

磁控溅射用旋转阴极磁场装置的结构设计及 磁场分析

吴纯恩¹, 安辉¹, 宿泽达¹, 陆艳君², 邓文宇³, 齐丽君^{3*}, 安跃军¹

(1. 沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 沈阳芯源微电子设备股份有限公司, 辽宁 沈阳 110169;

3. 沈阳中北通磁科技股份有限公司, 辽宁 沈阳 110179)

Structural Design and Magnetic Field Analysis of a Rotating Cathode Magnetic Field Device for Magnetron Sputtering

WU Chun'en¹, AN Hui¹, SU Zeda¹, LU Yanjun², DENG Wenyu³, QI Lijun^{3*}, AN Yuejun¹

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. KINGSEMI Co., Ltd., Shenyang 110169, China;

3. Shenyang General Magnetic Technology Co., Ltd., Shenyang 110179, China)

Abstract: To address the problem of uneven cathode magnetic field distribution on the target surface during the coating process of existing magnetron sputtering devices, a new type of rotating cathode magnetic field device is designed. The device drives the magnetic field through a rotating mechanism, and the cam mechanism is used to make the magnetic field to move up and down in a straight line. Firstly, a three-dimensional model of the device is drawn using 3D software. Secondly, a finite element analysis of the magnetic induction intensity of the cathode magnetic field is performed. Finally, the magnetic field is optimized by adjusting the height of the yoke, the length of the extended arm, and the distance between the yoke and the target material, and the numerical simulation curves before and after optimization are compared and analyzed. The results show that the uniformity of the magnetic induction intensity curve of the cathode magnetic field is improved from 21% to 6% after optimization, which effectively improves the uniformity of the magnetic field on the target surface, and beneficial to ensure stable operation of magnetron sputtering.

Key words: magnetron sputtering; rotating cathode magnetic field; finite element analysis; magnetic field uniformity

摘要: 针对现有磁控溅射装置在镀膜工作中靶面阴极磁场分布不均匀的问题,设计了一种新型旋转阴极磁场装置。该装置通过旋转机构带动磁场做圆周运动,利用凸轮机构使磁场做上下直线运动。首先,利用3D软件绘制出该装置的三维模型;其次,对阴极磁场磁感应强度进行了有限元分析;最后,通过调整磁轭高度、伸出臂长度以及磁轭-靶材间距优化了磁场,并将优化前后的数值模拟曲线进行了对比分析。结果表明,优化后阴极磁场磁感应强度曲线的均匀度由21%改善到6%,有效改善了靶面磁场均匀性,有利于保证磁控溅射的稳定运行。

关键词: 磁控溅射; 旋转阴极磁场; 有限元分析; 磁场均匀性

0 引言

磁控溅射的基本原理是指反应气体离子在正交电磁场的作用下,不断地轰击靶材表面,使溅射出的粒子沉积在基体上形成薄膜。这种镀膜技术具有“高速”、“低温”两大特点^[1]。现如今,磁控溅射一直被应用于生产各类薄膜,如光学、表面改性或装饰性薄膜等^[2-3]。随着科学技术的快速发展,人们对镀膜技术的要求及薄膜品质的追求不断提高。而现有磁控溅射装置,其内部磁控阴极结构存在着设计缺陷^[4],即不能使靶面得到均匀分布的磁场,导致靶面发生不均匀的溅射刻蚀而形成类似“跑道”的表面轮

基金项目: 沈阳市重点技术攻关“揭榜挂帅”项目(22-316-1-02)

Shenyang Key Technology Research and Development Open Bidding for Selecting the Best Candidates Project (22-316-1-02)

廓,在等离子体密度较大的区域还会发生严重的溅射刻蚀而呈现较深的凹槽^[5],降低了靶材的利用率,甚至影响溅射过程的稳定性以及薄膜质量。因此,研究磁控溅射装置内阴极磁场的结构设计已经迫在眉睫。

近年来,国内外学者开展了一系列对磁控溅射装置结构和磁场分布的研究。Yasunori Ohtsu^[6]等通过调整磁体间距,研究了离子通量对靶的分布和靶侵蚀深度的影响,发现随着磁间距的减小,Cu 靶材利用率逐步提高。陈长平^[7]等通过缩小条形靶端部与中部的磁场差距,以增大靶材的刻蚀均匀性和有效镀膜区,从而提高靶材利用率,改善镀膜均匀性。薛莹洁^[8]等利用 COMSOL 软件对双环磁控溅射靶的靶面水平磁感应强度分布进行了模拟分析,得到了磁控靶结构参数并探讨了加装导磁片对靶面水平磁感应强度的影响。杨欣蕾^[9]等利用 COMSOL 软件进行仿真计算,通过改变靶内磁体形状尺寸、磁轭形状以及结构排布,对靶面磁场的分布进行规律探究,最终确定了新型圆筒式柱面磁控溅射阴极靶内的磁场结构参数。李梦飞^[10]等设计了一种内外永久磁铁以“内圆外方,外围圆”的方式排布的圆平面磁控溅射靶阴极结构,并利用 COMSOL 软件对其磁场进行仿真模拟,得到圆平面磁场分布均匀,并且满足溅射磁感应强度为 20~50 mT 的基本要求。

