国内外磁控溅射靶材的研究进展

陈海峰，薛莹洁

（陕西科技大学 机电工程学院，西安 710021）

摘　要：磁控溅射以溅射温度低、沉积速率高的特点而被广泛应用于各种薄膜制造中，如单层或复合薄膜、磁性或超导薄膜以及有一定用途的功能性薄膜等，在科学领域以及工业生产中发挥着不可替代的作用。在介绍磁控溅射原理的基础上，阐述了靶材刻蚀机理，针对传统磁控溅射系统中靶材利用率低、刻蚀形貌不均匀等现状，从改善靶面磁场分布和模拟靶材刻蚀形貌两方面对国内外最新的研究进展进行总结与分析。研究表明，通过改变磁体的空间布置或增加导磁片能有效改善靶面磁场分布，采用适当的运动部件实现磁场和靶材的相对运动能有效扩展靶材的溅射面积，提高靶材利用率。在靶材刻蚀模拟中，通过改变溅射过程中的工艺条件（磁场强度、工作电压等）来研究靶面等离子特性，结果显示靶材刻蚀形貌会随着磁场强度的增加而变窄，靶材刻蚀速率会随工作电压的增大而增大等，这些研究成果对磁控溅射工艺参数的优化具有指导意义。最后，对靶材冷却系统的设计、靶材表面处理等对溅射过程的影响进行了简要展望。

关键词：磁控溅射；靶材刻蚀；结构优化；计算机模拟；等离子体特性；靶材冷却

中图分类号：TG174.442　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-3660(2016)10-0056-08

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.10.009

Research Progress of Magnetron Sputtering Target at Home and Abroad

CHEN Hai-feng , XUE Ying-jie

(School of Mechanic and Electronic Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi′an 710021, China)

ABSTRACT: Magnetron sputtering is widely used in manufacturing thin films such as monolayer or composite thin films, magnetic or superconducting thin films as well as some functional thin films for certain purposes, and plays an irreplaceable role in various industrial fields due to low sputtering temperature and high deposition rate. Magnetron sputtering plays an irreplaceable role in the field of science and industrial production. By illustrating etching mechanism of target based on introduction of magnetron sputtering principle, the work aims to summarize and analyze latest research progress at home and abroad from the aspects of improving magnetic field distribution on target face and simulating etch topography of target. Studies showed that, by means of adjusting the magnet spatial arrangement or increasing magnetic conductive shims, sputtering area of target and utilization of target could be expanded effectively by realizing relative movement between magnetic field and target by virtue of appropriate moving parts. In the simulation of target etching, characteristics of the plasma on the target face were studied by changing technological conditions in sputtering (magnetic field intensity, cathode voltage, etc). Results showed that the target etching morphology became narrow with the increase of magnetic field intensity, etching rate of target increased with that of working voltage, etc. All these research results are of guiding significance to technological parameter optimization of magnetron sputtering. Finally, the effects of target cooling system design and target surface treatment on sputtering are forecasted.

收稿日期：2016-03-31；修订日期：2016-04-04

Received：2016-03-31；**Revised**：2016-04-04

作者简介：陈海峰（1964—），男，博士，教授，主要研究方向为材料加工工程。

Biography：CHEN Hai-feng(1964—), Male, Doctor, Professor, Research focus: materials processing engineering.

KEY WORDS: magnetron sputtering; target etching; structure optimization; computer simulation; plasma characteristics; target cooling system

溅射镀膜是用荷能粒子轰击固体靶材，使靶材原子溅射出来并沉积到基体表面形成薄膜的镀膜技术[1]。1852 年 Grove 在实验室发现了阴极溅射现象，被公认为是真空溅射镀膜的开始。从目前来看，磁控溅射技术的发展前景十分可观，靶材温升慢、沉积速率高两大显著特点被广泛应用于各种材料薄膜的制备，有关磁控溅射各个过程的物理机制研究也显得越来越重要[2]。靶材作为真空镀膜中的主要消耗部件，其特性直接关系到薄膜质量以及镀膜的成本，故如何改进靶材性能，提高靶材的利用率成为真空镀膜生产中亟需解决的难题[3]。本文在介绍磁控溅射原理的基础上，从结构设计与优化、靶材刻蚀特性仿真等方面对国内外磁控溅射靶材的最新研究进展进行归纳，同时提出未来磁控溅射技术的发展方向。

1　磁控溅射镀膜原理和特点

如图 1 为磁控溅射镀膜的原理，其中基体与靶材平行相对，靶材接负电位，故基体相对于靶材处于正电位。在正负两极中引入磁场，电子受电场和磁场的共同影响，在洛伦兹力 $F=e(v\times B)$的作用下成摆线运动，靶材的刻蚀机理如图 2 所示，进而增加了电子和惰性气体碰撞的概率，导致氩原子的离化率大大提高，入射靶面的 Ar^+密度逐渐增加，提高了溅射速率。被溅射出来的中性原子由于不受电场和磁场的限制，飞向基板并在基板上形成薄膜。磁控溅射被应用到很多工业领域，尤其在大面积平板玻璃中的应用更为广泛。

普通的磁控溅射靶在溅射过程中只有一条很窄的刻蚀环，且传统的磁控溅射系统的磁场结构固定，靶面磁场分布不均匀，溅射速率以及薄膜沉积速率的提高空间受到限制，不一致的磁场会导致靶材的异常刻蚀及薄膜厚度分布不均，所以靶材利用率比较低。所以磁场设计的关键在于优化磁场分布和工艺条件（工作电压、溅射时间、靶材温度等）、扩展靶材溅射区域（电磁场正交区域加宽）、加强靶材的冷却效率等，从而提高靶材的利用率和溅射速率。

