

高磁场强度的矩形平面磁控溅射靶的设计

常天海

(华南理工大学 电信学院, 广东 广州 510640)

摘要: 研究利用高磁场强度实现低电压磁控溅射的可能性;通过理论分析、实际设计和实验,分析了限制矩形平面磁控溅射靶表面水平磁场强度 B 的上限的几个因素;设计出了 B 为 0.09 T 的矩形平面磁控溅射靶。结果表明: B 的增加显著降低了磁控溅射镀膜工艺的着火电压和维持放电电压,为实现低电压磁控溅射提供了另一种思路。

关键词: 磁控溅射;磁场强度;设计

中图分类号: TG113;TN305;TB43

文献标识码: A

文章编号: 1006-7086(2003)01-0017-04

THE DESIGN ON RECTANGULAR PLANAR MAGNETRON-SPUTTERING TARGET WITH THE HIGH INTENSITY OF MAGNETIC FIELD

CHANG Tian-hai

(School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The probability of low voltage magnetron sputtering achieved by high intensity of magnetic field has been studied. Several factors confining the upper limit of the intensity B of magnetic field parallel to target surface in rectangular planar magnetron-sputtering target have been studied by theory analysis, practice design and experiment. The rectangular planar magnetron sputtering target with B of 0.09 T has been designed. The results showed that the increase of the B reduced greatly the touching off and keeping discharge voltage during magnetron sputtering coating, which give other approach to low voltage magnetron sputtering.

Key words: magnetron-sputtering; the intensity of magnetic field; design

1 引言

磁控溅射镀膜因具有溅射速率高和基底温升低这 2 个鲜明的特点而获得了广泛地应用^[1,2],特别是大型平面直流磁控溅射靶相关技术的突破,给磁控溅射镀膜技术带来了前所未有的生机。如目前我国拥有的液晶显示器使用的透明导电膜生产线达几十条,建筑镀膜玻璃生产线超过百条,每年的产值估计在百亿元人民币以上,这些生产线的核心技术全部都是矩形平面直流磁控溅射。应该说矩形平面直流磁控溅射的关键技术大都已获解决,但应用实践表明,有些设计参数尚有进一步完善的空间,阴极靶表面水平磁场强度 B 便是其中之一。文献[3,4]大多推荐 B 的取值范围为 $0.03\sim 0.05\text{ T}$,认为 B 超过此范围便不利于电子的动量积累,从而不利于电离碰撞即着火和维持放电。我们尝试取 B 值达到 0.09 T ,发现着火和维持放电更加容易。本文即介绍此设计结果。

2 设计的理论依据

通常,矩形平面直流磁控溅射的结构设计原理如图 1 右侧所示,近似认为磁场 B 平行于靶表面,电场 E

收稿日期:2002-07-16.

作者简介:常天海(1964-),男,河南省罗山县人,副教授,从事薄膜及光电子技术研究。

垂直于靶表面;图1的左侧为此等效正交均匀电磁场的直角坐标系。初速度为零的电子在其中的运动方程

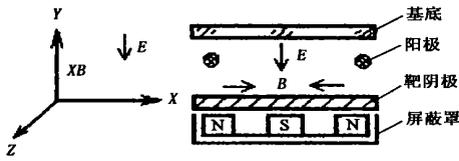


图1 矩形平面磁控靶结构设计原理图

为: $X = ut - \frac{u}{\omega} \sin \omega t$, $Y = \frac{u}{\omega} (1 - \cos \omega t)$, 它的轨迹为图2所示的旋轮线。式中 $u = \frac{E}{B}$ 为旋轮在 X 方向的速度; $\omega = \frac{eB}{m}$ 为旋轮旋转的角速度, e 和 m 分别为电子的电荷量和质量。旋轮线的旋轮半径 $r = \frac{mE}{eB^2}$, 旋轮线的一拱弧长 $S = 8r$ 。显然, 若只有电场, 电子运动的趋势总是沿着 Y 方向而奔向阳极; 加上正交的磁场后, 电子运动的趋势总是沿着 X 方向。不发生碰撞时, 电子就按其旋轮线轨迹运动半拱、一拱或多拱的弧线路程; 但一经发生碰撞, 电子就会付出全部能量, 为积累激发和电离作出贡献, 本身速度降至零, 从而在碰撞处重新开始旋轮线运动, 同时每次碰撞后向阳极靠近 Y_p ($Y_p \leq 2r$), 如图3所示。也就是说, 与只有电场时的情况不同, 电子必须不断发生碰撞才有可能靠近阳极, 且在到达

