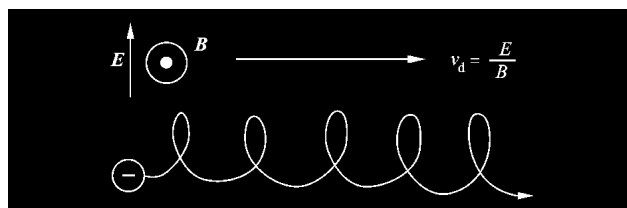


图3 电子在正交电场和磁场下的 $E \times B$ 漂移

文献^[8]提出了功率效率的概念,定义功率效率为单位功率密度下的沉积速率。作者发现磁场强度过低,沉积的功率效率明显下降,磁场强度过高,功率效率基本不变,在适中的磁场强度下,功率效率正比于磁场强度。Wendt^[9]发现了在一定的参数范围内,刻蚀跑道的宽度与施加磁场强度的平方根成反比,与施加电压的四次方根成正比。这说明采用比较弱的磁场,可以提高靶材的利用率。Goree^[10]提出了电离效率的概念,发现电离效率与磁场强度的关系也近似为饱和曲线。总的来说,磁场在整个矩形靶面范围必须一致并且具有合适的强度。不一致的磁场将引起薄膜不均匀和靶材的反常刻蚀。如果磁场强度过低,会导致沉积率的降低并且可能引起螺栓头的溅射,污染薄膜。如果磁场强度过高,初始的沉积率尽管可以很高,由于刻蚀形貌很窄很尖,溅射速率将会迅速降低,靶的利用率也会迅速降低。当然,通过磁场形状的优化可以改善上述不利因素,但是从总体上讲,磁场增大到一定程度,电离效率和功率效率不会有很大提高,但靶的利用率却会迅速降低。

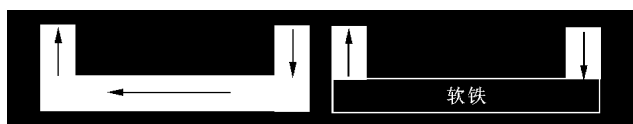
在上述工作的基础上,磁场设计需要遵循的原则可进一步总结为:①对于设计不同尺寸、相同比例的磁控靶,装置尺寸越大,永磁体产生的磁场强度应该越弱一些^[9],并且如果靶材越昂贵,或者需要优先考虑靶材的利用率,磁场可以设计得低一些;②如果优先考虑溅射速率,初始设计的磁场强度应该强一些,但是考虑到电离效率、功率效率、溅射速率等各指标不会随着磁场强度的增加而成比例增加,磁场

强度可以选择在饱和曲线起始点处^[8-10],因为过高的磁场强度会降低靶材的利用率,却没有增加电离效率、功率效率和溅射速率;③初始设计时应该考虑到永磁体充磁、安装等因素,使得工作区域磁场尽量保持一致。

2.2 磁体的结构设计

当前磁控溅射装置中常用的永磁材料主要有铝镍钴、钕铁硼、钕铁硼等。铝镍钴永磁体具有高的使用温度、低的温度系数等优点,但是磁性能不强,针对磁控溅射装置,为了产生所需的磁场,永磁体一般需要做成U型,如图4a所示。这种结构的优点是安装以及更换非常方便,并且铝镍钴磁体可以定量充磁,磁场大小调整很方便,缺点是容易受外磁路影响而退磁。制作U型磁体,比较适合采用AlNiCo1-4、非晶粒取向AlNiCo5等低性能的各向同性材料。

钕铁硼材料使用温度很高,温度系数很低,同时又具有很强的磁性能,缺点是价格偏高。钕铁硼永磁材料磁性能很强,价格适中,但是其工作温度比较低,温度系数很大,受温度影响大,且容易被氧化腐蚀。如果采用钕铁硼、钕铁硼等磁性能较强的各向异性永磁材料,则磁体可以采用图4b的结构,也能满足磁控溅射所用磁场的要求。条状永磁体充磁方便,可以通过改变条状永磁体的几何尺寸方便地设计磁场。然而,对于钕铁硼和钕铁硼磁体,不能通过定量充磁方式调整磁场大小。



