

基于 Comsol 的矩形磁控溅射靶磁场模拟与分析

王雪,程磊,徐锋,贾昆鹏,左敦稳
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘 要:磁控溅射靶表面磁场分布与靶材刻蚀特性、薄膜沉积均匀性密切相关。为确定合适的磁控靶结构参数以改善靶材表面水平磁场分布均匀性,采用 Comsol 软件建立矩形平面磁控溅射靶三维模型,对靶材表面磁场分布进行模拟与分析,研究永磁体结构尺寸和磁轭尺寸对磁场分布的作用规律,得到靶材表面水平磁场分布均匀、水平磁感应强度范围合理的溅射靶结构参数。研究结果可提高磁控溅射靶磁场模拟准确性,对溅射靶结构参数的选择具有指导作用。

关键词:磁控溅射;Comsol;结构参数;磁场分布

中图分类号:TB43 **文献标识码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)01-0096-03

Simulation and Analysis of Magnetic Field of Rectangular Magnetron Sputtering Target by Comsol

WANG Xue, CHENG Lei, XU Feng, JIA Kunpeng, ZUO Dunwen

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The distribution of magnetic field on the surface of magnetron sputtering target is closely related to the etch morphology of target and the uniformity of thin film deposition. In order to find reasonable structural parameters to improve the uniformity of the distribution of horizontal magnetic field, the three-dimensional of rectangular plane magnetron sputtering target were established by Comsol software. The effect of permanent magnet structure size and magnetic yoke size on the distribution of magnetic field was studied, and the sputtering target structure parameters with uniform horizontal magnetic field distribution and reasonable horizontal magnetic induction intensity range were obtained. The research improves the accuracy of magnetic field simulation of target and plays a guiding role in the selection of structural parameters of magnetron sputtering target.

Keywords: magnetron sputtering; Comsol; structural parameters; magnetic field distribution

0 引言

磁控溅射技术由于其高沉积速率、低温沉积等特点被广泛应用于薄膜制备中^[1-2],在微电子、航空航天领域具有广阔的应用前景^[3]。其中,非平衡磁控溅射靶表面磁场不完全闭合,等离子体区域扩展到基体附近,有利于薄膜质量的改善^[4]。然而,由于电子漂移范围受靶材表面水平磁场所控制,磁场分布的不均匀会导致靶材刻蚀不均匀,形成刻蚀跑道形貌^[5]。刻蚀跑道的产生不仅会降低靶材利用率,还会影响靶材溅射速率以及溅射过程的稳定性,进而影响薄膜沉积均匀性^[6]。因此,制备高质量、成分均匀的薄膜时,针对靶材表面磁场分布的调控设计十分重要。

采用实物靶试验的方法来改进靶性能存在周期长、调控范围有限、成本高等问题,随着有限元仿真技术发展,实物研究逐渐被计算机模拟所替代。先前有关磁场分布模拟研究大多采用二维简化物理模型^[7-9],得出二维结构参

数对磁场变化的作用规律,但其磁感应强度模拟数值与实际情况存在偏离,其仅对单排磁铁进行模拟,忽略了实际磁路结构中多排磁铁产生磁场的相互影响。因此,为更准确地模拟靶材表面水平磁场分布情况,本文基于 Comsol 软件,建立溅射靶磁路结构三维模型,模拟靶材表面磁场分布情况,研究永磁体结构尺寸、磁轭尺寸对靶材表面磁场分布与水平磁感应强度的影响,从而确定合适的矩形磁控溅射靶磁路结构参数。

1 矩形磁控溅射靶的三维磁场模拟

本文采用的矩形磁控溅射靶截面结构如图 1 所示,主要由内磁铁、磁轭、外磁铁、靶座、靶材组成,其中靶材(石墨)、靶座(铜)均为非导磁材料,相对磁导率接近 1,可忽略其对磁感应强度的影响。经仿真计算,矩形溅射靶长边方向两端磁场对中部区域磁场分布影响不大,为减少计算量,对两端环型分布磁铁予以忽略,简化后的三维物理模型如图 2 所示。