综上所述,目前大多数研究主要集中在对阴极磁场的分析和参数匹配上,对新型结构的创新开发不够。因此,开展对磁控溅射装置的阴极磁场以及结构相关的关键技术的理论分析、模拟仿真和优化设计等方面的研究工作,将会很大程度上促进旋转阴极结构与研发水平的提升。本文根据磁控溅射阴极磁场的结构特点,采用旋转阴极磁场的结构设计;同时利用凸轮机构对靶面阴极磁场进行调节;并应用有限元软件进行模拟,分析了阴极磁场的磁感应强度;通过优化阴极磁场的结构尺寸,得到了一种使靶面磁场更加均匀的结构方案,从而设计了一种新型的旋转阴极磁场装置。

1 新型旋转阴极磁场装置的结构设计

1.1 旋转阴极磁场装置的整体结构

本文所设计的旋转阴极磁场装置主要针对圆

筒式弧形靶材溅射,用于生产集成电路、平板显示、LED、光通讯以及光学器件等高端电子信息产业的关键性弧形器件表面的薄膜。该装置的整体结构如图 1 所示^[11],包括靶材-基体安装架、磁体旋转架、圆环凸轮、驱动皮带轮和冷却箱,各部件均处于真空腔体内部。其中,靶材-基体安装架如图 2 所示,其为一个双层圆环结构,通过顶丝安装在固定轴上,待镀基体和靶材分别放置于安装架的内层和外层圆环上,其上端有一个加载电极,可以施加电压,使靶材和基体之间的环形区域产生稳定的电场^[12]。

所设计的冷却系统分为靶材冷却和磁体冷却两部分,如图 3 所示。靶材冷却箱固定在安装架的外层上,紧贴靶材背面,进、出水管分别向下和向上穿过轴的空心内部与外部相连。磁体冷却箱位于旋转架圆周运动的外围,固定在真空腔体上,进水管都是直接穿过真空腔体与外部相连。两个冷却箱均通过冷却水的循环实现靶材和磁体的降温^[13]。

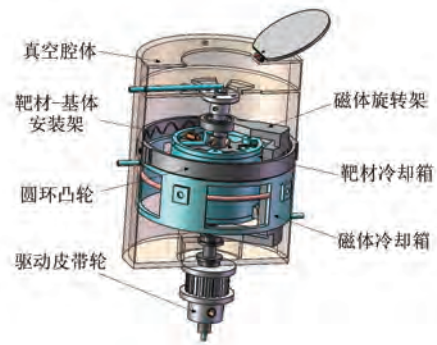


图 1 磁控溅射装置的整体结构图

Fig. 1 Overall structure of magnetron sputtering device

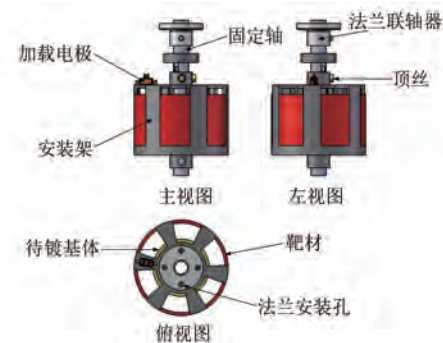


图 2 靶材-基体安装架结构三视图

Fig. 2 Three views of the structure of the target-substrate mounting bracket

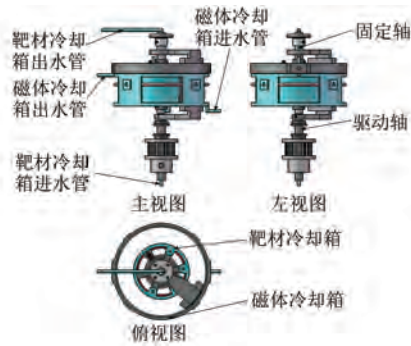


图3 冷却箱结构三视图

Fig. 3 Three views of cooling box structure

1.2 阴极磁场变化调控装置

本文所设计的阴极磁场变化调控装置包括两部分。一部分是控制磁体做圆周运动的磁体旋转架,如图4所示。旋转架的上端通过滚动轴承安装在固定轴上,下端利用顶丝安装在驱动轴上,在驱动轴上安装一个驱动皮带轮,可以通过外部的驱动装置带动旋转架做圆周运动,永磁体和磁轭组合在一起安装在旋转架上,使产生的阴极磁场旋转起来。另一部分是凸轮-滑轨结构,如图5所示。凸轮呈圆环状,其内圆弧面上有凸轮运动轨迹,滑轨安装在磁体旋转架上,凸轮柱、磁体和磁轭利用滑块与滑轨组合在一起,在磁体做旋转运动的同时,凸轮柱会在凸轮轨迹上运动,带动磁体做上下直线运动,使产生的磁场也上下移动,靶面磁场也就随之发生变化。