(a)结构1

(b)结构2

图4 磁体结构

2.3 磁场的计算

对于图1所示的矩形平面磁控靶,靶的长度(y轴方向)远大于宽度(x轴方向),在整个靶的工作区域,磁场分布是基本一致的。因此,对于工作区域的磁场可以采用二维有限元方法进行计算。基于有限元软件ANSYS,本文采用二维节点矢量磁势方法对一套铝镍钴永磁磁控溅射装置的磁场进行了计算。有关有限元方程的推导过程和求解在此不再介绍。为了验证磁场计算的正确性,采用霍尔探头对距离靶表面高度 $z=2.5\text{ mm}$ 处的磁场进行了测量。磁场的计算值与测量值比较如图5所示,可以看出磁场计算的精度可以满足要求。

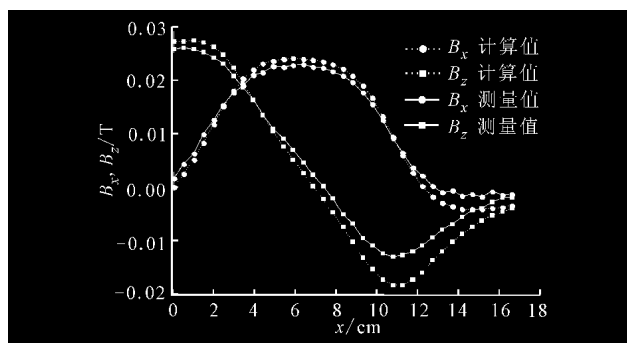


图5 磁场计算值与测量值的比较

3 磁场的改进

3.1 磁场分布对靶材刻蚀的影响分析

磁场强度对靶材刻蚀和溅射过程的影响已经在前面进行了分析,本节着重分析磁场分布对靶材刻蚀的影响,目的在于通过改进磁场分布提高靶材的利用率。

针对磁镜场的位形,Wendt^[9]发现在一定的参数范围内,在磁力线与靶表面平行的位置,即磁场垂直分量 $B_z(x, z_0)=0$ 的点,刻蚀最严重。 z_0 为电子密度最大的高度位置,一般可认为位于靶表面,即 $z_0=0$ 。当前对磁控溅射刻蚀的分析都是基于最严重刻蚀点位于磁力线与靶表面平行的位置这一假设的。然而,这个假设并没有考虑磁场梯度力以及电子漂移速度对电子密度的影响。如果不考虑电场的影响,根据磁镜场原理,最大的电子密度会出现在 $\frac{\partial B_{xz}(x, z_0)}{\partial x}=0$ 的位置。根据电子的漂移运动,电子的密度还与漂移速度成反比,最大的电子密度会出现在 $B_x(x, z_0)=B_{\max}$ 的位置。总的来说,最严重刻蚀点将位于 $B_z(x, z_0)=0$ 、 $\frac{\partial B_{xz}(x, z_0)}{\partial x}=0$ 以及 $B_x(x, z_0)=B_{\max}$ 这3个位置之间。一般而言,这3个位置应该还是比较接近的,这无疑会导致刻蚀更不均匀。从提高靶材利用率的角度讲,这3个位置应尽量远离。由于上述因素,最严重刻蚀点的位置需要通过等离子体仿真或实验才能最终确定。

3.2 分流条设置对磁场和靶材刻蚀的影响

为了提高靶材的利用率,文献[4]提出了分流设计方法,如图6所示。采用铁磁性分流条可以改变磁场的分布,使得磁力线与靶表面更为平行。文献[3]认为磁场水平分量 B_x 应该呈马鞍形分布,因为被刻蚀处的水平磁场强度和电场强度将有所增强,这样会加速局部刻蚀。根据3.1节的分析,我们发现即使不考虑靶材刻蚀的动态过程,采用马鞍形分布的

磁场仍然可以提高靶材的利用率,通过下面的粒子模拟结果可以验证这一观点.如果考虑靶材刻蚀的动态过程,靶材利用率的提高则更为显著.

根据上述分析,采用分流条垫补方法对磁场进行改进,通过选取合适的分流条参数,可以得到靶表面 $z=0$ 处的磁场分布如图7所示.通过与未加分流条时的磁场分布进行对比可以看出,加上分流条,磁场的水平分量由钟形分布变为马鞍形分布,磁力线与靶表面也更为平行.



