

磁控溅射阴极靶磁场分布的定量评价

高方圆^{1,2}, 李光¹, 夏原¹

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 针对磁控溅射阴极靶磁场分布难以进行定量评价的问题, 提出以磁场水平分量 B_x 的平行率 R_k 为量化指标, 对磁场分布状态进行评价的新方法; 采用有限元方法, 模拟分析了磁控溅射阴极靶结构参数对磁场分布的影响规律, 并利用 R_k 对结构参数的合理性进行了验证。结果表明, 量化指标 R_k 可以有效地评价磁场分布的优劣, 能够为磁场模拟及分析提供基础的科学依据。

关键词: 磁控溅射; 磁场分布; 结构参数; 平行率

中图分类号: TB43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6264(2010)12-0153-05

Quantitative evaluation for magnetic field distribution of magnetron sputtering target

GAO Fang-yuan^{1,2}, LI Guang¹, XIA Yuan¹

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;

2. Graduate University, Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to quantitatively evaluate magnetic field distribution of magnetron sputtering cathode targets, a criterion called parallel rate R_k to the horizontal magnetic field component B_x was suggested, which was a new method to evaluate magnetic field distribution. The effects of structural parameters of cathode target on magnetic field distribution during magnetron sputtering were simulated and analyzed by finite element method, and R_k was used to make authentication for the rationality of structural parameters. The results show that quantitative criterion R_k can effectively evaluate the magnetic field distribution, and can provide the basis criterion for magnetic field simulation and analysis.

Key words: magnetron sputtering; magnetic field distribution; structural parameters; parallel rate

磁控溅射技术具有溅射速率高、基材温度低、膜基结合力强、装置性能稳定等优点, 在大面积镀膜生产中得到了广泛应用, 已成为现代镀膜工业化生产中最主要的技术之一^[1-4]。但磁控溅射存在的靶面非均匀刻蚀问题一直制约着靶的使用寿命和利用率, 且随着靶面刻蚀槽的不断加深, 放电特性及溅射粒子分布等都会有所变化, 严重影响了实验的稳定性和可重复性^[5]。

在磁控溅射系统中, 磁场由磁铁的性能和排布方式决定, 而阴极靶表面磁场强度的大小及分布决定了靶面的刻蚀。平行于靶面的磁场 B_x 和垂直于靶面的电场 E 同时作用于靶面发射出的二次电子, 使其做

旋轮线运动, 通过提高靶面附近区域的电子密度来提高电子与中性气体分子的碰撞几率, 增强离子化率, 提高溅射速率。正因如此, 在阴极靶的设计中, 要求在临近靶面的位置, 尽可能地使磁场的磁力线大范围的平行于靶面, 从而提高粒子的碰撞几率, 获得分布较为均匀的等离子体。由此可以有效提高靶面刻蚀的均匀性, 提高靶材利用率, 同时提高溅射过程的稳定性和可重复性^[6]。

国内外研究者提出了许多改进阴极磁场分布的方法^[7-12]。如, 通过改变永磁体或线圈的结构和布局, 改善磁场的静态分布方式^[7-8]; 利用机械传动装置使永磁体组合在靶材背面做一定的规律性运动, 增加靶材的溅射面积和均匀性^[9-10]; 在阴极靶的结构中加入磁部件, 以求改善磁场分布的均匀性^[11]等。目前各种改进方法对磁场的优化程度都主要依据于靶表面磁场磁通量密度分布曲线的定性分析, 缺少量化的评价方法, 而这方面的工作十分必要。因此本文提出

收稿日期: 2009-12-30; 修订日期: 2010-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(10772179)