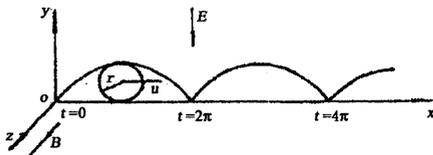


图2 正交均匀电磁场中电子的运动轨迹

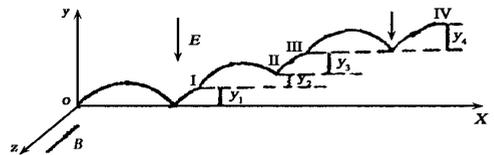


图3 电子在碰撞过程中靠近阳极的运动轨迹

阳极时能量已经较小, 使得电子对基底的轰击热很小, 这就是磁控溅射镀膜基底温升低的主要机理。另一方面, 通常磁控溅射镀膜的工质气体 Ar , 工作压力为 10^{-1} Pa 量级, 此情况下的电子平均自由程 λ 接近甚至大于镀膜室的线性尺寸。若只有电场, 电子在飞向基底的过程中与 Ar 原子发生碰撞的几率只有 63.8%; 加上正交的磁场后, 则电子平均每走 n 拱 ($n = \lambda/8r$) 就能与 Ar 原子发生一次碰撞, 而且至少要碰 N 次 ($N = d/2r$, d 为靶基距), 若电子的能量大于 30 eV, 则产生电离碰撞, 生成的电子也要按此规律参与碰撞, 从而碰撞几率将提高千万倍, 这就是磁控溅射沉积速率高的主要机理。

显然, 平行于靶表面的磁场强度 B 是一个极其重要的参数。毫无疑问, B 值不宜过小, 因为 B 愈小, 旋轮半径 r 过大, 会使电子过早进入阳极, 不利于电离碰撞。但对于 B 值能否超过目前的上限 0.05 T, 值得进一步研究。目前 B 值不宜超过 0.05 T, 主要受限于 2 个方面的考虑: ① 磁场强度 B 愈强, 旋轮半径和电子的速度愈小, 致使电子运动范围小、运动方向相对于电场 E 的方向变换频繁, 从而不利于电子的动量积累即不利于电离碰撞; ② 屏蔽罩的设置。屏蔽罩的作用是阻止非靶材料的溅射, 提高薄膜纯度。其设置原则是屏蔽罩与阴极体之间的距离 $\delta \leq r$ ^[3], 即 $\delta \leq mE/eB^2 = 3.37 U^2/B$ (U 是磁控溅射的直流电压, $v = E\delta$), 若 $U = 500$ V 时, $B = 0.03$ T, 则 $\delta \leq 2.5$ mm。如果 B 增加到 0.09 T, 则 $\delta \leq 0.8$ mm, 这么小的间隙在实际安装中很难实现, 特别是大型矩形平面磁控溅射靶容易造成阴阳极短路。

我们认为只要解决得好, 上述 2 个问题不会制约 B 的提高。因为: ① 在放电电压达几百伏、阴阳极间距为厘米量级时, 即使 B 提高到 0.09 T, 电子的速度变小, 但其能量仍然远大于 30 eV, 不会影响电离碰撞。同时大大提高了与 Ar 原子的碰撞次数 N , 反过来增加了电离碰撞几率。② 若将阴极靶体的 5 个侧面的磁场 B_1 降到 0.001 T 以下甚至为零, 同时靶表面覆盖同一膜材, 就不要屏蔽罩。因为 $B_1 \leq 0.001$ T, $r \geq 75$ mm, 超过了通常的阴阳极间距, 电子会无碰撞地直接进入阳极, 即侧面就不需要屏蔽了; 靶表面为同一膜材不会产生非靶材料的溅射, 从而不会影响薄膜纯度, 当然也不需要屏蔽了。因此, 从理论上讲, 只要侧面屏蔽措施好, 靶表面的磁场强度 B 可以远高于 0.05 T, 形成更强的约束磁场。