基金项目:国家自然科学基金项目(51575269);江苏省六大人才高峰资助计划项目(ZBZZ-005)

第一作者简介:王雪(1995—),男,江苏盐城人,硕士研究生,研究方向为超硬涂层工具技术。

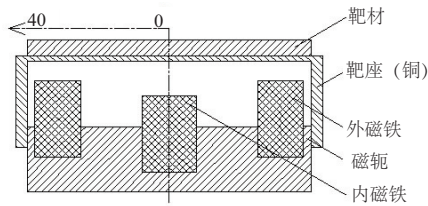


图1 矩形溅射靶截面结构示意图

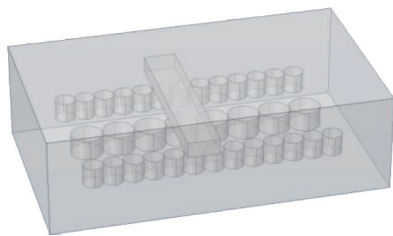


图2 三维物理模型

基于 Comsol 的磁场模拟包括以下几个步骤:定义物理场、磁场、无电流、稳态;建立三维模型,为方便网格划分、优化计算结果,在永磁体上方增加小空气域,各部件材料和参数见表 1;设定边界条件,内边界设为磁通量守恒,外边界设为磁绝缘;划分网格,按自定义网格划分,划分结果如图 3 所示;求解计算,后处理。后处理得到矩形靶中截面处的磁力线分布图和靶材表面磁通密度水平分量云图,如图 4、图 5 所示。图中模型均无磁轭,磁铁高度为 10 mm,外磁铁直径为 10 mm,内磁铁直径为 16 mm。矩形溅射靶简化模型的结构参数如图 6 所示。

表 1 矩形靶模型各部件的材料与参数

部件	材料	相对磁导率	矫顽磁力/(kA/m)
外磁铁	钕铁硼	1.05	400
内磁铁	钕铁硼	1.05	-400
磁轭	纯铁	4 000	

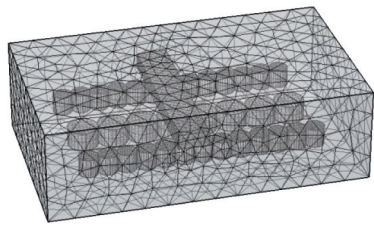


图3 网格划分后的三维模型

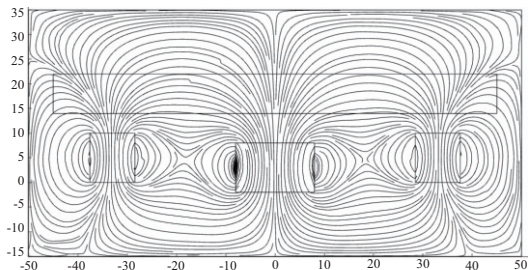


图4 磁力线分布图

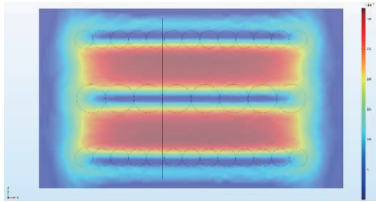


图5 靶材表面磁通密度水平分量云图

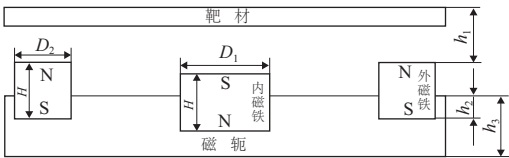


图6 矩形溅射靶的简化物理模型

图 6 中: D_1 为内磁铁直径; D_2 为外磁铁直径; H 为磁铁高度; h_1 为外磁铁与靶材表面间距; h_2 为磁轭浸入深度; h_3 为磁轭高度。

2 磁场模拟结果分析与讨论

靶材表面水平磁场分布与靶材利用率、薄膜沉积过程密切相关,因此,通过仿真模拟实现磁场分布的调控设计具有积极意义。以下通过调整模型的部分结构参数来改变磁场分布,从而研究磁路结构对磁场变化的规律,随后确定磁控靶主要磁路的结构参数。文中所用模型外磁铁安装位置相对内磁铁均高出 2 mm,外磁铁与靶材上表面距离 h_1 均为 10 mm, h_3-h_2 均为 4 mm。

