文章编号:1002-2082(2010)01-0043-04

磁约束磁控溅射源的磁场设计

弥 谦,袁建奇
(西安工业大学 陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室,陕西 西安 710032)

摘 要:磁控溅射镀膜机中的磁场分布对靶材利用率有着重要影响。为了提高磁控溅射源的靶材利用率,设计组抛弃了传统的"跑道环"形式的磁场设计理念,而是将永磁体或电磁体分置溅射靶的两侧,使其在溅射靶表面上方产生磁约束(磁镜)磁场。本设计使用有限元分析方法对磁场进行仿真计算,通过模拟磁场计算结果和实测结果的比较,验证有限元方法的可靠性。Ansys有限元分析软件对磁场分布进行仿真模拟,大大简化了计算并缩短了设计周期。通过实验验证,磁约束磁场大大提高了靶材的利用率。

关键词:磁控溅射;磁约束;磁场;有限元法
中图分类号:TN305.92 **文献标志码**:A

Magnetic design of magnetic constraint magnetron sputtering source

MI Qian, YUAN Jian-qi
(Shaanxi Province Thin Film Technology and Optical Test Open Key Laboratory,
Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: The magnetic field distribution of magnetron sputtering coating equipment has a serious effect on film coating. In order to improve the utilization ratio of target of magnetron sputtering source, we abandoned the traditional "ring" forms of magnetic field runway design concept, and put permanent magnets or electromagnet separation sputtering on both sides of the target, which generated magnetic constraints (magnetic mirror) field on the target surface. This design used finite element analysis method for magnetic field simulation calculation, and the reliability of the finite element method was verified by simulation results and measured results of magnetic field. Ansys finite element analysis software was used for magnetic field distribution simulation, calculation was simplified and design cycle was reduced. Experiment indicates that the constraint magnetic field can greatly improve the utilization ratio of target.

Key words: magnetron sputtering; magnetic confinement; magnetic field; finite element method

引言

磁控溅射镀膜是工业镀膜生产中最主要的技术之一,广泛应用于工业生产和科学研究领域[1]。生产中需特别关注靶材利用率、薄膜厚度的均匀性、沉积速率及溅射过程稳定性等方面的问题,其根本在于整个系统的优化设计,靶磁场的设计是其中的关键环节。磁控溅射阴极的磁场设计一直以来都在不断进步,其中有代表性的如:圆形平面磁控溅射源,通过合理设计磁场,使形成的跑道通过靶面中心,利用机械传动装置旋转磁体,实现靶面的全面溅射;矩形平面磁控溅射源,通过传动机构使磁体组合在靶材背面做菱形或梅花形运动,使整体靶材利用率达到61%;通过多磁路的配合调整,实现靶面低压全面刻蚀。调整磁场的结构还可以改善

收稿日期:2009-09-14; **修回日期**:2009-12-16
作者简介:弥谦(1963—),男,辽宁锦州人,教授,主要从事薄膜技术的研究工作。E-mail: miqianmi@163.com

膜厚度的均匀性。通过调整磁场的强弱比例而发展的非平衡磁控溅射技术,更是具有离子镀的功能,所以说磁路设计是磁控溅射源中最重要的部分[2-7]。

1　磁约束磁控溅射源的原理

"磁约束"即磁镜效应。磁镜效应是磁矩不变性的一个重要应用,假设有一个如图1所示的磁场,磁场由两边向中间逐渐减弱。现在来考虑一个带点粒子在这种磁场形态中运动时将发生什么情况。若带点粒子开始时处于磁场中的A点,运动速度为v_0,与磁场的夹角为θ_0,它在平行于磁场与垂直于磁场的两个方向上的速度分量分别为$v_\parallel$和$v_\perp$。当带电粒子从磁场较弱的区域向磁场较强的区域运动时,就是从图中A点运动到B点时,由于磁矩$\mu=\frac{W_\perp}{B}$是常数,而B点磁场比A点磁场强,因而在B点时的$W_\perp$应该比A点时大。$W_\perp=\frac{1}{2}mv_\perp^2$,所以说带电粒子运动到$B$点,它的垂直速度分量要增大。由于总能量$W=W_\perp+W_\parallel$是一定的,因而$W_\perp$的增大是以$W_\parallel$的减小为代价的。当带电粒子继续前进时,$W_\parallel=0$。这表明粒子的纵向速度为0,不能再继续沿磁力线前进而被反射回去,好像光线照到镜子上反射回来一样。当处于中间区域的高温等离子体沿着磁力线向两端运动时,遇到强磁场被反射回来,这样高温等离子体就可以被约束在两面"镜子"之间的中间区域而不损失掉[8]。