3 设计概述

考虑实验室里镀膜室腔体尺寸, 矩形平面阳极靶体的尺寸被设计为 1 200 mm × 258 mm × 100 mm, 通

过反复调试,最终磁铁的分布如图4所示,根据经验公式^[4],它可保证均匀溅射区的长度在600~800 mm。磁铁都是钕铁硼,采用直冷方式。中间为24块S磁体,每块尺寸为40 mm×25 mm×20 mm,周边为60块N磁体,每块尺寸为40 mm×18 mm×20 mm。靶材安装于上表面,下表面和4个侧面都采取了有效的磁场屏蔽措施,且在下表面安装了磁铁升降螺栓,以调节靶表面的磁场强度大小。测量仪器为上海第四电表厂生产的CT3型特斯拉计。

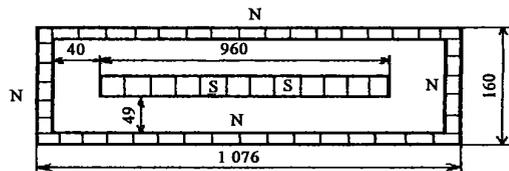


图4 矩形平面阴极靶体的磁铁设计示意图

经过改进,最终得到了图5和图6所示的氧化铟锡陶瓷靶表面的水平磁场强度 B 分布曲线。图5表示 B 在靶体短边方向的分布,均匀区宽度为2 mm×35 mm;图6表示 B 在靶体长边方向的分布,均匀区长度为850 mm,

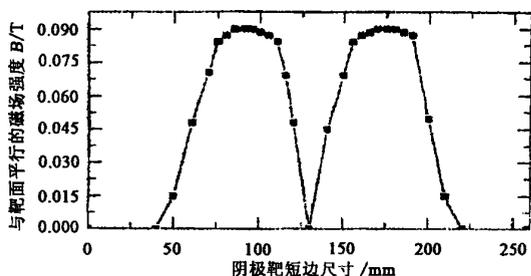


图5 与靶面平行的磁场强度沿阴极靶短边的分布

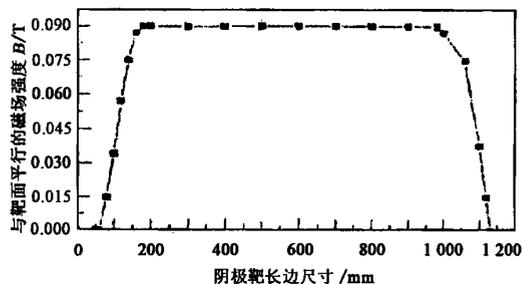


图6 与靶面平行的磁场强度沿阴极靶长边的分布

优于经验公式计算值。两图中的 B 值都达到了0.09 T,且约束性较好,无杂散磁场。阴极靶体下表面和4个侧面的 B 都小于0.0005 T,即 $r \geq 150$ mm,故不加屏蔽罩,采用裸靶。

4 镀膜实验

利用上面设计的阴极靶体进行了氧化铟锡(ITO)薄膜的镀制实验,得到了图7~9所示的结果。图7表

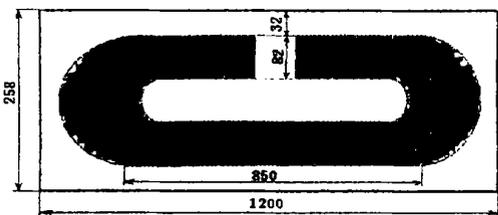


图7 ITO靶表面的溅射区示意图

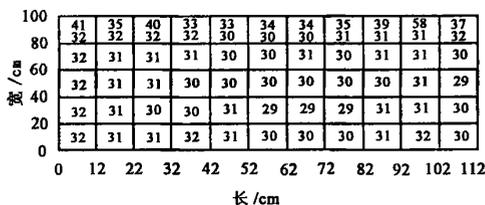


图8 ITO薄膜样品的表面电阻分布(Ω/□)

明,靶表面溅射区的宽度为2 mm×82 mm,均匀溅射区长度为850 mm,与图5和图6符合较好。据图5估计,均匀溅射区宽度不小于2 mm×35 mm。镀膜工艺一般采用靶固定、基底移动的方式,所以均匀溅射区长度更重要,它直接决定了可镀基底幅宽,图8的结果也证实了这一点,它是在1120 mm×1000 mm的玻璃上沉积ITO膜后的表面方阻测试结果,显然,在长度方向,ITO膜的表面方阻是均匀的,只要传动空间足够,玻璃长度可以不加限制;但玻璃的宽度只能小于1000 mm,最好在850 mm左右。