作者简介: 高方圆(1984—), 女, 博士生, 主要从事材料表面改性方向的研究, E-mail: mormor0516@yahoo.com.cn。

通讯作者: 李光, 博士, 副研究员, E-mail: lghit@imech.ac.cn。

表征磁控靶磁场水平分量均匀程度的指标 R_k , 以此定量评价阴极靶磁场分布优劣, 为磁场的模拟和优化提供基本判据。

1 磁场量化评价方法的建立

1.1 R_k 的含义与可行性验证

本文采用内外磁钢中加入极性相反小磁钢的磁控溅射靶模型^[8], 通过有限元分析软件 ANSYS 进行

模拟计算, 获得了磁场的磁力线分布图和靶表面的磁通量密度分布曲线, 如图 1 所示。为获得靶表面磁场分布的准确解, 在网格划分时对靶面附近区域进行细化, 其它区域采取网格尺寸成梯度变化的形式, 四节点轴对称单元总数为 62800 个。由磁力线分布可知, 在多磁钢模型中, 反向磁场对靶面磁力线起到了平滑和展宽的作用, 有助于改善靶面的非均匀刻蚀。

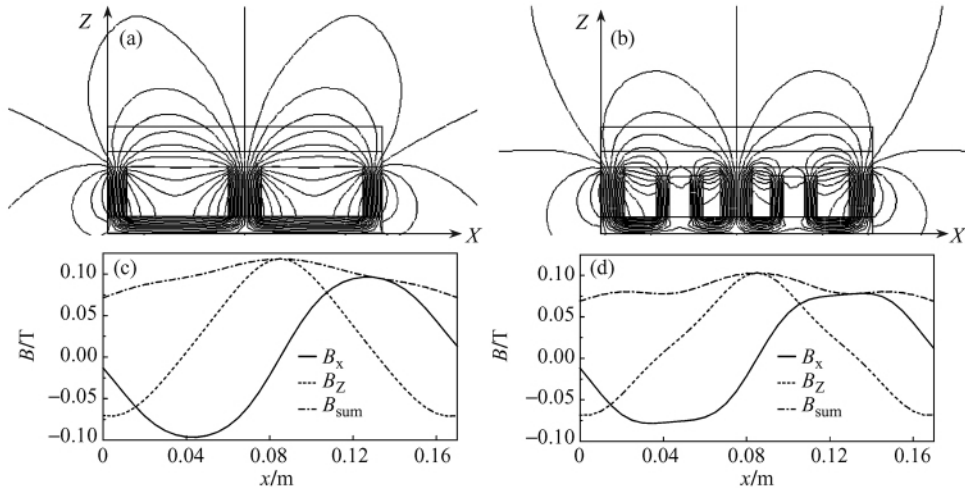


图 1 不同磁钢结构模型的磁力线与磁通量密度分布图 (a), (c) 常规模型; (b), (d) 多磁钢模型
Fig. 1 Magnetic lines distribution and magnetic flux density distribution curves for different magnet models
(a), (c) conventional mode; (b), (d) multi-magnet model

图 1 (c), (d) 表征了靶表面总的磁通量密度 B_{sum} 及其水平分量 B_x 和垂直分量 B_z 与靶截面水平坐标的关系。从图 1 中能够看出, 与常规靶相比, 多磁钢模型的水平分量 B_x 曲线峰值附近磁场梯度变小, 更不易形成窄的刻蚀槽, 据此可以定性比较出磁场分布的优劣。但定性分析有时会给磁场的评价与优化带来困难; 同时, 定性的分析结果也十分需要定量的确切数值来加以验证。

为了对磁控靶模型的磁场分布均匀性进行定量标定, 本文针对靶表面磁通量密度分布曲线的水平分量 B_x , 提出反映 B_x 与靶面方向平行程度的平行率 R_k 。这一量化指标, 具体含义为, 当 B_x 曲线斜率绝对值小于等于特定值 K 时, 曲线近似水平区域占靶截面总水平坐标区域的“比率”, 其数值计算的表达式为:

$$R_k = \frac{\int dx}{L_w} \left(\text{其中 } x \text{ 满足 } \left| \frac{dB_x}{dx} \right| \leq K \right)$$

式中 x 为靶截面水平坐标, L_w 为靶截面横向总尺寸。

为使平行率 R_k 更具有一般性和实用意义, 计算

时将靶截面水平坐标 x 和磁场水平分量 B_x 做归一化处理, 图 2 即为对图 1 (c), (d) 中的 B_x 曲线做归一化处理所得。分别选取 K 值为 0.6、1.0 和 2.0, 在图中标示出 $\int dx$ 所对应的积分区域。可以看出, 对不同模型而言, 在斜率 K 取值相同的条件下, 积分 $\int dx$ 越大, 表明磁场的 B_x 曲线在越多的靶面范围内近似水平, 磁场分布越均匀。因此, 可以通过比较量化指标 R_k 的大小来评价磁场分布的优劣, 其数值越大, 说明磁场的分布越合理, 越有利于改善靶面的非均匀刻蚀问题。