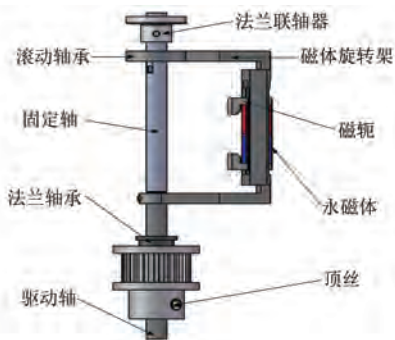


图4 磁体旋转架的结构

Fig. 4 Structure of the magnet rotating frame

2 旋转阴极磁场装置的磁场模拟分析

2.1 非平衡磁控溅射与旋转可调结构磁控溅射

非平衡磁控溅射原理如图6所示,非平衡磁控溅射技术是指外环磁感应强度高于芯部磁感应强度,磁力线没有完全形成闭合回路,部分外环的

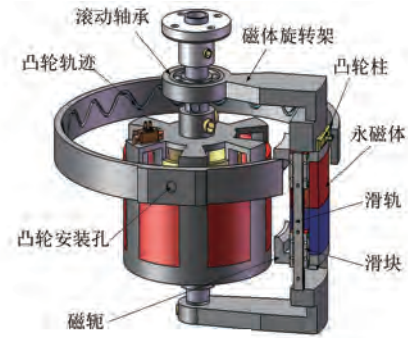


图5 凸轮-滑轨的结构

Fig. 5 Structure of cam-slide rail

磁力线延伸到基体表面,使得部分二次电子能够沿着磁力线逃逸出靶材表面区域,同时再与中性粒子发生碰撞产生电离,等离子体不再被完全限制在靶材表面区域,而是能够到达基体表面,进一步增加镀膜区域的离子浓度,提高了薄膜沉积速率和基体离子束流密度,对沉积膜层表面起到一定的轰击作用^[14]。然而单一非平衡磁控靶在复杂基体上很难沉积出均匀的薄膜,而且在电子飞向基体的过程中,随着磁感应强度的减小,一部分电子会吸附到真空室壁上,导致离子和电子的浓度下降^[15]。

本文设计的装置采用旋转可调的结构,如图7所示。多个溅射靶呈圆周均等分布,旋转永磁体为各个靶源提供统一的磁场,弥补了单一靶材非平衡磁控溅射的不足^[16]。同时采用凸轮结构使旋转的永磁体的上下位置可调,如图8所示,通过改变永磁体的上下位置,以改变靶材表面磁感应强度^[17]。可变磁场的设计提供了一个新的工艺参数,可实现沉积离子和原子比的精细调节,更有利于均匀镀膜。

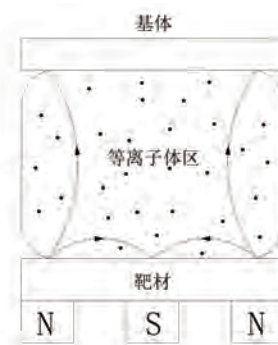


图6 非平衡磁控溅射原理图

Fig. 6 Schematic of unbalanced magnetron sputtering

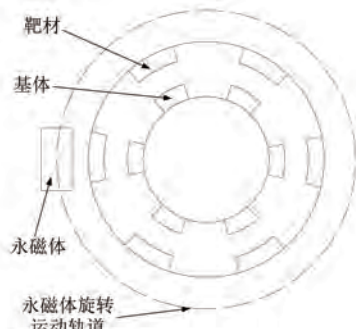


图 7 旋转磁场示意图

Fig. 7 Schematic of rotating magnetic field

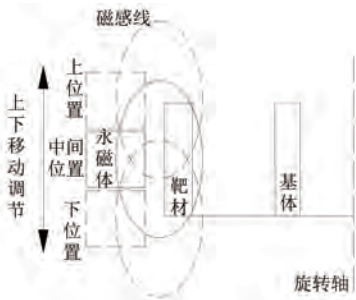


图 8 磁体位置可调示意图

Fig. 8 Schematic of adjustable magnet position

2.2 阴极磁场的物理建模

根据磁控溅射的工作原理, 本文以垂直于电场的磁场分量为研究对象, 再依据旋转阴极溅射工作区的磁场分布特点^[18-20], 应用有限元软件采用二维节点矢量位方法进行模拟计算与分析^[21-22]。