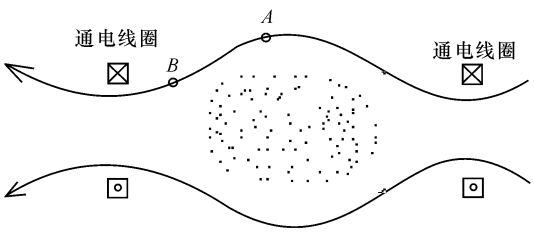
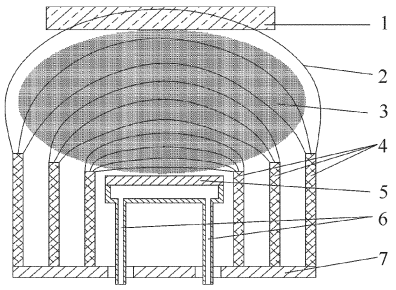


图1　磁镜装置的磁场位形

Fig. 1　Magnetic field configuration of magnetic mirror system

磁约束磁控溅射源的磁场就是基于这一原理而进行设计的。如图2所示,这一设计抛弃了传统溅射源将磁体置于靶材下方形成跑道环状刻蚀的方法,而是把永磁体放置在靶材的两侧,这样场成了中间弱两端强的磁场,即"磁镜"。



1.基片;2.磁力线;3.等离子体;4.永磁铁;5.溅射靶材;6.靶冷却系统;7.导磁体

图2　磁控溅射装置原理图

Fig. 2　Schematic diagram of magnetron puttering device

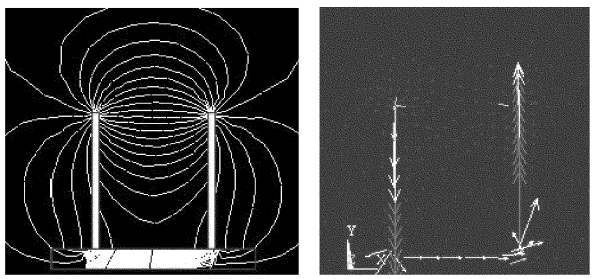
2　溅射源的磁场设计及结果分析

对于平面磁控溅射,一般要求靶表面最大水平磁通密度为20 mT～50 mT,最佳值为40 mT[9]。所以永磁体的设置应在满足最佳水平磁通密度的同时,尽量扩大磁场的范围,即溅射时增大等离子体的区域,这样等离子体还可以起到辅助沉积的作用,达到非平衡磁控溅射的效果。

磁场分析主要采取两种方法:有限差分法和有限元法。其中有限元法更为常用,本文磁场的模拟与仿真通过有限元的方法来实现。为验证模拟结果,需实际测量磁约束磁控溅射源的空间磁场分布形态以及分布值,我们采用基于霍尔效应的高斯计进行验证。

2.1　单侧单排磁铁

根据模拟结果可以看出单排磁铁的磁场强度较弱。平行于靶面的磁场是我们最想得到的,如图3(a)所示,永磁体顶部磁场平行于靶面,所以该区域为靶材放置的理想位置。图3(b)表示磁控靶上方磁场的磁通量密度,箭头的长度表示该点磁通密度的大小,箭头的方向表示磁场的方向。



(a)磁力线分布图　　(b)磁流密度矢量图

图3　磁场的模拟

Fig. 3　Finite element modelling of magnetic field

由图 4 可以看出,磁场强度低于 40 mT,所以约束起来的等离子体的数量和范围有限,这会使放电功率加大,要求较高的起弧电压和很大的 Ar 气流量,尽管如此放电效果一般,靶面的刻蚀区域只有 40%(图 5),达不到预期目标。