根据平行率 R_k 的数值表述, 计算得到了常规和多磁钢模型磁场水平分量的 R_k 值, 如图 3 所示。由图 3 可知, 在斜率 K 值相同的情况下, 多磁钢模型的 R_k 值明显高于常规靶, 验证了改进模型的优越性。由此表明 R_k 可以有效地评价磁场分布的优劣, 能够为后面的磁场模拟及分析提供科学判据。

1.2 R_k 中 K 的意义与选择

在用平行率 R_k 评价磁场分布优劣时, 参数 K 的

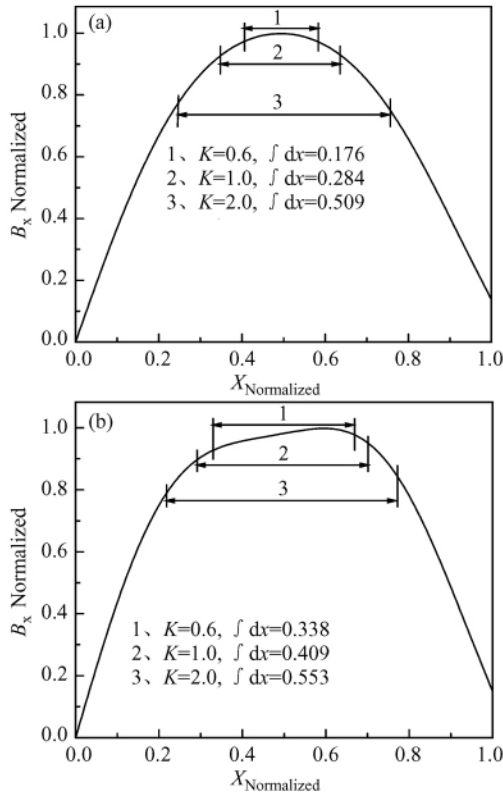


图 2 磁场水平分量 B_x 的归一化曲线

(a) 常规模型; (b) 多磁钢模型

Fig. 2 Normalized curve of the horizontal magnetic field component B_x (a) conventional mode;

(b) multi-magnet model

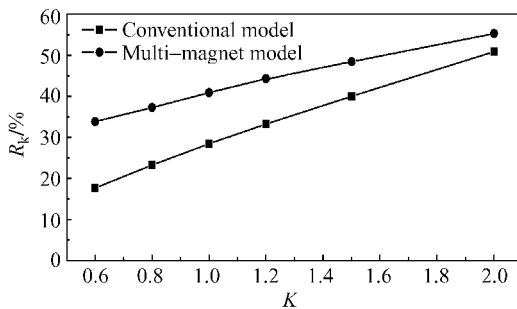


图 3 磁控靶模型的平行率 R_k

Fig. 3 Parallel rate R_k of magnetron target models

选择至关重要,因为它代表了对磁场分布均匀性要求的严格程度。斜率值取的越小,说明对“水平”的要求越严格,即对磁场梯度的要求越严格。在图 2 中,同一模型选取的 K 值越小,所对应的水平区域就越小,而 $K = 1.0$ 时所对应的 B_x 曲线可以较好地反映出磁场的均匀化程度,过大或过小的 K 值都会由于对均匀性的放松或苛求而失去工程应用的价值。并且研究表明,静态的常规矩形平面靶的靶材利用率(最

大值)大概在 20% ~ 30% 之间^[3,8],数值也基本与图 3 中 $K = 1.0$ 左右时的常规靶 R_k 值相当。由此认为在对磁场的均匀性进行评价时,选择 $K = 1.0$ 左右较为合理。而在实际工程应用中,平行率 R_k 与靶材利用率的具体对应关系还将作进一步的研究。