本文所设计的旋转阴极磁场装置内, 靶材和永磁体都呈圆弧形, 如图 9 所示。永磁体产生的磁场在圆周径向截面上是相同的, 如图 10 所示。因此可以将模型简化成圆周径向截面, 沿图 10 中的 A-A 线剖分, 即可得到简化的永磁体-靶结构平面图。

利用有限元软件对二维模型进行模拟分析, 模型各部件材料特性如表 1 所示。其中, 相对磁导率表示磁介质导磁性能的大小, 磁化强度用来描述宏观磁性体磁性强弱程度^[23]。

表 1 各部件的材料特性

Tab. 1 Material characteristics of components

部件名称	材质	特性	
		相对磁导率	磁化强度/($\text{kA} \cdot \text{m}^{-1}$)
永磁体	钕铁硼	1.05	400
磁轭	纯铁	4 000	0
靶材	紫铜	1.00	0

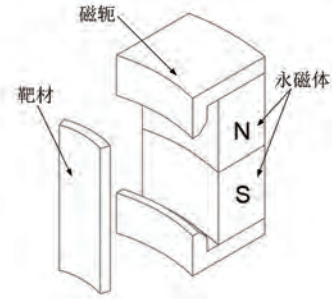


图 9 靶材、永磁体结构图

Fig. 9 Structures of target material and permanent magnet

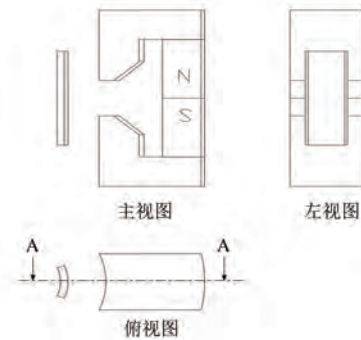


图 10 靶材、永磁体结构三视图

Fig. 10 Three views of the structure of the target material and permanent magnet

2.3 阴极磁场的模拟结果

根据本文所设计的磁控溅射装置, 确定二维模型图中各部件的初始尺寸, 如表 2 所示。表 2 中: a 为永磁体高度; b 为永磁体厚度; c 为磁轭厚度; d 为磁轭高度; e 为磁轭端伸出臂长度; f 为磁轭与靶材的间距; g 和 h 分别为靶材的厚度和高度。各尺寸位置如图 11 所示。

表 2 各部件的初始尺寸参数

Tab. 2 Initial dimensional parameters of the components

部件名称		尺寸	mm
永磁体	a	100	
	b	25	
	c	25	
	d	65	
磁轭	e	60	
	f	25	
靶材	g	5	
	h	80	

本文中, 磁控溅射装置内的阴极磁场主要用于靶材表面, 为了更加清楚地观察靶材表面磁场的分布情况, 选择二维模型区域的 150% 区域为

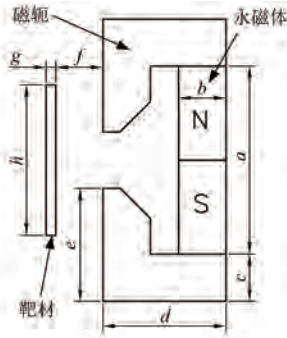


图 11 各部件尺寸位置

Fig. 11 Dimensional location of each component

磁场模拟的求解域。

通过求解运算,得到二维模型在初始尺寸条件下的磁力线分布云图,如图 12 所示。选取靶面上方 5 mm 处的磁感应强度分布进行讨论^[9],得到平行于靶面且离靶面 5 mm 的一条直线上磁感应强度的变化曲线图,如图 13 所示。并计算曲线的均匀度,均匀度是指一组数据内各个数据的分布是否均匀,也就是说,在一定的数据范围内,各个数据的出现频率是否相同。均匀度的计算式是:均匀度 = (最大值 - 最小值) / (最大值 + 最小值)。由图 13 可知磁感应强度曲线变化较大,最大值和最小值分别为 47.6 mT 和 31.2 mT,磁感应强度曲线的均匀度约为 21%。对于磁控溅射而言,磁感应强度变化较大不利于靶材均匀溅射,且会影响薄膜质量。