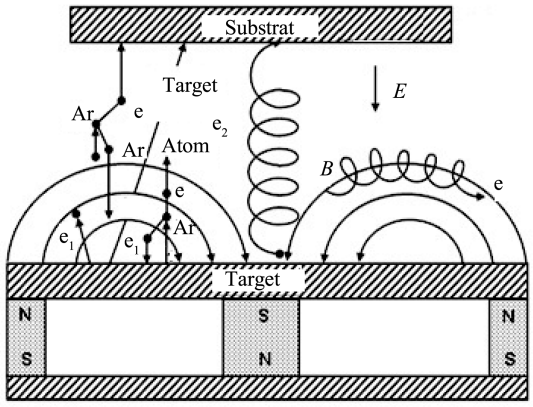


图 1　平面圆形靶磁控溅射原理

Fig.1 Planar circular target principle of magnetron sputtering

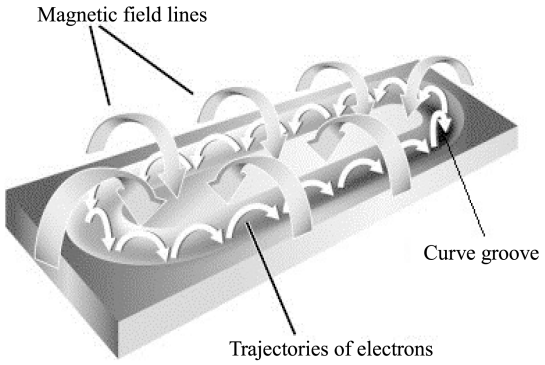


图 2　矩形靶材刻蚀机理

Fig.2 The principle of rectangle target curve

2　磁控溅射靶的结构设计与优化进展

在工业镀膜过程中，磁控溅射靶材利用率的高低直接影响镀膜成本以及薄膜特性[4]，针对靶材利用率低的问题，一些常用的改进平面靶结构的方法，如采用旋转磁场[5]增加溅射面积，或增加导磁垫片或附加永磁体来均匀磁场分布，如 SOLERAS 公司的“分流设计”，黄士勇等人发明的新型磁控溅射器等[6−7]。通过改变磁铁的相对位置或增加磁极的数量等来获得靶面理想的磁场分布，如应春等采用两块极性相对的环状磁铁[8]，Musil 提出的“具有全靶剥蚀的矩形磁控靶”结构，常天海提出的裸靶结构等[9−10]。还有学者提出移动式磁场靶结

构，可以扩展放电区内的电子跑道，使靶材刻蚀面积增加，尤其对复合型靶材的薄膜均匀性有很大的改善。

总的来说，平面磁控溅射靶的改良方案一般归纳为两种方法：一种是工业中常常采取的方法，即从结构上改善靶面水平磁场的分布，实用价值比较高；第二种是在研究领域中常常采取的方式，即通过一些动态的方法来改善靶面的水平磁场分布，如设置增加交流电磁线圈来控制磁场随时间变化，或采用机械装置使靶和永磁体成相对运动状态，或旋转靶材的制备等，这种方法效果明显，但同时也增加了制造成本，在工业中的实用价值有限。近年来，如何兼顾制造成本和靶材的利用率成为人们研究的热点，相继有很多学者提出新的靶材结构。

2.1 靶材的静态结构设计

靶材静态结构设计即通过改变磁体的空间布置或几何结构来获得理想的磁场分布，下面针对几种典型的结构进行说明。

刘齐荣等在传统安装一块导磁片的平面靶结构基础上，提出一种采用加装两导磁片的结构，通过调节导磁片间距能有效避免“波谷”出现，结构如图 3 所示，间距为 1.6 和 1.2 mm 时的磁场强度分布较理想，靶材利用率能达到 60%左右[11—13]。导磁片一般采用纯铁、低碳钢等材料，可以降低永磁体磁场的不均匀性，通过引磁的作用在靶材表面形成较均匀的磁场分布。

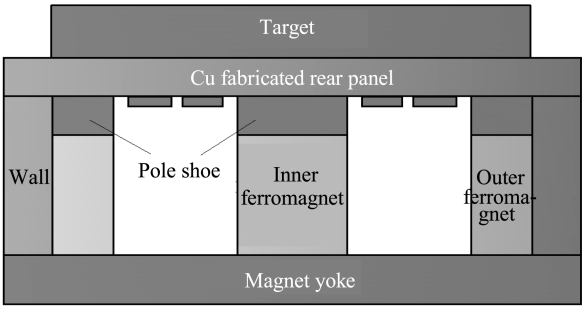


图 3 导磁片安装方式[13]

Fig.3 The installation of ferromagnetic shunt shims[13]

Yasunori Ohtsu 等[14]提出了一种不同永磁体排布结构，如图 4—5 所示。在射频磁控溅射系统中，通过调整永磁体的排布间距（分别为 10、30、70 mm）来分析靶材上方离子流分布和靶材的刻蚀深度。结果表明，Cu 靶的利用率和刻蚀速率取决于磁间隙的大小，随着磁间距的减小，靶材利用率由 31%逐步提高，当磁间隙为 10 mm 时达到最大，为 59%，因为随着磁间隙的减小，磁力线分布较密，电子的运动步长变短，从而使靶面刻蚀更均匀，但同时也会削弱靶面上方的水平磁场强度，靶的溅射速率会受到影响。