2 磁场模拟与结果分析

2.1 模拟计算的阴极靶模型

在图 1 多磁钢模型中,极性相反小磁钢的加入是磁场分布均匀化的关键,为了获得模型的最优化设计,同时进一步验证定量评价方法平行率 R_k 的有效性,本文采用有限元方法模拟并分析了小磁钢高度、宽度及排布间距等结构参数对磁控靶磁场分布的影响,排布间距 u, v, w 及模型各结构如图 4 所示,磁场模拟中固定不变的结构参数列于表 1 中。

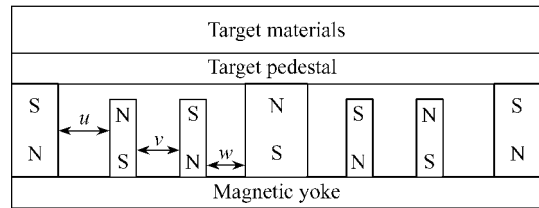


图 4 多磁钢模型的结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the multi-magnet model

表 1 多磁钢模型的结构参数

Table 1 Structural parameters for multi-magnet model

	Magnetic yoke	Out-magnet	In-magnet	Target pedestal	Target materials
Height/mm	10	30	30	10	15
Width/mm	170	12	20	170	170

2.2 结构参数对磁场平行率的影响

2.2.1 小磁钢高度

图 5 为不同小磁钢高度下得到的靶材表面水平磁场强度分布 B_x 曲线和磁场的平行率 R_k 曲线,模拟中设定小磁钢宽度为 12 mm,间距为 $u = v = w$ 。可以看出,随着小磁钢高度的减小,靶材表面的水平磁场强度逐渐增加。当高度降低为 10 mm 时,磁场分布的均匀性有所降低,但最优的小磁钢高度却很难依据 B_x 曲线定性获得。在平行率 R_k 曲线图中,当 K 值被选取为可以较好反应磁场均匀性的 1.0 左右时,小磁钢高度为 25 mm 时的 R_k 值均显现出明显的优势,在 $K = 1.0$ 时达到了 50.4%。由此表明在该参数下可以使磁力线在最大的靶面区域范围内近似平行,从而获得最优的磁场分布。

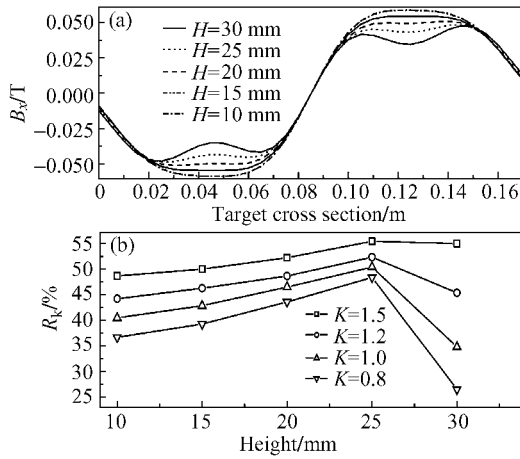


图 5 不同小磁钢高度下的 B_x 和 R_k 曲线

Fig. 5 B_x and R_k curves under different heights of small magnets

2. 2. 2 小磁钢宽度

图 6 为小磁钢宽度不同的情况下得到的靶材表面 B_x 曲线和磁场平行率 R_k 曲线。模拟中设定小磁钢高度为 25 mm, 间距为 $u = v = w$ 。随着小磁钢宽度的减小, 靶材表面的水平磁场强度逐渐增加, 但根据 B_x 曲线很难判断出磁场分布均匀性的变化。在 R_k 曲线图中, 当斜率 $K > 1.0$ 时, R_k 值随着小磁钢宽度的增加而增加, 但当 $K \leq 1.0$ 时, 宽度为 12 mm 时的 R_k 值明显高于其他情况, 而随着宽度的增加, R_k 值却迅速降低, 与 $K > 1.0$ 时相差较大。因此认为在判断磁场分布的均匀性时, 应该依从于 $K = 1.0$ 时的 R_k 值, 所以磁场分布的最优宽度是 12 mm。