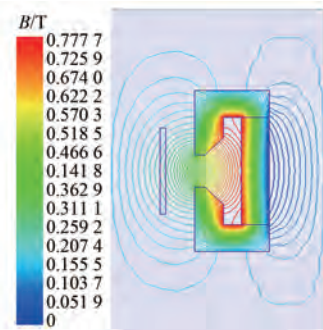


图 12 初始磁力线分布云图

Fig. 12 Cloud chart of initial magnetic force line distribution

2.4 阴极磁场的优化

在阴极磁场的设计中,需要得到磁感应强度更高且均匀度更好的磁场分布,这样才能大幅度提高磁控溅射速率,同时也有利于提高薄膜沉积的均匀性。通过研究所建二维模型的靶面上方

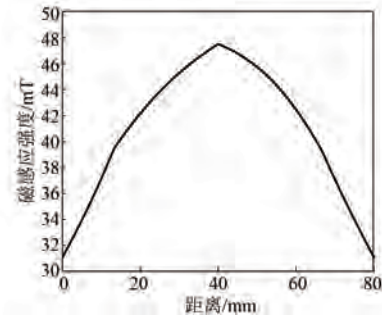


图 13 靶面上方 5 mm 处直线上的磁场强度变化曲线图

Fig. 13 Curve chart of magnetic field intensity change at a straight line 5 mm above the target surface

5 mm 处的磁场分布发现磁铁、磁轭的形状尺寸和磁轭-靶材间距对磁感应强度都有一定的影响。本文所设计的旋转阴极磁场装置中,考虑到整体结构尺寸,同时要保证结构的机械强度,所以永磁体的尺寸已经确定,磁轭伸出臂形状设计为下三角形以获得更好的磁场分布^[9],所以只能通过调整磁轭尺寸以及磁轭-靶材间距来优化磁场。当磁化强度为 400 000 A/m 时,分别对磁轭高度、伸出臂长度和磁轭-靶材间距进行参数优化,以确定磁场分布的最佳参数。优化结果均选取靶面上方 5 mm 处的磁场分布来进行讨论^[9]。

2.4.1 磁轭高度 d

由于磁轭与永磁体安装在一起,且必须保证磁轭拥有伸出臂,所以磁轭高度 d 必须大于永磁体厚度 b 与磁轭厚度 c 之和,即 50 mm。选取磁轭高度 $d = 55$ mm、60 mm 及 65 mm,磁轭高度 d 取不同数值时靶面上方 5 mm 处直线上的磁场分布情况如图 14 所示。由图 14 可知,随着磁轭高度的递增,靶面上方 5 mm 处的磁感应强度 B 逐渐下降,且曲线的峰峰值也在减小,由于磁控溅射所需磁感应强度的最佳取值范围是 20 ~ 50 mT。在图 14 中,磁轭高度为 65 mm 时,曲线相对平缓, B 由 43.1 mT 变化到 49.2 mT,峰峰值为 6.1 mT,综合考虑应该选择磁轭高度为 65 mm。

2.4.2 伸出臂长度 e

磁轭伸出臂主要是利用高导磁材料扩展磁场范围,使靶面的磁感应强度更加满足溅射要求。已知磁轭厚度为 25 mm,永磁体高度为 100 mm,所以伸出臂长度 e 最小取 25 mm,最大取 $[100 + (25 \times 2)] / 2 = 75$ mm。选取伸出臂长度 $e = 30$ mm、40 mm、50 mm 及 60 mm,伸出臂长度 e 取

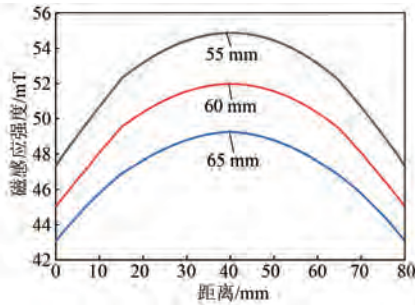


图 14 不同磁轭高度下靶面上方 5 mm 处的磁场分布
 Fig. 14 Magnetic field distribution at 5 mm above the target surface at different yoke heights

不同数值时靶面上方 5 mm 处直线上的磁场分布情况如图 15 所示。由图 15 可知,随着伸出臂长度的递增,靶面上方 5 mm 处的磁感应强度 B 逐渐下降,且曲线的峰峰值也在增大。伸出臂长度为 30 mm 时,曲线变化最平缓,且整条曲线的磁感应强度值较高,所以选择伸出臂长度为 30 mm。

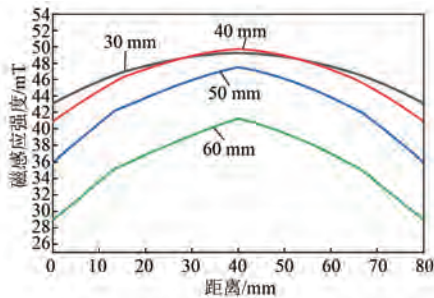


图 15 不同伸出臂长度下靶面上方 5 mm 处的磁场分布
 Fig. 15 Magnetic field distribution at 5 mm above the target surface with different extended arm lengths