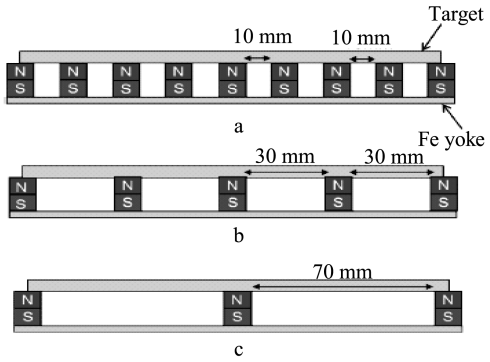


图 4 在不同磁间距下磁体的排布结构

Fig.4 Monopole magnet arrangements with different space

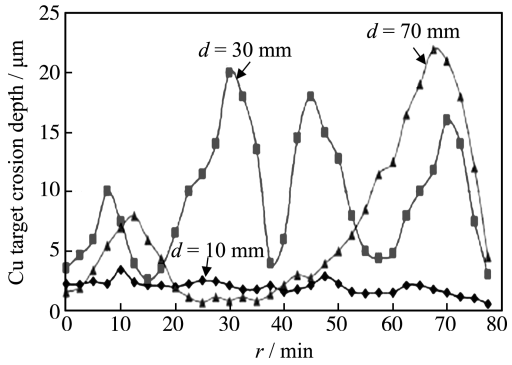


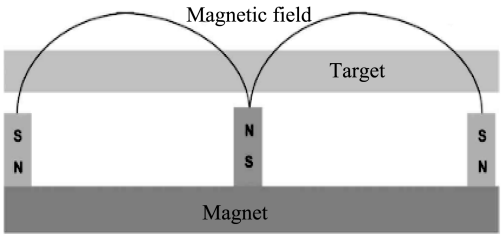
图 5 不同磁极结构下靶材刻蚀形貌的径向分布

Fig.5 Radial profiles of copper target erosion depth

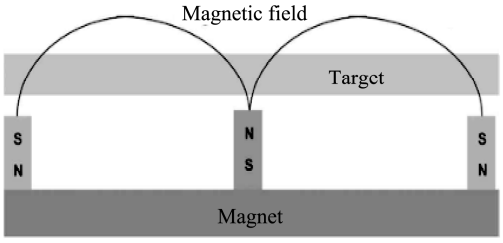
在直流磁控溅射系统中，平面矩形靶直线部分刻蚀轮廓呈高斯分布，会降低靶材利用率。Jang Sick Park[15]设计了一款结构简单、成本低的阴极装置（如图 6 所示）。在传统的阴极结构的基础上，在磁铁之间增加三块磁铁，从而在靶材的顶部实现 4 个磁场弯角，因为等离子体密度最大的区域被划分为两部分，故得到均匀的等离子体分布，改善了极端的靶材刻蚀形貌，从实验与模拟的对比结果来看，靶材利用率提高到 45%，薄膜均匀性也得以提高，如图 7 所示。

2.2 靶材的动态结构设计

对于尺寸比较大的阴极靶，一般通过改变磁体的空间布置来改善磁场分布，但对于小尺寸的靶



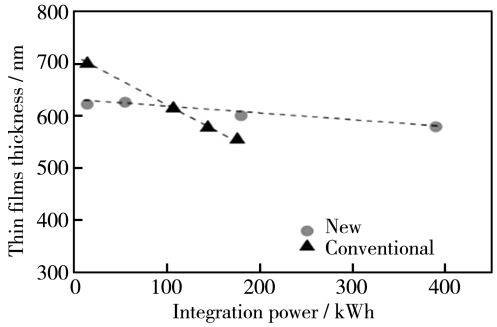
a 刻蚀深度



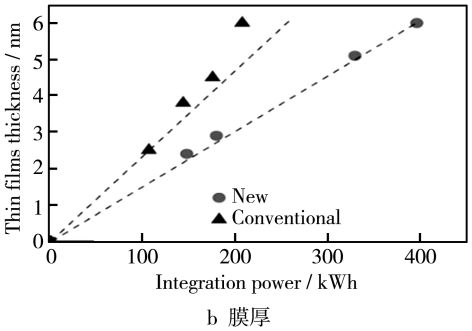
b 膜厚

图 6　不同磁铁布置下的阴极装置磁场分布情况[15]

Fig.6 Shape of magnetic fields in relation to the structure of magnets in different cathode units. (a) conventional cathode unit and (b) new cathode unit[15]



a 刻蚀深度



b 膜厚

图 7　不同阴极装置下靶材刻蚀深度和膜厚[15]

Fig.7 Variation of erosion depth (a) and deposited film thickness(b) in the sputter system with different cathode units[15]

材，改善磁场分布的方法就比较灵活，如果可以实现磁场依次周期性地分布在靶表面上，则可以实现靶材的大面积刻蚀。在 20 世纪 80 年代初期，磁控管逐步发展起来，典型的旋转靶结构如图 8 所示[17]，阴极体和靶材可以绕固定轴作一定周期的旋转运动，从而实现靶材沿表面均匀刻蚀。随后，国内外许多学者[18−20]针对旋转磁控溅射靶提出了不同的改进措施并得出了很重要的结论。比如关奎之[18]提出了类似于矩形平面溅射靶的磁场和旋转式圆柱形的靶筒组成旋转式圆柱形磁控溅射靶，张以忱[19]提出了圆柱双面矩形磁控靶，靶的溅射刻蚀区可宽达 40°角的范围，均是通过磁场和靶材的相对运动来增加靶材的刻蚀区域，但运动机构的存在必然导致靶材结构复杂化，能量耗散较多。