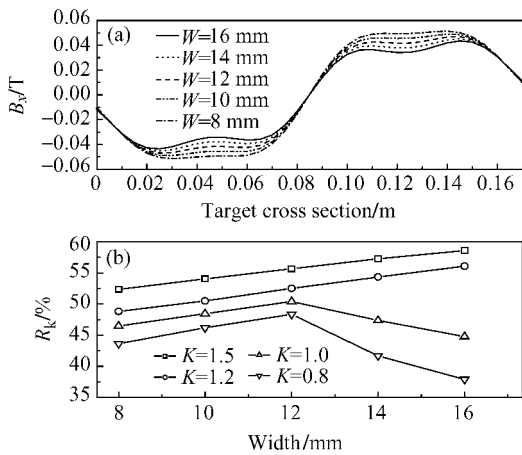


图 6 不同小磁钢宽度下的 B_x 和 R_k 曲线

Fig. 6 B_x and R_k curves under different widths of small magnets

2. 2. 3 小磁钢排布间距

图 7 是由小磁钢在内外磁钢中不同的排布间距

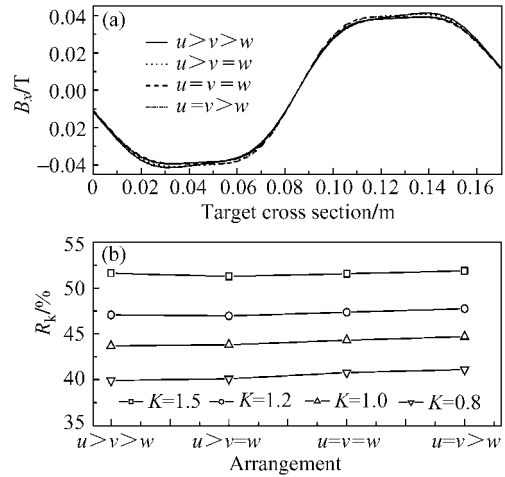


图 7 不同小磁钢排布方式下的 B_x 和 R_k 曲线

Fig. 7 B_x and R_k curves under different arrangement of small magnets

而得到的靶材表面 B_x 曲线和磁场平行率 R_k 曲线。考虑到磁场的非平衡特性, 主要讨论 $u \geq v \geq w$ 的几种情况, 即 $u > v > w$; $u > v = w$; $u = v = w$; 和 $u = v > w$, 并将小磁钢的高度和宽度分别设置为 25 mm 和 12 mm。由 B_x 曲线图可知, 小磁钢排布间距不同形成的磁场均匀性差别不大, 靶材表面的水平磁场强度也没有大的变化, 因此很难分辨出最优参数。在 R_k 曲线图中, 各种情况之间没有太大的区别, 再一次说明磁场分布的均匀性差别不大; 磁钢排布为 $u = v > w$ 时的 R_k 值略微高出其它情况, 表明此种情况下获得的磁场分布略优于其余的排布方式, 可以据此来调整小磁钢的具体位置。

2. 2. 4 磁场均匀性的主影响因素

通过对量化指标平行率 R_k 的对比分析, 获得了小磁钢高度、宽度以及排布间距的最优参数。若进一步对 R_k 做简单的方差分析则可以得到影响磁场分布均匀性的主要因素。如选取相同的 $K = 1.0$ 情况下, 分别计算得到各个结构因素的 R_k 值极差为 0.156、0.056 和 0.010; 以及均方差为 1.41×10^{-2} 、 1.78×10^{-3} 和 6.64×10^{-5} 。由此可知, 对磁场均匀性影响最大的是小磁钢的高度, 其次是宽度, 而排布间距则影响最小。

上述的模拟结果表明在采用内外磁钢中加入极性相反小磁钢的这种多磁钢模型时, 合理的选择小磁钢的高度和宽度, 以及其在内外磁钢中的排布间距都是十分重要的, 可以有效的使磁场的磁力线更大范围的平行于靶面, 改善靶面磁场分布的均匀性。同时,

