

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.07.015

灯丝型辅助离子源的设计及其对薄膜参数的改善研究

任翼¹, 张殷², 周亚东^{1*}, 金尚忠¹

(1. 中国计量大学 光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018; 2. 苏州岚创科技有限公司, 江苏 苏州 215151)

摘要: 为了以较低成本的技术提高磁控溅射沉积薄膜的纯度、致密性和均匀性, 设计出一种可以活化氧气的双腔室直流加热灯丝型辅助离子源。通过实验改变辅助离子源的工作参数, 探究其对磁控溅射镀膜机所沉积薄膜的光学参数的影响。通过对比不同工艺条件下所沉积薄膜的透过率、折射率、基板上膜层不同位置的相对厚度, 最终证明设计提出的辅助离子源可以一定程度改善Ta₂O₅和SiO₂单层镀膜的透过率、折射率以及均匀性, 提升了原磁控溅射镀膜机的镀膜质量和有效镀膜面积, 对提高镀膜生产效率具有一定指导意义。

关键词: 离子源; 结构设计; 离子束辅助沉积(IBAD); 光学薄膜

中图分类号: O484

文献标识码: A

Design of filament-type auxiliary ion source and study on its improvement of thin film parameters

Ren Yi¹, Zhang Yin², Zhou Yadong^{1*}, Jin Shangzhong¹

(1. College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 2. Suzhou Peaktra Technology Co., Ltd, Suzhou 215151, China)

Abstract: In order to improve the purity, compactness and uniformity of magnetron sputtering deposited films at a lower cost, a dual-chamber DC heating filament auxiliary ion source was designed which can activate oxygen. The working parameters of the auxiliary ion source were changed in the experiment to explore their influence on the optical parameters of the films deposited by magnetron sputtering coater. By comparing the transmittance, refractive index and relative thickness of the films which was deposited under different processing conditions, it is finally proved that the auxiliary ion source designed in this work can improve the transmittance, refractive index and uniformity of the single-layer films of Ta₂O₅ and SiO₂ which was coated in this experiment. Thus, the coating quality and effective coating area of the original magnetron sputtering coating machine are improved, and it does have certain practical significance for improving the efficiency of the coating.

Keywords: ion source; structural design; ion beam assisted deposition (IBAD); optical thin film

离子束辅助镀膜 (Ion beam assisted deposition, IBAD) 是一种广泛应用于提升镀膜质量的技术^[1],

对于不同的镀膜原理或工艺流程, IBAD 技术都能在一定程度上改善沉积的膜层质量, 因此对于辅助

收稿日期: 2024-01-11

修回日期: 2024-01-21

作者简介: 任翼(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为磁控溅射薄膜沉积, email: ry_2968000688@163.com

*通信作者: 周亚东, email: z Yadong2013@cjl.u.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目-表面等离子体增强效应模型建立及验证研究(22204154)

镀膜离子源的研究和创新性设计是很有必要的。

磁控溅射(Magnetron sputtering)镀膜技术是溅射沉积技术的一种^[2],因其工作温度低、成膜效率高、膜层质量好等诸多优点,可以制备大面积、高纯度、均匀性佳、致密性好、与基板结合力强的膜层,是目前国内应用最广的镀膜技术^[3],在硅芯片、红外激光雷达视窗、滤光片、光学镜头、传感器等关键器件以及工业生产、消费电子制造、国防军事等前沿技术领域被大量应用^[4-5],因此磁控溅射技术是当前研究的热点^[6]。本文设计的离子源就是用于磁控溅射中的辅助沉积。

本文提出并设计的辅助离子源安装于苏州岚创科技有限公司生产的磁控溅射镀膜机上,以小型化、低成本为目标对辅助离子源进行设计,以期用最小的成本对磁控溅射沉积的薄膜质量进行改善。灯丝型离子源是目前制造和使用成本较低的类型,大部分研究人员对于灯丝型离子源的改进聚焦于其灯丝的材料^[7-8]、结构^[9-10]、形状^[11]等等,但都不能很好地满足生产中将氧气等具有氧化性的气体作为工作气体的需求,因为在灯丝工作时通入氧气会使灯丝产生阴极中毒现象,甚至在高温环境下被氧化熔蚀断裂,导致离子源停止工作,影响镀膜工艺的进行。