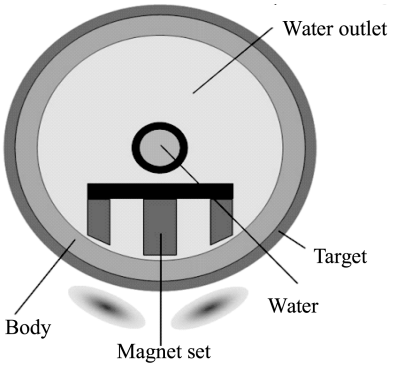


图 8　旋转磁控靶

Fig.8 The rotatable magnetron

针对旋转磁控溅射靶成本高、制造复杂的现状，近年来，陆续有学者提出了一些结构简单可靠度高的新型阴极靶结构。Takayuki Iseki[21]所提出的旋转阴极靶如图 9 所示，其中磁靴由磁轭板、外磁铁和中心磁铁组成，其中靴板是一个和镍靶同直径的环形软铁圆盘，短环形的外磁铁安装在磁轭板的边缘，中心磁铁是由 FeNdB 材料制成的永磁体，被偏心安装在磁轭板上。磁轭绕着靶的中心线旋转，并带动中心磁铁绕着靶材的中心线偏心旋转，磁力线在中心磁铁和短外磁铁之间形成闭合回路，使靶面的磁力线分布扩宽，增加了溅射面积。实验结果表示，通过调整中心磁体和外磁体的位置，该阴极结构能有效提高靶材利用率和靶材的刻蚀宽度，其中靶材利用率能达到 40%左右，而传统的靶

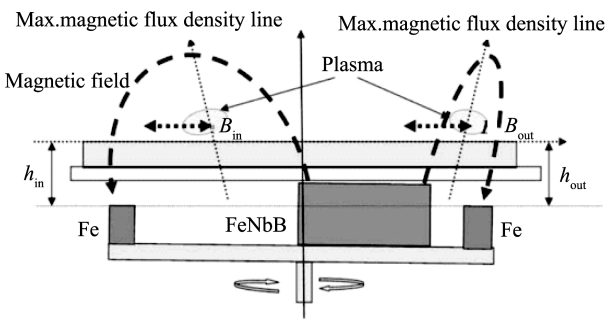


图 9　磁轭平行于靶面时磁通量的分布[21]

Fig.9 The magnetic flux at the target surface when the target yoke parallel with respect to the target surface[21]

材利用率只能达到 12%。

随后，Takayuki Iseki[22]对原有结构进行了改造，如图 10 所示。在磁轭和旋转轴之间安装楔形垫片来调节磁轭的倾斜角度，其中磁轭倾斜间隙较宽的一方靠近靶材表面。由于左边的轭隙大于右边的轭隙，所以靶材左边的磁流密度相对于靶材右边的磁流密度要弱。因此，该结构的特点在于可以通过调节磁轭的倾斜角度来控制靶材左右两边磁流密度的大小，而磁流密度的大小和靶材的刻蚀深度成正比。结果也表明，随着磁轭倾角的增加，磁流密度分布扩展且均匀性增强，刻蚀区域朝着靶材外方向变宽。

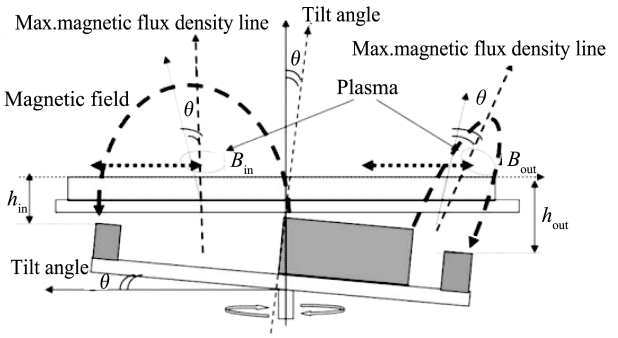
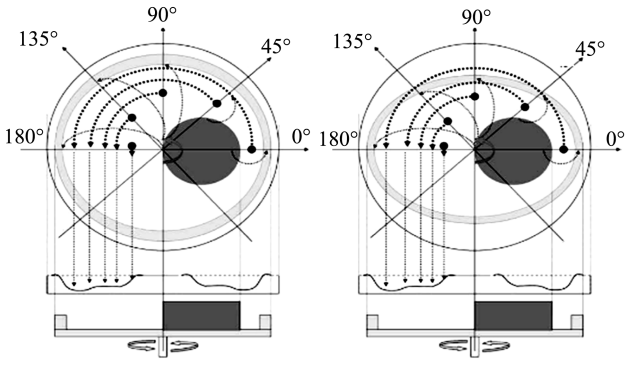


图 10　磁轭倾斜于靶面时磁通量的分布[22]

Fig.10 The magnetic flux at the target surface when the target yoke tilted with respect to the target surface[22]