2. 4. 3 磁轭-靶材间距 f

在磁控溅射装置工作时,靶材与磁轭之间的距离也会对磁感应强度产生影响。在旋转阴极磁场的装置里,需要在靶材和磁轭间安装一个靶材冷却箱,其形状为圆环,如图 3 所示,圆环高度为 150 mm,内、外圆环半径分别为 75 mm 和 90 mm,尺寸差为 15 mm,因此靶材冷却箱在靶材与磁轭之间的径向区域内至少占据 15 mm 的空间。又因为要考虑到整体结构尺寸,所以磁轭-靶材间距的取值在 15 mm 到 55 mm 之间。选取磁轭-靶材间距 $f=15\text{ mm}, 25\text{ mm}, 35\text{ mm}, 45\text{ mm}$ 及 55 mm,不同磁轭-靶材间距下靶面上方 5 mm 处的磁场分布情况如图 16 所示。由图 16 可知,随着磁轭-靶材间距的递增,靶面上方 5 mm 处的磁感应强度 B 逐渐下降,且曲线的峰峰值减小,磁轭-靶材间距

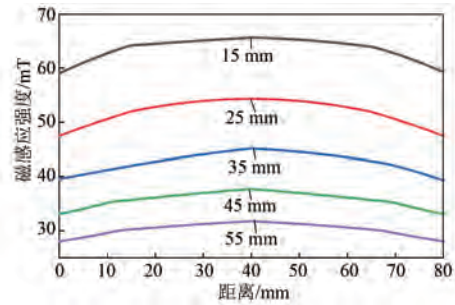


图 16 不同磁轭-靶材间距下靶面上方 5 mm 处的磁场分布
 Fig. 16 Magnetic field distribution at 5 mm above the target surface under different yoke target spacing

为 45 mm 和 55 mm 时,曲线变化均比较平缓,但 55 mm 时磁感应强度较低,不利于磁控溅射,且尺寸偏大,会导致需要增大整体结构尺寸,综合考虑选择磁轭-靶材间距为 45 mm。

结合优化后的各尺寸进行求解运算,得到二维模型的磁力线分布云图,如图 17 所示。同样选取靶面上方 5 mm 处的磁感应强度分布进行讨论^[9],并与初始尺寸下的曲线进行比较,如图 18 所示。由图可知,优化前,靶面上方 5 mm 处的磁

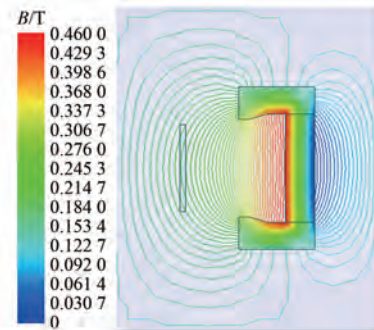


图 17 优化后磁力线分布云图
 Fig. 17 Cloud chart of optimized magnetic force line distribution

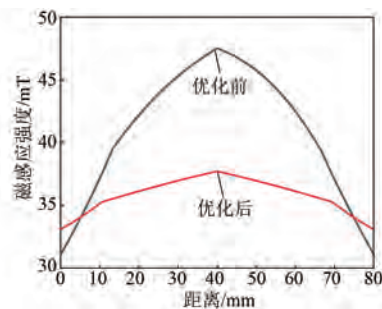


图 18 优化前后的磁场对比曲线
 Fig. 18 Comparison curve of magnetic field before and after optimization

感应强度的最大值和最小值分别为 47.6 mT 和 31.2 mT, 曲线的均匀度约为 21%; 优化后, 靶面上方 5 mm 处的磁感应强度的最大值和最小值分别为 37.7 mT 和 33.1 mT, 曲线的均匀度约为 6%。对比可见优化后的磁场分布更加均匀, 有利于保证磁控溅射的稳定运行。

3 结语

(1) 所设计的新型磁控溅射用旋转阴极磁场装置可实现永磁磁场的旋转与直线组合运动, 使得靶面阴极磁场实现旋转和变化。

(2) 应用有限元软件对阴极磁场进行模拟, 分析了磁轭高度、伸出臂长度以及磁轭-靶材间距等尺寸参数对阴极磁场的影响, 并确定优选方案。就本文研究的实例而言, 磁轭高度为 65 mm、伸出臂长度为 30 mm 且磁轭-靶材间距为 45 mm 时, 磁感应强度更加均匀, 可以有效改善靶面磁场的均匀性。优化后, 靶面上方 5 mm 处的磁感应强度曲线的均匀度由 21% 改善为 6%, 磁场分布更加均匀, 有利于保证磁控溅射的稳定运行。