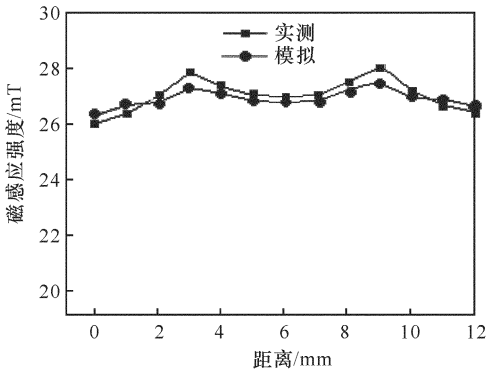


图 4　模拟结果与实测结果的对比

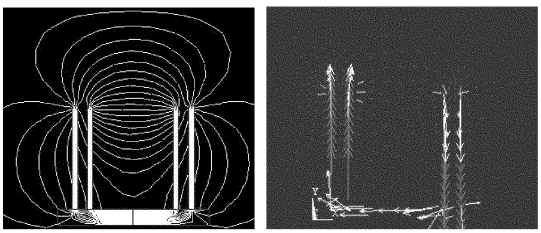
Fig. 4　Comparison between simulation results and measured results

图 5　单排磁铁实验照片

Fig. 5　The test photo of single-row magnet

2.2　单侧双排磁铁

而采用单侧双排磁铁实验效果就有很大改善(如图 8 所示)。从图 6(a)中可以看出,内部两排磁铁与单排磁铁的磁力线分布基本相同,但磁场强度却增强很大,平均场强在40 mT(图7)。外部的两排磁铁有一部分磁力线走向与内部磁铁的走向相同,而另外一部分磁力线向空间发散,这部分磁场扩大



(a) 磁力线分布图　　(b) 磁流密度矢量图

图 6　磁场的模拟

Fig. 6　Finite element modelling of magnetic field

了等离子体的范围,这部分磁场分量有效地约束二次电子运动,可以在维持稳定的磁控溅射放电的同时,另一部分电子沿着强磁极产生的垂直靶面的纵向磁场,可以使逃逸出靶面的电子飞向镀膜区域。这些飞离靶面的电子还会与中性粒子产生碰撞电离,进一步提高镀膜空间的等离子体密度,有利于提高沉积速率,带电粒子的轰击还会显著地改变膜层的微观结构,进而改善其物理特性,起到非平衡磁控溅射的效果。

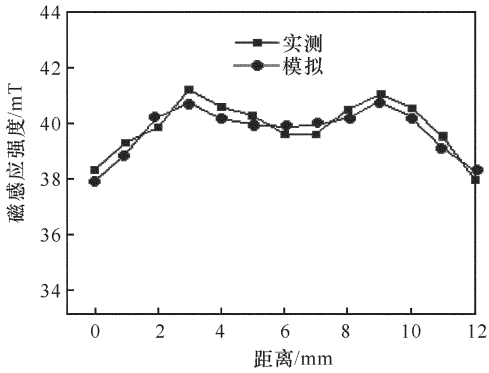


图 7　模拟结果与实测结果的对比

Fig. 7　Comparison between simulation results and measured results

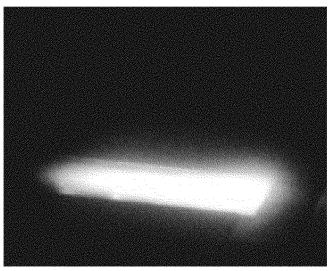
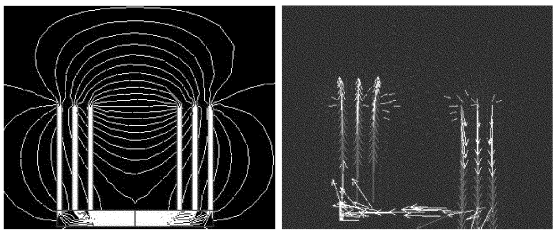