2.1 磁铁高度对磁场分布的影响

首先固定内磁铁直径 D_1 为 16 mm,外磁铁直径 D_2 为 10 mm,无磁轭结构,研究靶材表面水平磁感应强度与磁铁高度 H 的关系。 H 分别取 8 mm、10 mm、12 mm、14 mm。图 7 为对应的靶材表面水平磁感应强度分布曲线,其中,横坐标表示距离内磁铁中心的水平距离 ($-38\text{ mm} \sim 38\text{ mm}$),对应三维模型短边方向;纵坐标 $|B_H|$ 表示靶材表面水平磁感应强度(T)。由图 7 可见,随着内外磁铁高度增加,整体水平磁感应强度不断增加,最大水平磁感应强度从 27 mT 增加至 38 mT,与此同时分布曲线趋于尖、窄,水平磁场均匀性下降,刻蚀跑道宽度减小。当磁铁高度 $H=10\text{ mm}$ 时,最大水平磁感应强度约为 30 mT,且水平磁感应强度分布均匀。

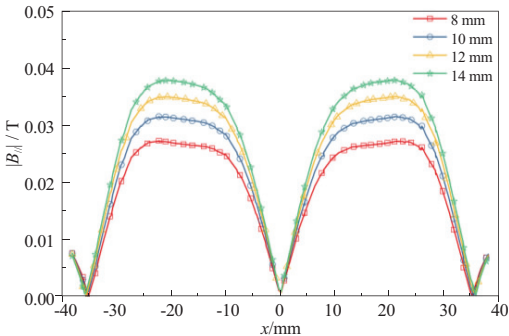


图7 磁铁高度 H 对靶材表面水平磁感应强度分布的影响

2.2 内、外磁铁直径对磁场分布的影响

固定磁铁高度为 10 mm,研究内、外磁铁直径对靶材表面水平磁感应强度的影响。首先取内磁铁直径 D_1 分别为 12 mm、16 mm、20 mm、24 mm,外磁铁直径均为 10 mm,对应的水平磁感应强度分布曲线如图 8 所示。图中可以看出:当 D_1 为 12 mm 时内侧磁场相对较弱,水平磁感应强度最大位置靠近外磁铁;随着内磁铁直径逐步增加到 24 mm,最大水平磁感应强度不断增加,对应最大水平磁感应强度位置朝内磁铁侧偏移,水平磁场分布均匀区域先增加后减小。当 D_1 为 16 mm 时,水平磁感应强度均匀区域相对最大,靶材刻蚀跑道宽度相对最宽。

随后,固定内磁铁直径 D_1 为 16 mm,取外磁铁直径 D_2 分别为 8 mm、10 mm、12 mm、14 mm,对应的水平磁感应强度分布曲线如图 9 所示。图中可见,随着 D_2 的增加,最大水平磁感应强度逐渐从 26 mT 增加到 39 mT,对应位置朝外磁铁侧偏移,水平磁场分布均匀性不断下降,分布均匀区域逐步减小。当 D_2 为 10 mm 时,水平磁感应强度分布最为均匀。