同时，还比较了旋转时两种不同形状的外磁轭对靶材刻蚀形貌和利用率的影响，如图 11 所示。研究表明，当利用圆形外磁轭时，随着磁轭倾角由 0°增至 8°，靶材利用率从 60%到 80 %呈线性增加。当外磁轭是椭圆形时，靶材的平均利用率为 70 %，而与磁轭的倾角无关。在相同的磁轭角度下，椭圆形磁轭的刻蚀速率是圆形磁轭刻蚀速率的 1.2 倍，因此可以根据不同的工艺参数选择合适的磁轭倾角和外磁轭形状。



a 圆形外磁轭　　b 椭圆形外磁轭

图 11　不同外磁轭形状下旋转磁控等离子体与靶材刻蚀区域的关系

Fig.11 The relationship between the rotating magnetron plasma and the eroded target region: a) Circular outer yoke; b)Elliptical outer yoke

3　磁控溅射靶材的刻蚀模拟研究进展

靶的刻蚀形貌与靶面的水平磁场分布息息相关，因此为了控制和改良靶材的刻蚀形貌，需要对磁控镀膜溅射过程进行深入的探讨[23]。在磁控溅射过程中，工作气压、阴极电压等工艺条件都对靶材刻蚀轮廓以及刻蚀速率有重要影响。近年来，计算机模拟靶材刻蚀过程成为国内外学者们的研究热点，也为实验平台的设计提供一定的参考依据，采用计算机模拟不仅降低了研究成本，也可以直观地观察镀膜的相关物理过程[24—25]。

阴极溅射靶是真空镀膜机的心脏，靶材刻蚀特性包括靶材的刻蚀速率和刻蚀形貌，其中，靶材的刻蚀形貌可以直观反映靶材利用率[26]。实验表明：在合适的磁通密度大小范围内，靶材的刻蚀形貌对应着磁场的几何分布。

相关研究表明[27]，在一定的参数范围内，靶材表面的磁通密度和电流密度具有以下关系：

$$j=\frac{4}{9}\varepsilon_0\left(\frac{2e}{m}\right)^{1/2}\frac{V_c^{3/2}}{r_e^2} \tag{1}$$

式中：j 为放电电流密度；ε_0 为真空介电系数；V_c 为工作电压；r_e 和 m 分别为电子半径和质量。该式说明靶材的刻蚀深度与对应的磁通密度的二次方呈正比。

3.1　国外靶材刻蚀形貌研究现状

国外有关靶材刻蚀的数值分析起源较早，在 1988 年，Lan Gu 和 A. E. Wendt 等[28—29]就通过理论计算以及实验验证的方法对平面磁控放电的径向电流分布以及轴向光发射分布进行了初步探索研究，为后来的磁控放电等离子体数值分析奠定了基础。近年来，陆续有学者通过模拟等离子体特性来研究靶材的刻蚀情况[30—35]，得到了很多有意义的成果。

C. H. Shon 等[30]运用 PIC 的方法对平面磁控溅射装置进行粒子模拟，得出等离子体速率和温度的分布函数，研究结果表明，在鞘层区域分布的电子能很好地满足麦克斯韦方程，电子云的温度与实

验结果相符，且大多数离子能量范围低于给定电压的一半。Samuel D. Ekpe 等[31]建立了 3D 磁控溅射系统的粒子沉积速率模型，为保证模拟的真实性，在建模时把粒子分成快、慢两种电子模型，其中，采用 Monte Carlo 方法跟踪快电子轨迹，而慢电子则当作流体处理，研究结果表明，薄膜均匀性取决于基片的位置，而且电子的输运系数同电压、气压和靶材的材料等有关，这些参数可以通过求解电磁场正交下的玻尔兹曼方程得到。对于粒子模拟，一般采用 Monte Carlo 或 OPPIC 等方法进行求解运算，建立模型也要尽量实现溅射过程中粒子的真实运动情况，以确保结果的准确性。

另外，还可以根据靶材的刻蚀形貌进行结构的改良，如李晨光[34]利用靶材厚度与磁场强度正相关的原理，将靶材的厚度从中心到边缘依次减小，避免了局部刻蚀不均匀的现象。Praxair Mrc[35]曾提出“Sputtering Target”的技术，即在研究普通靶刻蚀形貌的基础上，设计的圆形“环状增强铝合金靶”的靶材利用率与普通靶材相比可以提高 30%左右，并且膜层质量及溅射速率等方面也得到很大的改善。

3.2　国内靶材刻蚀模拟研究进展

国内学者在对靶材的磁场模拟方面做了大量工作，但对溅射粒子的运动规律以及等离子体特性等的相关研究较少，由于模拟磁控溅射靶系统的荷电粒子的分布可以直观地观察磁控溅射靶表面的刻蚀形貌，对直流磁控溅射工艺参数具有一定的理论指导意义，因此，近些年引起国内很多学者的广泛关注，主要分为数值分析与计算机模拟两个方面。

1997 年，胡作启等[23]通过麦克斯韦方程得出了平面圆形磁控溅射靶磁场分布的数学表达式，从理论上定量地描述了靶面刻蚀形貌与磁场分布的关系，即在靶中心处的水平磁场分布较强，边缘处的垂直磁场分布较强。在数值计算中，采取适当的映射关系有利于简化计算过程，胡伟，甄淑颖等[39—40]针对铜靶刻蚀具有“饱和”特性以及靶面的溅射速率与水平磁场分布成正比，进而选择合适的溅射时间，实现了对铜靶刻蚀形貌的计算。