采用量化指标平行率 R_k 对磁场分布的优劣进行了评价,该方法的可行性和有效性得到了进一步证实。

3 结论

1) 为定量地对磁控溅射阴极靶磁场分布的优劣进行评价,针对磁场分布的水平分量 B_x ,提出量化指标平行率 R_k ,其含义为 B_x 曲线斜率小于特定值 K 的近似水平区域占靶截面总水平坐标区域的“比率”。利用该评价方法对模型结构参数的合理性进行了验

证,结果表明量化指标 R_k 可以有效地评价磁场分布的优劣,能够为磁场模拟及分析提供基础的科学判据;

2) 采用有限元方法,对平面矩形阴极靶的磁场分布进行了优化,模拟分析了磁钢高度、宽度以及排布间距等结构参数对靶材表面磁场分布的影响规律。分析表明,小磁钢高度为 25 mm,宽度为 12 mm,排布间距为 $u = v > w$ 时可以有效增加磁场磁力线近似平行于靶面的区域范围,改善靶面磁场分布的均匀性。

参 考 文 献

- [1] Lieberman M A, Lichtenberg A J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing[M]. New York: Wiley, 1994: 465 - 470.
- [2] 杨文茂,刘艳文,徐禄祥,等. 溅射沉积技术的发展及其现状[J]. 真空科学与技术学报, 2005, 25(3): 204 - 210.
YANG Wen-mao, LIU Yan-wen, XU Lu-xiang, et al. Review of film growth by sputtering technology[J]. Vacuum Science and Technology, 2005, 25(3): 204 - 210.
- [3] 姜俊昌. 大面积反应溅射技术的最新进展及应用[J]. 真空, 2002, 39(3): 1 - 9.
JIANG Xie-chang. Development and application for large-area reactive sputtering technology[J]. Vacuum, 2002, 39(3): 1 - 9.
- [4] 杨钰瑛,孙维连,李新领,等. 采用中频反应磁控溅射技术沉积氮化锆薄膜[J]. 材料热处理学报, 2007, 28(2): 30 - 32.
YANG Yu-ying, SUN Wei-lian, LI Xin-ling, et al. ZrN films deposited by the technology of mid-frequency reactive magnetron sputtering[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2007, 28(2): 30 - 32.
- [5] 应 春,沈 杰,唐沪军,等. 高效率平面磁控溅射器的研制[J]. 真空科学与技术学报, 1996, 16(6): 402 - 408.
YING Chun, SHEN Jie, TANG Hu-jun, et al. A study of the high-efficiency planar magnetron sputtering gun[J]. Vacuum Science and Technology, 1996, 16(6): 402 - 408.
- [6] Thomas C G. Arcing problems encountered during sputter deposit Ion of aluminum[R]. White Paper, Advanced Energy Industries Incorporated, 2000: 1 - 8.
- [7] 刘翔宇,赵 来,许 生,等. 磁控溅射镀膜设备中靶的优化设计[J]. 真空, 2003, 40(4): 16 - 22.
LIU Xiang-yu, ZHAO Lai, XU Sheng, et al. Optimizing target design in magnetron sputtering deposition of thin film[J]. Vacuum, 2003, 40(4): 16 - 22.
- [8] 韩大凯,陈庆川,王经权. 磁控溅射靶的磁路设计[J]. 真空, 2007, 44(6): 14 - 17.
HAN Da-kai, CHEN Qing-chuan, WANG Jing-quan. Design of magnetic circuit of magnetron sputtering target[J]. Vacuum, 2007, 44(6): 14 - 17.
- [9] Parker, Norman W. Planar magnetron sputtering source enabling a controlled sputtering profile out to the target perimeter[P]. United States Patent: 5242566, 1993 - 07 - 09.
- [10] De Bosscher W, Lievens H. Advances in magnetron sputter sources[J]. Thin Solid Films, 1999, 351(1 - 2): 15 - 20.
- [11] German J R. Magnetron shunt for enhanced performance of sputter targets[J]. IBM Technical Disclosure Bulletin, 1993, 36(11): 414 - 418.
- [12] QIU Qing-quan, LI Qing-fu, SU Jing-jing, et al. Simulation to improve the magnetic field in the straight section of the rectangular planar DC magnetron[J]. Vacuum, 2008, 82(6): 657 - 663.