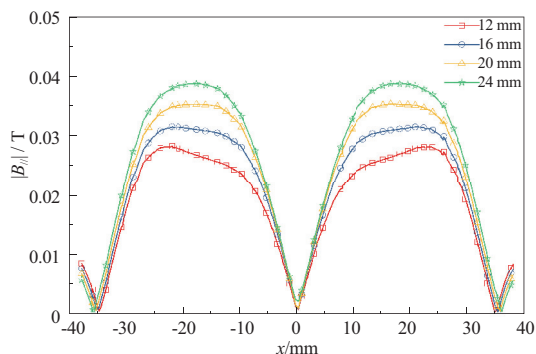


图 8 内磁铁直径 D_1 对靶材表面水平磁感应强度分布的影响

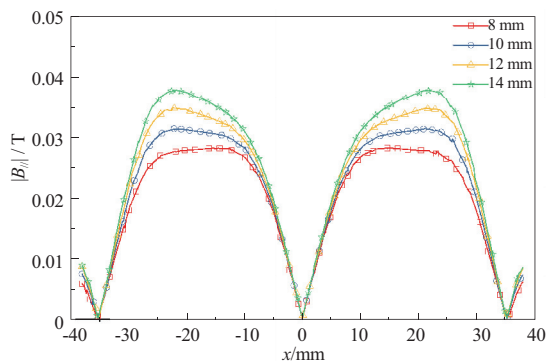


图 9 外磁铁直径 D_2 对靶材表面水平磁感应强度分布的影响

2.3 磁轭尺寸对磁场分布的影响

为进一步增强靶材表面磁场分布均匀性,引入磁轭结构,利用其高磁导率的特性对磁场进行引流。图 10 为引入磁轭后的三维模型和网格划分结果,磁力线分布和靶材表面磁通密度水平分量云图如图 11、图 12。对比图 4 和图 11 可以看出,引入磁轭后的靶材表面磁力线水平区域有所增加。随后,令磁铁高度为 10 mm,外磁铁直径为

10 mm,内磁铁直径为 16 mm,研究磁轭浸入深度 h_2 对水平磁场分布的影响,如图 13 所示。由图 13 可以看出,当磁轭浸入深度 h_2 分别为 0 mm、4 mm 时,相比于无磁轭结构,靶材表面水平磁感应强度明显增大,分别增加了 10 mT、20 mT;随着浸入深度进一步增加到 8 mm、12 mm,靶材表面水平磁感应强度反而有所下降,且曲线出现凹状低谷,均匀性也明显变差。结果表明,磁轭对靶材表面磁场分布均匀性影响较为显著,当磁轭浸入深度 $h_2 = 4$ mm 时,刻蚀跑道范围相对最大,其最大水平磁感应强度为 40 mT。

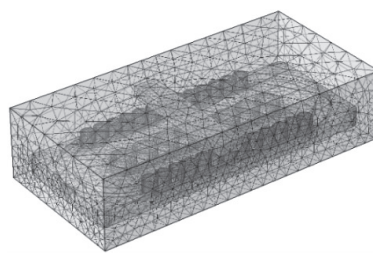


图 10 引入磁轭的三维模型网格划分结果

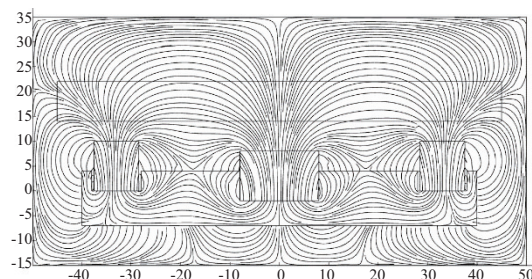


图 11 引入磁轭的三维模型磁力线分布图

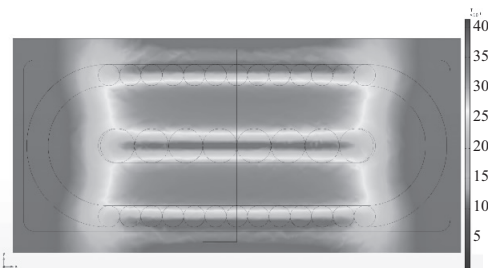


图 12 引入磁轭的靶材表面磁通密度水平分量云图

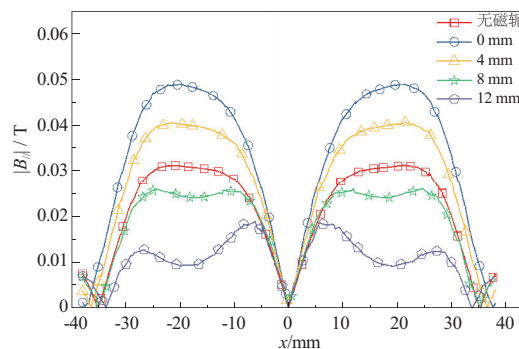


图 13 无磁轭以及磁轭浸入深度 h_2 对靶材表面水平磁感应强度分布的影响

(下转第 106 页)