参考文献

- [1] 张以忱. 真空镀膜技术与设备[M]. 1 版. 北京: 冶金工业出版社, 2014.
ZHANG Y C. Vacuum Coating Technology and Equipment [M]. 1st ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014.
- [2] FEKETE A Z, KELEMEN A, JAKAB-FARKAS L. Multilevel distributed embedded system for control of the DC magnetron sputtering process [J]. Nephron Clinical Practice, 2017, 9(1): 43-55.
- [3] ZHANG H C, PU X M, YANG H, et al. Analysis and development review of metal and metal/ceramic composite coating prepared on magnesium alloy surface [C]//2021 The International Conference on Materials Chemistry and Environmental Engineering (CONF-MCEE 2021), California, 2021.
- [4] 王居庄. 基于双辉技术的自钝化 W-Cr-Y 合金层制备与抗氧化性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
WANG J Z. Preparation and oxidation resistance of self-passivation W-Cr-Y alloy layers prepared using double glow plasma technology [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.

- [5] NAKANO T, SAITOU Y, OYA K. Transient evolution of the target erosion profile during magnetron sputtering: Dependence on gas pressure and magnetic configuration [J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 326: 436-442.
- [6] OHSTU Y, SHIGYO M, AKIYAMA M, et al. Production of radio frequency magnetron plasma by monopole arrangement of magnets for target uniform utilization [J]. Vacuum, 2014, 101: 403-407.
- [7] 陈长平, 余鹏程, 陈峰武, 等. 高靶材利用率高镀膜均匀性条形溅射靶的设计与实现[J]. 中国集成电路, 2021, 30(7): 70-73.
CHEN C P, SHE P C, CHEN F W, et al. Design and realization of high utilization and high uniformity strip sputtering target [J]. China Integrated Circuit, 2021, 30 (7): 70-73.
- [8] 薛莹洁, 陈海峰. 基于 Comsol 的双环磁控溅射靶的磁场模拟分析[J]. 人工晶体学报, 2016, 45 (6): 1696-1702.
XUE Y J, CHEN H F. Simulation analysis of magnetic field of two-rings magnetron sputtering target by Comsol [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2016, 45 (6): 1696-1702.
- [9] 杨欣蕾, 弥谦, 龚立榕, 等. 圆筒式柱面磁控溅射靶的磁场设计与仿真研究[J]. 人工晶体学报, 2021, 50(9): 1765-1773.
YANG X L, MI Q, GONG L R, et al. Magnetic field design and simulation of cylindrical magnetron sputtering target [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2021, 50 (9): 1765-1773.
- [10] 李梦飞, 叶伟, 杜鹏飞. 基于 COMSOL 的圆平面磁控溅射靶的磁场研究[J]. 电镀与涂饰, 2022, 41(16): 1189-1196.
LI M F, YE W, DU P F. Magnetic field study in circular magnetron sputtering by COMSOL [J]. Electroplating & Finishing, 2022, 41 (16): 1189-1196
- [11] 吴纯恩, 安辉, 陆艳君, 等. 旋转阴极磁场磁控溅射装置: CN202223095856.0[P]. 中国, 2023-02-28.
- [12] 王海清, 刘龙建, 胡利民, 等. 基于压电纤维复合材料的洋流能发电装置发电性能分析[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(9): 97-105.
WANG H Q, LIU L J, HU L M, et al. Performance analysis of an ocean-current generator based on macro-fiber composite [J]. Electric Machines &

