

文章编号: 1005-5630(2001)5/6-0063-05

磁控溅射工艺控制模式比较*

郑舒颖, 陈少扬

(中南实业国际(深圳)有限公司, MT8 广东 深圳 518129)

摘要:对各种磁控溅射的工艺参数控制技术进行比较,分析各自的特色,并指出光学厚度监控对于制备精密光学多层膜的反应溅射工艺的重要性。

关键词:反应磁控溅射; 溅射工艺控制; 电介质薄膜

中图分类号: O484.4 **文献标识码:** A

Evaluation of various process control modes in reactive magnetron sputtering

ZHENG Shu-ying, CHEN Shao-Yang

(Chung Nam International Industry (Shenzhen) Co. Ltd., MT8, Shenzhen 518129, China)

Abstract: Various process control modes in reactive magnetron sputtering were evaluated. As indicated in this paper, optical thickness monitoring was much more important in the precision optical multilayer production by reactive sputtering processes.

Key words: reactive magnetron sputtering; sputtering process control; dielectric thin films

1 引 言

磁控溅射技术制备金属化合物,尤其是电介质时,常会遇到一些问题:弧光放电(即打火, arcing), 阴极中毒, 以及阳极隐没(disappearing anode)等。为了改善磁控溅射稳定性和重复性,提高沉积率,近十年来,在溅射电源设计和工艺过程控制方面,进行了许多研究与开发工作,若干新型电源,如中频交流(MF)和双极脉冲直流(Bi-polar pulsed DC)电源,和工艺监控仪器(如 Plasma Emission monitor 和 Reactive Gas-Flow Controller)相继面世。现在磁控溅射技术已发展到相当成熟和精致的阶段。溅射设备生产低发射涂层的年产量可达到几百万平方米^[1], MF 溅射工艺也已成功制造出层数达几十层的高精度光学薄膜滤光片^[2]。

反应磁控溅射等离子体放电的稳定性不仅与电源供电方式(RF, DC 或 MF)有关,也与阴极表面的化学状态有关。在实验中,后者反映在阴极的电压和反应气体的消耗量与反应气体流量之间的非单调函数关系,即电压或气压随反应气体流量变化的滞回特性。出现这种现象的主要原因是靶面上形成一层绝缘化合物。只有降低反应气体的流量,才能逐渐地恢复靶面的金属状态^[3,4]。

许多 MF 磁控工艺过程的控制方式是基於对阴极特性的认识,试图抑制反应气体流量或分压强的变

* 收稿日期: 2000-08-30

作者简介: 郑舒颖(1940-),男,福建人,教授级高级工程师、硕士,长期从事光学薄膜理论、器件和材料研究,近年侧重于离子束辅助沉积,双离子束溅射和反应磁控溅射的光学多层薄膜的制备技术的开发。

化引起溅射过程的波动,力求薄膜沉积率的稳定,并有较大的提高。现在流行的五种工艺监控模式或仪器:

(1)等离子体发射监控仪^[5](Von Ardenne Anlagentechnik GmbH)。

(2)放电阻抗控制模式^[5](Von Ardenne)。

(3)Lambda 探针^[1,6](Leybold Systems GmbH)。

(4)反应气体流量控制^[7](Advanced Energy Industries Inc.)。

(5)OGC 分压强控制模式(Leybold Inficon, Inc.)。

前四种控制设备可实现闭环监控功能。例如,等离子体发射光谱监控仪能控制溅射电源的功率,或控制压电阀的气体流量,使等离子体发射光谱达到预定的数值。Lambda Probe 控制方式较独特,它既要求 O₂ 的流量稳定,也监控 O₂ 的分压强,使之稳定,达到稳定沉积率的目的。OGC 控制仪的不足之处在于它不能与电源构成闭环的控制回路;另外,它探测的是气体的电子激发光谱,而非直接观察溅射等离子体光谱,所以不能探测到溅射金属离子的浓度。现将各种工艺控制模式分述如下。

2 工艺控制

2.1 等离子体发射监控仪(Plasma Emission Monitor—PEM)

该仪器直接测量靶和基底之间的气体放电等离子体光辐射的特征谱线(Characteristic Spectral lines)的强度,获得溅射过程的实时资讯(in-situ information),例如金属靶的溅射率和反应气体的分压强。在 PEM 中,反应气体的流量被作为特征谱线强度的函数得到监控(图 1)。监控操作的时间常数很小,因为采用石英光纤直接探测靶与基片之间的等离子体发射光谱,反应气体通过快速压电控制阀被引入靶的近处。这种监控方式还可以稳定反应溅射的工作点,哪怕工作点处于依靠流量控制模式无所作为的工作区域。该仪器也可以选择以溅射电源功率为控制目标。