图6 分流条设置示意图

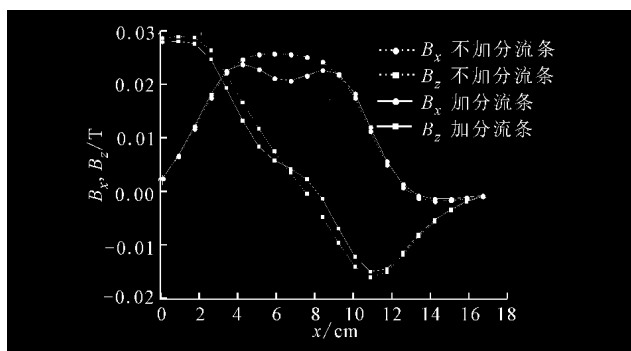


图7 添加分流条与无分流条时靶表面磁场分布比较

本文采用跟踪电子轨迹方法^[11]以及 Yamamura/Tawara 溅射产额公式^[12],对图7所示的磁场改进前后靶材的刻蚀形貌进行了计算机模拟.相关的粒子模拟方法将另文详细分析,在此仅仅给出靶材刻蚀形貌的仿真结果,如图8所示,其中刻蚀深度为标么值.由图中可以看出,马鞍形分布的磁场水平分量可以使得靶材的刻蚀形貌更宽,从而提高了靶材的利用率.

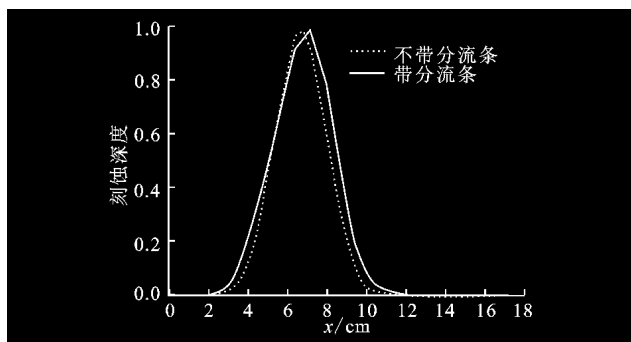


图8 靶材刻蚀形貌比较

3.3 极靴斜面对磁场分布的影响

为了使磁力线与靶表面更为平行,许多学者提

出在磁极处采用不同极靴形状(例如梯形、楔形、三角形等)来改善磁场分布^[3,13-14].文献[3]通过对不同极靴形状下磁场的分布进行计算,认为极靴形状对靶面溅射区域磁场的影响程度可以忽略.本文对极靴斜面角度对磁场的影响进行分析,以一种最基本的极靴形状进行研究,如图9所示.采用有限元方法计算了不同的磁极斜面角度($0^\circ \sim 60^\circ$)下的磁场分布,如图10所示.从图中可以发现,由于极靴占据了磁体到靶材的距离,在靶材主要工作区域($2 \sim 11$ cm),不但磁场强度会降低,而且磁力线与靶表面的平行程度也没有显著改善.因此,采用磁极斜面对磁场的改善意义不大.



图9 磁极斜面示意图

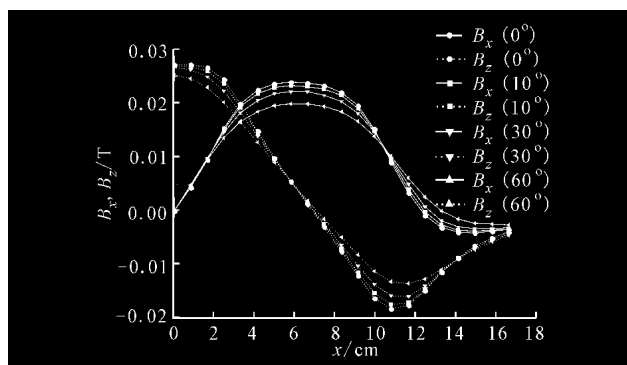


图10 采用不同磁极斜面角度时靶表面磁场分布比较

3.4 磁体安装接缝及磁性能差异对磁场的影响

对于实际装置,由于磁体长度较长,一般由多块永磁体拼接制成.永磁体在加工以及拼接过程中会造成永磁体之间的接缝,如图11所示.

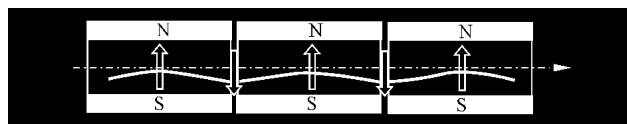


图11 磁体安装接缝示意图

对于当前使用的磁控溅射装置,发现在工作区域刻蚀形貌呈现微弱的斑纹状分布,图11中黑色斑纹线代表最严重刻蚀点位置.发生该现象的原因尚不能很好解释,笔者认为可能由于充磁不理想而导致每块磁体端部的磁力线向外侧发散,安装之后端部磁力线会互相排斥,从而改变了高能电子的漂移路径.要解决这个问题,一方面要改进磁体的充磁方式,使充磁理想化,另一方面可以采用铁磁片对接缝

磁场进行校正. 另外, 本文还提出一种新的改进方式, 将跑道两侧磁体的接缝错开半个永磁体的长度, 将这种不利影响相互抵消, 使膜层更为均匀.