在平面靶研究中，运用 Monte Carlo 方法模拟电子在电磁场中的分布，靶材的刻蚀深度和离子流密度的增加成正比关系，从而得到不同分布点靶材的刻蚀深度，根据这一规律，黄英等[38]运用 Comsol 模拟了直流磁控溅射圆平面靶的荷电粒子及磁场的分布情况，比较靶面离子流密度分布曲线发现，靶材的刻蚀形貌会随着磁场强度的增强而变窄，而随阴极电压的变化较小。同时，沈向前等[26]利用 OOPIC、SRIM 等方法对放电空间磁场的分布情况，放电平衡时的带电粒子排布以及靶材表面刻蚀进行了深入分析，模拟结果表明，靶材的刻蚀深度与磁通密度成正比，刻蚀速率随工作电压的增加而增大，随工作气压的增加先增大后趋于平衡，与实际结果相符。另外，在目前比较前沿的高功率脉冲磁控溅射中，夏原，吴忠振等[41—44]结合磁控溅射等离子特性与动力学来优化和控制薄膜性能，高功率脉冲能增加惰性气体的离化程度和离子轰击靶材的强度，进而提高刻蚀速率和薄膜沉积速率，是目前提高磁控溅射效率的有效方法。

总的来说，研究靶材的刻蚀形貌事实上就是控制溅射过程的工艺参数，通过研究工作电压、磁场强度等参数与靶材刻蚀形貌的影响，优化工作参数设置，避免靶材的异常刻蚀。此外，靶材刻蚀还与工作气压、工作气体、基片温度等其他因素有关，需根据具体的工作要求选择适合的工艺参数。从目前来看，国内磁控镀膜研究的主要力量还是集中在磁场的优化设计上，针对靶材冷却系统的研究还较少[45—50]，但靶材在被刻蚀过程中引起的温度急剧升高必然会导致靶材的破坏和失效。有部分学者提出在靶的冷却系统中引入航空航天领域中应用较多的层板发汗技术[45]，Jae-Sang BAEK、Jae-Sang Baik 等[46—47]提出了运用 fluent 模拟不同矩形靶材结构下冷却效果，以提高冷却过程的湍流效果。在冷却系统中，可以在层板上采取增加流道，凸起结构或参考板式换热器的换热方式等来增加换热效果。

4　结语

磁控溅射技术由于其显著的优点成为工业镀膜的主导力量，目前磁控溅射技术与计算机技术的结合已成为研究趋势，采用计算机模拟不仅降低了研究成本，也可以直观地观察镀膜的相关物理过程，对实际生产具有重要的指导意义。在未来的研究领域中，磁控溅射技术与表面工程技术、机械工程等技术的结合成为必然趋势，如何从结构改良和表面处理着手来提高靶材表面材料特性，增加换热

效果，提高靶材利用率以及有效提高生产线换靶效率成为未来研究的方向。

参考文献

[1] 方应翠. 真空镀膜原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
FANG Ying-cui. Vacuum Coating Principle and Technology[M]. Beijing: Science Press, 2014.

[2] 石永敬, 龙思远, 王杰, 等. 直流磁控溅射研究进展[J]. 材料导报, 2008, 1: 65—69.
SHI Yong-jing, LONG Si-yuan, WANG Jie, et al. Research Advance of Direct Current Magnetron Sputtering[J]. Materials Review, 2008, 1: 65—69.

[3] 何金江, 万小勇, 周辰, 等. 半导体用高利用率长寿命溅射靶材的研制[J]. 半导体技术, 2014, (1): 71—77.
HE Wan-jiang, WAN Xiao-yong, ZHOU Chen,et al. Research and Preparation of High Utilization Rate and Long-Life Sputtering Target Used in Semiconductor[J]. Semiconductor Technology, 2014, (1): 71—77..

[4] 余东海, 王成勇, 成晓玲, 等. 磁控溅射镀膜技术的发展[J]. 真空, 2009, 46(2): 19—25.
YU Dong-hai, WANG Cheng-yong, CHENG Xiao-ling, et al. Recent Development of Magnetron Sputtering Processes [J]. Vacuum, 2009, 46(2): 19—25.

[5] 郎文昌, 高斌, 杜昊, 等. 多模式旋转磁场对电弧离子镀弧斑放电的影响分析[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(6): 662—670.
LANG Wen-chang, GAO Bin, DU Hao, et al. Effect of Magnetic Field Rotating in Multi-Mode on Arc-Spot Discharge in Arc Ion Plating[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015, 35(6): 662—670.

[6] FAN Q, CHEN X, CHEN H, et al. Film Deposition with a Facing Magnets Magnetron Sputtering Method[J]. Journal of Vacuum Science & Technology, 1993, 11(6): 3130— 3132.

[7] 黄士勇, 曲凤钦, 苗晔, 等. 高靶材利用率的新型磁控溅射器[J]. 真空科学与技术学报, 2000, 20(2): 49—51.
HUANG Shi-yong, QU Feng-qin, MIAO Ye, et al. D evelopment of Cylindrical Rotating Magnetrons with High Target Utilization Rate[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2000, 20(2): 49—51.

[8] 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, 1996(6): 402—408.
YING Chun, SHEN Jie, TANG Hu-jun, et al. A Study of the High-efficiency Planar Magnetron Sputtering Gun[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 1996(6): 402—408.

[9] MUSIL J. Rectangular Magnetron with Full Target Erosion[J]. Vacuum Science Technology, 1999, 17 (2): 555—563.

[10] 常天海. 高磁场强度的矩形平面磁控溅射靶的设计[J]. 真空与低温, 2003, 9(1): 17—20.
CHANG Tian-hai. The Desigh on Rectangular Planar Magnetron Sputtering Target with the High Intensity of Magnetic Field[J]. Vacuum & Cryogenics, 2003, 9(1): 17—20.