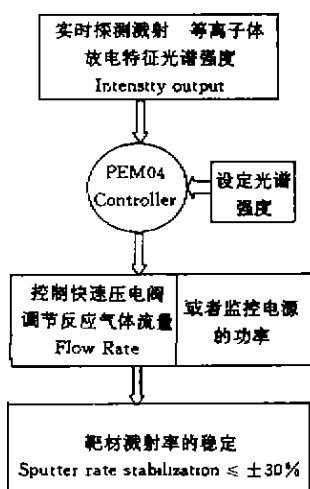


图 1 等离子体发射监控流程

功能特点:

(1)反应气体入口和光谱样品点紧靠阴极放电区,所以控制的时间常数极小(20ms)。控制灵敏度很高,因为靶材的原子特征光谱强度对于材料的溅射率和反应气体分压强变化高度敏感。

(2)适于制备具有确定化学组成和物化性质的化合物涂层。在靶—基片距离较短情况下,能保证反应溅射工艺的工作点稳定,既能防止靶中毒,又能维持确定化学成份下的较高的薄膜沉积率。

(3)PEM 设备的控制容量很大,允许同时控制 16 个靶,即每一个 PEM05 软件可管理 4 块 PEM05 测量电路板,而每块可以控制 4 路测量通道。所以此设备可用元件的双面镀膜和多源大面积均匀涂层的生产工艺。

(4)该仪器亦可用于放电阻抗控制。

2.2 放电阻抗控制模式

PEM 控制仪也适用于阻模式,对于一些靶材,如 Si 和 Al,当氧气通入时,等离子体放电的阻抗明显降低。此时最好采用阻抗控制模式,即在放电功率恒定的前提下,调节 O_2 的流量以改变放电阻抗,使放电电压保持在预先设备的水平(图 2)。此种控制模式,适用的电压范围很广,PEM 控制仪也可以当作阻抗控制单元。

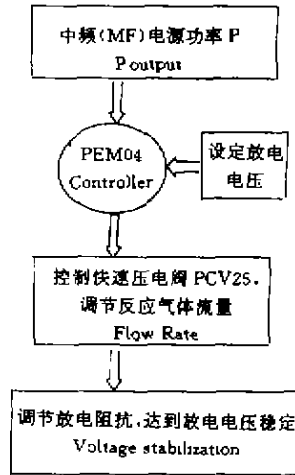


图 2 放电阻抗控制流程

2.3 Lambda 探针

根据气相化学反应动力学理论,薄膜的沉积率 R_d 正比于反应气体的浓度,后者又正比于流入和流出的反应气体流量(Q_{in} 和 Q_{out})之差,即

$$R_d \sim (Q_{in} - Q_{out})$$

只要保持流入的流量 Q_{in} 和被真空泵抽走的反应气体流量 Q_{out} 的稳定,就可维持沉积率稳定。 Q_{out} 正比于该气体的分压强 P_{O_2} ,换言之,若要保持 Q_{out} 稳定,就得保持分压强的稳定。Lambda Probe 通过调节 MF 电源的功率输出,使反应气体的分压强得以稳定(图 3)。这是 Legbold Systems 公司目前采用的方法。

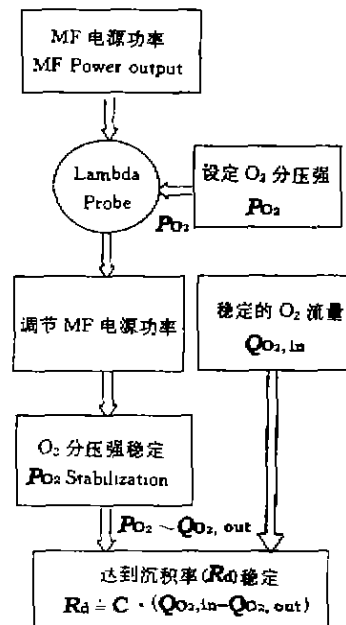


图 3 Lambda 探针监控流程

2.4 反应气体流量控制

这实质上 and 放电阻抗控制是同一回事。靶面的氧化或中毒引起放电阻抗变化是现象的起因。AE 公司采用 MKS 250E (MKS Instruments)、PCV 25 快速压电阀门 (Von Ardenne), 和 MF 电源, 搭成闭环控制回路 (图 4)。