此外, 由于制作磁体工艺流程和非理想充磁引起的各磁体之间磁性能差异也是导致矩形磁控溅射装置镀膜不均匀的主要因素. 要解决这个问题, 一方面要改进加工磁体的工艺, 另一方面要采用精确的充磁、退磁、测磁装置.

4 结 论

通过研究磁场对磁控溅射过程的影响, 总结出了矩形平面直流磁控溅射装置工作区域磁场设计需要遵循的 3 个原则, 并给出了两种具体的磁体结构. 采用有限元法对一套磁控溅射装置的工作区域磁场进行了计算, 与测量结果吻合较好.

进一步研究了磁场分布对靶材刻蚀形貌的影响, 并提出了具体的改进措施. 对于磁场改进, 主要研究了 3 个比较关键的问题. 首先研究了如何采用分流条垫补方法对磁场进行改进, 通过跟踪电子轨迹方法以及 Yamamura/Tawara 溅射产额公式对靶材刻蚀形貌进行模拟. 从模拟结果可以看出, 马鞍形分布的磁场水平分量可以使得靶材的利用率提高. 研究了不同的磁极斜面角度对磁场分布的影响, 发现采用磁极斜面对磁场的改善意义不大. 分析了磁体安装接缝和永磁体性能差异对磁场分布的影响, 并提出了相关改进措施.

参考文献:

- [1] Okazawa K, Shidoji E. Prediction of the evolution of the erosion profile in a direct current magnetron discharge [J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 86(6): 2984-2989.
- [2] Shidoji E, Nemoto M, Nomura T. An anomalous erosion of a rectangular magnetron system [J]. *J Vac Sci Technol: A*, 2000, 18(6): 2858-2863.
- [3] 刘翔宇. 磁控溅射镀膜中靶的优化设计[D]. 北京: 清华大学电子工程系, 2004.
- [4] German J R. Magnetron shunt for enhanced performance of sputter targets [J]. *IBM Technical Disclosure Bulletin*, 1993, 36(11): 414-418.
- [5] Musil J. Rectangular magnetron with full target erosion [J]. *J Vac Sci Technol: A*, 1999, 17(2): 555-563.
- [6] Kukla R, Bähr M, Beißwenger S, et al. High rate sputtering of metals and metal oxides with a moving plasma zone [J]. *Thin Solid Films*, 1993, 228 (1/2): 51-55.
- [7] 邱清泉, 励庆孚, Yu Jiao, 等. 矩形平面直流磁控溅射装置端部磁场分析[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(25): 119-124.
Qiu Qingquan, Li Qingfu, Yu Jiao, et al. Analysis of the magnetic field in the end region of the rectangular planar dc magnetron sputtering apparatus [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(25): 119-124.
- [8] 张化一, 王克礼. 平面磁控溅射的研究 [J]. *真空*, 1982(6): 1-17.
Zhang Huayi, Wang Keli. Study on the planar magnetron sputtering [J]. *Vacuum*, 1982(6): 1-17.
- [9] Wendt A E, Lieberman M A, Meuth H. Radial current distribution at a planar magnetron cathode [J]. *J Vac Sci Technol: A*, 1988, 6(3): 1827-1831.
- [10] Goree J, Sheridan T E. Magnetic field dependence of sputtering magnetron efficiency [J]. *Appl Phys Lett*, 1991, 59 (9): 1052-1054.
- [11] Sheridan T E, Goeckner M J, Goree J. Model of energetic electron transport in magnetron discharges [J]. *J Vac Sci Technol: A*, 1990, 8 (1): 30-37.
- [12] Yamamura Y, Tawara H. Energy dependence of ion-induced sputtering yields from monatomic solids at normal incidence [J]. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1996, 62: 149-253.
- [13] 欧阳煦, 曲喜新, 严康宁. 一种平面磁控溅射靶: 中国, 87205281.8 [P]. 1989-01-11.
- [14] 张兴全, 李守义. 永磁式平面磁控溅射靶: 中国, 01255955.5 [P]. 2002-07-24.

(编辑 杜秀杰)