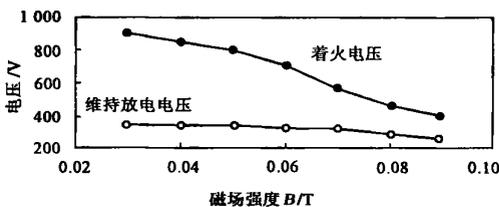


图9 平行于靶面的磁场强度 B 与着火电压和维持放电电压的关系

图9的结果表明,随着 B 的增加,着火电压和维持放电电压逐渐减小。当 B 增加到0.09 T时,着火电压低于500 V,维持放电电压低于300 V,实现了低电压溅

射,低电压溅射极大地改善了ITO膜的光电性能^[5]。根据Paschen定律,着火电压

$$V_s = \frac{K(pd)}{\ln \frac{G(pd)}{\ln(1+1/f)}}$$

式中 K 、 G 为决定于气体的常数; p 为气体压力; d 为阴阳极间距; f 为每个正离子轰击阴极所产生的电子数。靶表面磁场强度 B 的增加提高了电离碰撞几率即提高了 f , V_s 自然就降低了。同时不难理解,随着电离碰撞几率的提高,维持放电电压逐渐降低。

5 结论

理论分析和实际结果表明;若阴极靶体下表面和4个侧面的磁场强度被屏蔽低于0.0005 T,同时上表面覆盖同一靶材,则可抛弃屏蔽罩,采用裸靶结构,矩形平面直流磁控溅射靶表面的水平磁场强度 B 就可以远高于0.05 T,达到0.09 T;采用合理的磁铁分布,可得到优于经验公式计算值的均匀溅射区长度。此外, B 的增加显著降低了磁控溅射镀膜工艺的着火电压和维持放电电压,为实现低电压磁控溅射提供了新的思路。

参考文献:

- [1] BUGAEV S P, PODKOWVYROV V G, OSKOMOV K V, *et al.* Ion-assisted pulsed magnetron sputtering deposition of ta-C films[J]. *Thin Solid Films*, 2001, 389(1-2):16~26.
- [2] MUSIL J, LESTINAL J, VLCEK J, *et al.* Pulsed dc magnetron discharge for high-rate sputtering of thin films[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology, Part A: Vacuum, Surfaces and Films*, 2001, 19(2):420~424.
- [3] 李云奇.真空镀膜技术与设备[M].沈阳:东北工学院出版社,1992.99~109.
- [4] 杨乃恒.幕墙玻璃真空镀膜技术[M].沈阳:东北大学出版社,1994.156~160.
- [5] 中村久三.使用低电压高利用率新型 α 阴极制备ITO膜[J].真空,1996,4:33~39.

3 500 种期刊联合征订 暨国际互联网网站开通启事

本刊已参加“全国非邮发报刊联合征订”,并入编《全国非邮发报刊联合征订目录》。该目录编入了70%以上的非邮发报刊,覆盖了自然科学和社会科学的全部领域,分综合版、社科版、科技版和电脑版四种版本出版。电脑版又称“电子订单”,供计算机采编用,最好从网上下载。综合版即为社科版、科技版之和,需要者请向全国非邮发报刊联订服务站免费函索,一般读者,科技版、社科版择一提供,去信时务请注明之。

联订服务部在国际互联网上的网站现已开通(网址:www.LHZD.com),《联订目录》及本刊均已上网,该网站乃中国期刊的大型超市,集全面展示与统一收订为一体,含3500种期刊。欢迎上网查阅期刊、下载“电子订单”并订阅期刊。

《联订目录》中所列期刊均已全权委托该站收订,所有刊物均不破季订阅。本刊特此通告读者,请直接汇款向该部订阅,不必先索取《联订目录》,只须在汇款单附言栏说明即可。本刊全年订价32.00元。该部的地址及银行账号如下:

户头全称:联合征订服务部 账号:605248-1046196 开户银行:工商银行天津市尖山分理处
 邮政编码:300385 电话:(022) 23973378, 23962479; 传真:23973378
 地址:天津市大寺泉集北里别墅17号
 网址:www.LHZD.com E-mail:LHZD@public.tpt.tj.cn

(本刊编辑部)