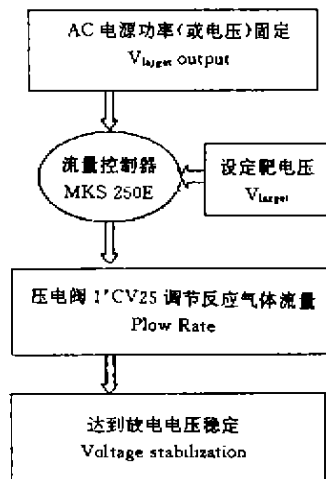


图 4 气体流量控制流程

2.5 OGC 分压强控制仪

该仪器首先测量真空室中气体的放电光谱强度, 根据不同气体的特征光谱强度, 确定气体的分压强, 并与预先设定的分压强作比较; 再反馈到 OGCI 分压强控制仪, 令其控制压电陶瓷阀门, 调节反应气体流量, 使分压强稳定在设定数值上 (图 5)。有独立的气体放电室与溅射室相连, 无法测量溅射区域的等离子体光谱和溅射粒子的浓度。这是一种独立的控制仪器, 不能与溅射电源连接, 实现放电特性闭环监控。实际上, 影响分压强的不仅是气体的流量, 还有真空室内壁和工件表面放气的影响。

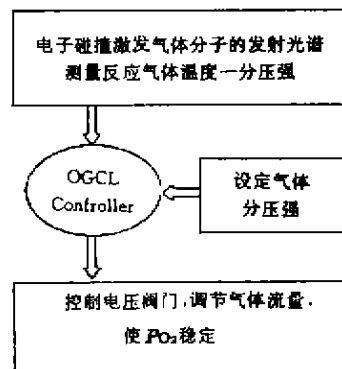


图 5 OGCI 分压强控制流程

3 光学厚度监控

以上通过对放电等离子体的放电参数的调控, 达到阴极放电特性稳定, 也使得打火 (arcing) 效应减到最小程度。但是, 调控速度取决于所采用控制膜式的时间常数, 往往存在调控滞后的现象, 滞后时间可能长达若干秒; 另外, 由于等离子体振荡现象存在, 微打火无法完全避免。这些问题对薄膜的淀积率、化学组成, 以及折射率都有影响, 所以采用反应磁控溅射工艺制造精密的光学多层薄膜时, 薄膜的光学厚度监控是必要的。

4 结束语

上述的前 4 种工艺控制模式, 都有稳定阴极的放电特性的作用, 而 PEM 和 Lambda Probe 还有稳定

的薄膜沉积率的直接功能,对大批量的较复杂的多层薄膜生产有好的效果。就基本原理而言,这五种监控模式可以归纳为三类:第一类,气体放电发射光谱测量,等离子体发射监控仪和 OGC 分压强控制器都基于这个测量原理;其次,放电阻抗控制,包括上述的模式二和四,通过调节反应气体流量达到放电阻抗和阴极电压稳定。这类监控仪器结构比较简单,价格也较低,特别适用于 Si 和 Al 靶材溅射工艺,此类靶材放电阻抗变化如此大,使得靶面由金属态转为氧化态时,会产生 200V(Si)或 300V(Al)的阴极电压变化;而对 Ti 和 Zr 靶相应的电压变化只有几十伏。第三类,控制反应气体消耗,达到薄膜沉积率恒定,这是 Lamda Probe 采用的方法,已被用在大批量面积的溅射涂层的生产线上。反应磁控溅射工艺制备精密的光学多层薄膜时,光学厚度监控是很必需的。

5 参考文献

- [1] H Schilling et al. . New layer system family for architectural glass based on TwinMag™ sputtered TiO₂. A Technical Report by Leybold Systems GmbH.
- [2] B T Sullivan et al. . New High - rate automated deposition system for the complex coatings - 1 [J]. System description in Optical Interference Coatings, 1998, 9: 72~74.
- [3] S M Rossnagel et al. . Handbook of plasma processing technology [M]. New Jersey: Noyes Publications, 1990: 233.
- [4] Kari Koski, Voltage controlled reactive sputtering process for aluminum oxide thin films [J]. Thin Solid Films, 326 1998, 326: 189~193.
- [5] J Strumpfel et al. . Reactive dual magnetron sputtering of oxides for large area production of optical multilayers [J]. 40th Annual Technical Conference Proceedings of the Society of Vacuum Coaters, 1997: 179~182.
- [6] J Szczyrbowski et al. . Some properties of TiO₂ layers prepared by medium frequency reactive sputtering [J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 112: 261~266.
- [7] L Lou et al. . Closed loop controlled reactive dual magnetron sputtering [J]. J Vac sci. Technol , 1988