[11] 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: 657—663.

[12] 赵嘉学, 童洪辉.磁控溅射原理的深入探讨[J]. 真空, 2004, 41(4): 74—79.
ZHAO Jia-xue, TONG Hong-hui. An Analysis in Depth for the Principle of Magnetron Sputtering[J]. Vacuum, 2004, 41(4):74—79.

[13] 刘齐荣, 董国波, 高方圆, 等. 平面磁控溅射靶磁场的模拟优化设计[J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(12): 1223—1228.
LIU Qi-rong, DONG Guo-bo, GAO Fang-yuan, et al. Simulation and Optimization of Magnetic Field for Planar Magnetron Sputtering Target[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2013, 33(12): 1223—1228..

[14] OHTSU 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.

[15] PARK J S, PARK L S, LEE Y S, et al. Cathode Unit of Magnetron Sputter for High Target Utilization[J]. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 2009, 514: 201—208.

[16] ROSSNAGEL S M, KAUFMAN H R. Langmuir Probe Characterization of Magnetron Operation[J]. Journal of Vacuum Science & Technology, 1986, 4(3): 1822—1825.

[17] BRUER G, SZYSZKA B, VERGHL M, et al. Magnetron sputtering Milestones of 30 Years[J]. Vacuum, 2010, 8412: 1354—1359.

[18] 关奎之. 旋转式圆柱形磁控溅射靶的磁场计算[J].真空, 1997(3): 5—11.
GUAN Kui-zhi. Magetic Field Calculation of Revolving Cylindric Magnetron Sputtering target[J]. Vacuum, 1997 (3): 5—11..

[19] 黄英, 张以忱. 圆柱旋转双面矩形磁控溅射靶磁场的设计计算[J]. 真空与低温, 2001, 7(4): 233—237.
HUANG Ying, ZHAN Yi-chen. The Design and Calculation of Magnetic Field in the Rotary Column Double Magnetron Sputtering Target[J].V acuum & Cryogenics, 2001, 7(4): 233—237.

[20] NADEL S J, GREENE P, RIETZEL J, et al. Advanced Generation of Rotatable Magnetron Technology for High Performance Reactive Sputtering[J]. Thin Solid Films, 2006, 502: 15—21.

[21] ISEKI T. Target Utilization of Planar Magnetron Sputtering Using a Rotating Tilted Unbalanced Yoke Magnet[J]. Vacuum, 2009, 842: 339—347.

[22] ISEKI T. Completely Flat Erosion Magnetron Sputtering Using a Rotating Asymmetrical Yoke Magnet[J]. Vacuum, 2010, 8412: 1372—1376.

[23] 胡作启, 李佐宜, 熊锐, 等. 磁控溅射靶磁场的分布[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 1997(11): 43—45.
HU Zuo-qi, LI Zuo-yi, XIONG Rui, et al. Distribution of Target Magnetic Field in the Magnetron Sputtering System[J]. J Huazhong Univ of Sci & Tech, 1997(11): 43—45.

[24] 邱清泉, 励庆孚, 苏静静, 等. 平面直流磁控溅射放电等离子体模拟研究进展[J]. 真空科学与技术学报, 2007(6): 493—499.
QIU Qing-quan, LI Qing-fu, SU Jing-jing, et al. Progress in Discharge Plasma Simulation of Planar DC Magnetron Sputtering[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2007(6): 493—499.

[25] FAN Q H, GALIPEAU D, ZHOU L Q, et al. Computer-aided Development of a Magnetron Source with High Target Utilization[J]. Vacuum, 2010, 85: 833—838.

[26] 沈向前, 谢泉, 肖清泉, 等. 磁控溅射靶材刻蚀特性的

模拟研究[J]. 真空, 2012, 49(1): 65—69.
SHEN Xiang-qian, XIE Quan, XIAO Qing-quan, et al. Computer Simulation of the Target Etching Characteristics in Magnetron Sputtering[J]. Vacuum, 2012, 49(1): 65—69.

[27] KUWAHARA.Application of the Child-Langmuir Law to Magnetron Discharge Plasmas[J].Plasma Science, 2002, 22(4): 442—448.

[28] GU LAN, LIEBERMAN M A. Axial Distribution of Optical Emission in a Planar Magnetron Discharge[J]. J Vac Sci Technol A, 1988, 6: 2960—2964.

[29] WENDT A E, LIEBERMAN M A, MEUTH H. Radial Current Distribution at a Planar Magnetron Cathode[J]. J Vac Sci Technol A, 1988, 39(5): 1827—1831.

[30] SHON C H, LEE J K. Modeling of Magnetron Sputtering Plasmas[J]. Applied Surface Science, 2002, 192: 258—269.

[31] EKPE S D, BEZUIDENHOUT L W, DEW S K. Deposition Rate Model of Magnetron Sputtered Particles[J]. Thin Solid Films, 2004, 474: 330—336.

[32] KUSUMOTO Y, IWATA K. Numerical Study of the Characteristics of Erosion in Magnetron Sputtering[J]. Vacuum, 2004, 74: 359—365.

[33] ZUBIZARRETA C, BERASATEGUI E G, CIARSOLO I, et al. The Influence of Target Erosion Grade in the Optoelectronic Properties of AZO Coatings Growth by Magnetron Sputtering[J]. Applied Surface Science, 2016, 147: 1—5.

[34] 李晨光.磁控溅射靶材及磁控溅射装置.中国: CN204022932U[P].2014-12-17.
LI Chen-guang. Magnetic Sputtering Target and Device. China: CN204022932U[P]. 2014-12-17.