- Control Application, 2020, 47 (9): 97-105.
- [13] 赵鹏. 二氧化铪薄膜的磁控溅射制备与性质研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
ZHAO P. Preparation of hafnium dioxide thin films by magnetron sputtering and study on their properties [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [14] 高宝龙. 磁控溅射共沉积 Ag-Mo 合金薄膜组织结构与性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
GAO B L. Study on the structure and properties of co-deposited Ag-Mo alloy films by magnetron sputtering [D]. Changsha: Hu'nan University, 2021.
- [15] 代豪, 萨伍提·阿卜杜热伊木, 孙春宝, 等. 磁化浸金溶液提高某低品位金矿石滴淋堆浸效果研究 [J]. 金属矿山, 2022, 3: 105-110.
DAI H, SAWUTI A, SUN C B, et al. Study on improving the effect of drip and heap leaching of a low-grade gold mines with magnetized gold leaching solution [J]. Metal Mine, 2022, 3: 105-110.
- [16] 朱邦乐. NEG 薄膜的真空性能和导电特性研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
ZHU B L. Study on vacuum properties and electrical conductivity of NEG films [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022.
- [17] 满尊海. 基于增氧曝气设备的磁化富氧装置结构优化和性能研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2022.
MAN Z H. Study on structure optimization and performance of magnetization oxygen enrichment device based on aeration equipment [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [18] 安跃军, 孟昭军. 电机系统及其计算机仿真 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
AN Y J, MENG Z J. Motor System and Computer Simulation [M]. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [19] 雷银照. 关于电磁场解析方法的一些认识 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(19): 11-25.
LEI Y Z. Reviews of analytical methods for electromagnetic fields [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19): 11-25.
- [20] 郭帆. 双靶磁控溅射过程仿真及其实验的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2022.
GUO F. Research on simulation and experiment of double target magnetron sputtering process [D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2022.
- [21] 刘继午. 基于 Ansoft 大功率牵引电机电磁场有限元分析 [J]. 电工技术, 2018, 21: 31-33+36.
LIU J W. Electromagnetic field finite element analysis of high power traction motor based on Ansoft [J]. Electric Engineering, 2018, 21: 31-33+36.
- [22] 李佳雨, 蓝益鹏. 横向磁场电励磁磁通切换磁悬浮直线电机温度场有限元分析 [J]. 电机与控制应用, 2023, 50(10): 54-61.
LI J Y, LAN Y P. Finite element analysis of temperature field of transverse magnetic field flux switched electric excited magnetic suspension linear motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(10): 54-61.
- [23] 程俊杰, 冯辉煌. S~K 波段磁调谐滤波器高温稳定性设计 [J]. 磁性材料及器件, 2023, 54(5): 41-45.
CHENG J J, FENG H Y. High temperature stability design of magnetically tuned filter of S-K band [J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2023, 54(5): 41-45.

收稿日期:2023-10-09

收到修改稿日期:2023-12-14

作者简介:

吴纯恩(1998-),男,硕士研究生,研究方向为特种电机及其控制(电磁结构设计),1370191773@qq.com;

*通信作者:齐丽君(1981-),男,硕士,高级工程师,研究方向为稀土永磁材料和真空装备的研制开发;lijun_qi@zbmag.com。

Structural Design and Magnetic Field Analysis of a Rotating Cathode Magnetic Field Device for Magnetron Sputtering

WU Chun'en¹, AN Hui¹, SU Zeda¹, LU Yanjun², DENG Wenyu³, QI Lijun^{3*}, AN Yuejun¹

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. KINGSEMI Co., Ltd., Shenyang 110169, China;

3. Shenyang General Magnetic Technology Co., Ltd., Shenyang 110179, China)

Key words: magnetron sputtering; rotating cathode magnetic field; finite element analysis; magnetic field uniformity

The basic principle of magnetron sputtering refers to the continuous bombardment of the target material surface by reactive gas ions under the action of orthogonal electromagnetic fields, causing the splashed particles to deposit on the substrate and form a thin film. This coating technology has two major characteristics: high speed and low temperature. Therefore, magnetron sputtering has been widely used in the production of various types of films, such as optical, surface modified and decorative films. With the rapid development of science and technology, the living standards continue to improve, and the requirements for magnetron sputtering coating technology and the pursuit of film quality continue to increase. However, the existing magnetron sputtering devices have design flaws in the internal structure of the magnetron cathode, which cannot provide a uniformly distributed magnetic field on the target surface, resulting in uneven sputtering etching of the target surface and the formation of a “runway” like surface contour. In areas with high plasma density, severe sputtering etching may occur, resulting in deep grooves, reducing the utilization rate of the target material and even affecting the stability of the sputtering process and film quality. Therefore, it is urgent to study the structural design of the cathode magnetic field inside the magnetron sputtering device.

This paper focuses on the problems of uneven

distribution of cathode magnetic field on the target surface during the coating process of existing magnetron sputtering devices. A new type of rotating cathode magnetic field device is designed. The device is driven externally and then driven by an internal rotating mechanism to move the magnetic field in a circular motion. At the same time, a cam mechanism is used to make the permanent magnet move up and down in a straight line, achieving the effect of magnetic field adjustment. This paper applies 3D software to draw a three-dimensional model of the device, and uses commercial finite element software to simulate and analyze the cathode magnetic field. The influence of size parameters such as yoke height, extended arm length, and yoke target spacing on the cathode magnetic field is analyzed to determine the optimal solution. As for the example studied in this paper, the magnetic induction intensity is more uniform when the height of the magnetic yoke is 65 mm, the length of the extended arm is 30 mm, and the distance between the magnetic yoke and the target material is 45 mm, which can effectively improve the uniformity of the magnetic field on the target surface. After optimization, the uniformity of magnetic induction intensity curve at 5 mm above the target surface is improved from 21% to 6%. And the magnetic field distribution is more uniform, which is beneficial to ensure the stable operation of magnetron sputtering.