图 8　双排磁铁实验照片

Fig. 8　The test photo of double-row magnet



(a) 磁力线分布图　　(b) 磁流密度矢量图

图 9　磁场的模拟

Fig. 9　Finite element modelling of magnetic field

2.3　单侧三排磁铁

三排磁铁很大程度上加大了靶面磁场强度。由于三排之间的距离比较大(约 200 mm),所以磁场空间的范围也比较大,从而在溅射源工作时,能在很大空间上产生等离子体。但三排磁铁产生的磁场

过强(如图10),使溅射源在放电过程中产生拉弧现象,导致溅射源工作不够稳定。

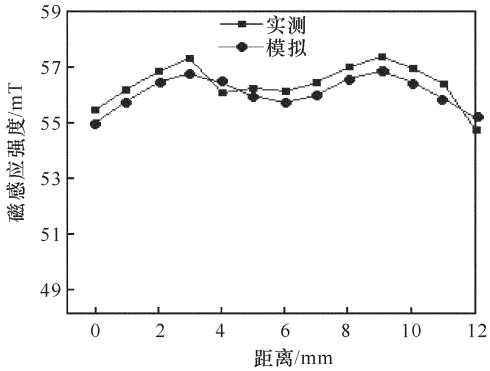


图10　模拟结果与实测结果的对比

Fig. 10　Comparison between simulation results and measured results

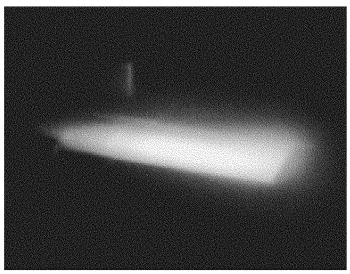


图11　三排磁铁实验照片

Fig. 11　The test photo of three-row magnet

3　结论

使用有限元法分析了磁控溅射靶的磁场,计算得到的结果与实验用磁控溅射靶磁场的测量结果基本符合。根据实验结果可知,磁约束磁控溅射源的磁场采用两排永磁体时为最优,靶面溅射均匀。在气体压强 3.1 Pa,输出电压 350 V,输出电流 0.6 A时溅射源工作最稳定,刻蚀区域面积最大,占整个靶面面积的60%以上。虽然靶材利用率得到了很大提高,但所镀光学薄膜的均匀性和致密度还没有达到预期目标,另外靶面单端溅射比较严重的问题,仍需改进。

参考文献:

[1]　徐万劲. 磁控溅射技术进展及应用[J]. 现代仪器, 2005,11(5):1-4.
XU Wan-jin. Magnetron sputtering technology progress and application[J]. Modern Instruments, 2005, 11 (5): 1-4. (in Chinese with an English abstract)

[2]　PARKER, NORMAN W. Planar magnetron sputtering source enabling a controlled sputtering profile out to the target perimeter: US, 005242566A[P]. 1993-09-07.

[3]　DE BOSSCHER W, LIEVENS H. Advances in magnetron sputter sources[J]. Thin solid Films, 1999, 351(1-2):15-20.

[4]　AVI T, JAMES V G. Magnetron for low pressure, full face erosion: US, 006228235B1[P]. 1999-03-02.

[5]　FRACH P, GOEDICKE K. Advantageous possibilities, design aspects and technical use of double-ring magnetron sputter sources [J]. Surface and Coatings Technology, 1995,75(1):85-91.

[6]　WINDOW B. Recent advances in sputter deposition [J]. Surface and Coatings Technology, 1995,71(2): 93-97.

[7]　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. The design of magnetron sputtering magnetic circuit of the target[J]. Vacuum, 2007,44(6):14-17. (in Chinese with an English abstract)

[8]　朱士尧. 等离子体物理基础[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
ZHU Shi-yao. Plasma physics[M]. Beijing: Science Press, 1983. (in Chinese)

[9]　关奎之,李云奇. 圆形平面磁控溅射靶的设计[J]. 真空,1986,23(3):36-44.
GUAN Kui-zhi, LI Yun-qi. The design of circular flat magnetron sputtering target [J]. Vacuum, 1986, 23 (3): 36-44. (in Chinese with an English abstract)