[35] MEIDLINGER T, MARX D R, BLANCHET J P. Enhanced Targets Can Reduce Metallisation Cost of Ownership[J]. Semiconductor Febtech, 2002, 12: 255—264.

[36] 弥谦, 雷琳娜, 袁建奇. 磁约束磁控溅射源的工作特性测试[J]. 西安工业大学学报, 2010, 30(1): 17—20.
MI Qian, LEI Lin-na, YUAN Jian-qi. Characteristics of Magnetic Confinement Sputtering Target Source[J].Journal of Xi′an Technological University, 2010, 30(1): 17—20.

[37] 弥谦, 袁建奇. 磁约束磁控溅射源的磁场设计[J]. 应用光学, 2010, 31(1): 43—46.
MI Qian, YUAN Jian-qi. Magnetic Design of Magnetic Constraint Magnetron Sputtering Source[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(1): 43—46.

[38] 黄英, 李建军, 张以忱, 等. 直流磁控溅射中矩形平面靶刻蚀形貌的数值计算及优化[J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(11): 1206—1214.
HUANG Ying, LI Jian-jun, ZHANG Yi-chen, et al. Simulation and Optimization of DC Magnetron Sputtering Conditions of Rectangular Target[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2014, 34(11): 1206—1214.

[39] 甄淑颖, 陈倪娇, 唐光泽, 等. 磁控溅射铜靶材的刻蚀行为[J]. 金属热处理, 2013, 38(2): 99—102.
ZHEN Shu-ying, CHEN Ni-jiao, TANG Guang-ze, et al. Etched Behavior of Cu Target in Magnetron Sputtering[J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(2): 99—102..

[40] 胡伟, 王人成. 磁控溅射设备中铜靶刻蚀形貌的仿真计算研究[J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32(10): 907—912.
HU Wei, WANG Ren-cheng. Simulation of Surface Morphology Evolution of Sputtered Copper Target[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2012, 32(10): 907—912.

[41] 夏原, 高方圆, 李光. 高功率脉冲磁控溅射等离子体特性与动力学研究进展(英文)[J]. 中国科学院大学学报, 2015(2): 145—154.
XIA Yuan, GAO Fang-yuan, LI Guang. Plasma Characteristics and Dynamics in a High Power Pulsed Magnetron Sputtering Discharge[J]. Journal of University of Chinese Academ-y of Sciences, 2015(2): 145—154.

[42] 李小婵, 柯培玲, 许辉, 等. 复合高功率脉冲磁控溅射放电等离子体特性[J]. 真空, 2015(1): 4—8.
LI Xiao-chan, KE Pei-ling, XU Hui, et al. Plasma Characteristics of Hybrid High Power Impulse Magnetron Sputtering Discharge[J]. Vacuum, 2015(1): 4—8..

[43] 李小婵, 柯培玲, 刘新才, 等. 复合高功率脉冲磁控溅射 Ti 的放电特性及薄膜制备[J]. 金属学报, 2014(7): 879—885.
LI Xiao-chan, KE Pei-ling, LIU Xin-cai, et al. Discharge Characteristics of Ti and Film Preparation Using Hybrid High Power Lmpulse Magnetron Sputtering[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014(7): 879—885.

[44] 吴忠振,田修波,李春伟,等. 高功率脉冲磁控溅射的阶段性放电特征[J]. 物理学报,2014(17):204—212.
WU Zhong-zhen,TIAN Xiu-bo,LI Chun-wei,et al.Phasic Discharge Characteristics in High Power Pulsed Magnetron Sputtering[J].Acta Physica Sinica,2014(17):204—212.

[45] 关亚兰, 崔秀清, 刁训刚, 等. TX1800 磁控溅射镀膜机冷却系统的改进[J]. 真空与低温, 2012, 49(5): 62—64.
GUAN Ya-lan, CUI Xiu-qing, DIAO Xun-gang, et al. Improvement the Cooling System for TX1800 Magnetron Sputtering Machine[J].Vacuum & Cryogenics, 2012, 49(5): 62—64.

[46] BAEK J S, KIM Y J. Cooling Effect Enhancement in Magnetron Sputtering System[C]//The Fifth International Conference on CFD in the Process Industries CSIRO. Australia: 2006: 13—15.

[47] BAIK J S, KIM Y J. A Study on the Heat Transfer Enhancement in Magnetron Sputtering System[C]//Proceedings of HT2007 2007 ASME-JSME Thermal Engineering Summer Heat Transfer Conference. Canada: 2007: 8—12.

[48] YANG Y T, LAI F H. Numerical Investigation of Cooling Performance with the Use of Al_2O_3 Water Nanofluids in a Radial Flow System[J].International Journal of Thermal Sciences, 2011, 50: 61—72.

[49] CHIAD B T, KHALAF M K, KADHIM F J, et al. Characteristics and Operation Conditions of a Closed-Field Unbalanced Dual Magnetrons Plasma Sputtering System.Open Access Library Journal, 2014, 1: 1—7.

[50] 闫清泉, 王国栋, 王庆生, 等. 磁控溅射旋转阴极的换热计算与流固热耦合分析[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(10): 1276—1281.
YAN Qing-quan, WANG Guo-dong, WANG Qing-sheng, et al. Simulation of Heat Transfer in Water-Cooled Rotary Cathode in Magnetron Sputtering Reactor[J].Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015, 35(10): 1276—1281.