针对以上问题,本文创新地对灯丝型离子源的整体结构进行改变,提出一种双腔室的结构设计,使得该离子源可以在不影响灯丝工作时长的前提下通入氧气作为反应气体,使其在原有辅助离子源的基础上增加活化氧气的功能,被活化的氧气分子更易于和靶材单质原子充分反应,生成待镀材料的化合物。因此,这使得该辅助离子源又具备了活化源的功能。另一方面,市面上的活化源一般使用大功率的射频离子源,采用射频线圈激发活化反应气体,价格昂贵,且引入射频电源和线圈后可能会对整个真空镀膜系统造成电磁干扰,因此本文设计的离子源也同时解决了原本活化源带来的诸多问题。

1 离子源辅助镀膜原理

离子束辅助沉积技术是在原有真空镀膜的基础上增加辅助离子源,以改善沉积薄膜的结构或改变膜层的组成成分的镀膜技术,因此在工业生产中若需在基片上沉积高质量的薄膜,采用离子束辅助沉积技术是较为合适的解决方案。

图1为薄膜形成微观过程的示意图。在离子轰

击的过程中,会对沉积的膜层造成成分和结构上的变化,包括物理和化学变化^[12]。在物理变化中,具有高动能的荷能离子与基片最表面分子层或者膜层原子碰撞,一部分能量传递给基片表面沉积的膜层粒子,使膜层粒子的迁移率提高,另一部分能量则转化为热能。因此在真空镀膜的过程中基片表面的温度往往会高于周围环境的温度,这就要求在镀膜工艺时离子源出射的离子的能量被控制在一个合适的范围,使高能粒子既能改变膜层表面分子的迁移率,又不至于将基片表面的温度升至过高,从而影响一些对温度较敏感的基片材料抑或是膜层材料。而在化学变化中,荷能离子除了提供动能,还参与形成化合物膜层,在膜层的表面,轰击离子与沉积原子或者基片原子直接反应形成化合物,高能离子也会使一些结合较弱的化学键断开并重新结合,生成更为牢固的新键^[13],比如在制备TiN、CrN、BN、Si₃N₄等氮化物薄膜和Nb₂O₅、Ta₂O₅、SiO₂等氧化物薄膜时,就使用了N₂、O₂等参与相关化学反应的工作气体作为产生离子的气体源。

在生产过程中,若气相原子或分子具有的动能不足,在沉积基片表面的迁移率较低,则在基片上形成的薄膜会存在柱状结构,导致其致密性不佳,而在工艺过程中同时开启辅助镀膜离子源,可以使得气相分子或原子在基片表面的迁移率增大,从而改善沉积膜层的致密性和均匀性。

离子束的能量传递过程可以通过碰撞模型来描述。在模型中,离子束的能量可以分为纵向动能和横向动能。离子束的纵向动能与薄膜粒子沿着离子束传播方向相同,因此可以直接传递给薄膜粒子。而离子束的横向动能则需要经过多次散射和转移,最终转化为纵向动能才能传递给薄膜粒子。离子在与靶物质发生碰撞时,会发生能量转移,其转移过程可以用式(1)来描述:

$$E_R = E_i \frac{M_1 - M_2}{M_1 + M_2} + \frac{2M_2}{M_1 + M_2} E_i \cos^2 \theta \quad (1)$$

式中: E_R 为反冲离子的能量; E_i 为入射离子的能量; M_1 和 M_2 分别为入射离子和靶物质的质量; θ 为入射离子的散射角度。

在离子束辅助沉积镀膜的过程中,离子束的能量主要是通过上述转移过程传递给薄膜粒子的。在一个典型的离子辅助沉积过程中,离子束的能量会先传递给薄膜表面上的原子或分子,使其达到足够

的动能以克服化学键的结合能,然后这些原子或分子会在表面上扩散并重新排列,最终形成一个连续的薄膜。因此,辅助离子源参数的选择将直接影响离子束的能量传递效率和薄膜的质量。

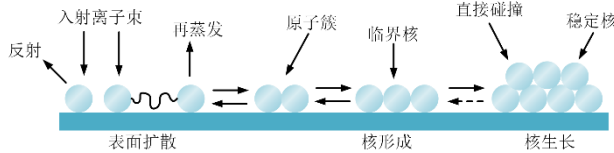


图1 薄膜的成核过程

Fig.1 Nucleation of thin films

2 离子源的设计

2.1 主体结构

图2所示为磁控溅射镀膜机的内部结构,离子源主体安装于镀膜机真空腔室底板中部的右侧,离子束出射口的正上方为阳极环,绝缘地固定在镀膜机底板上。

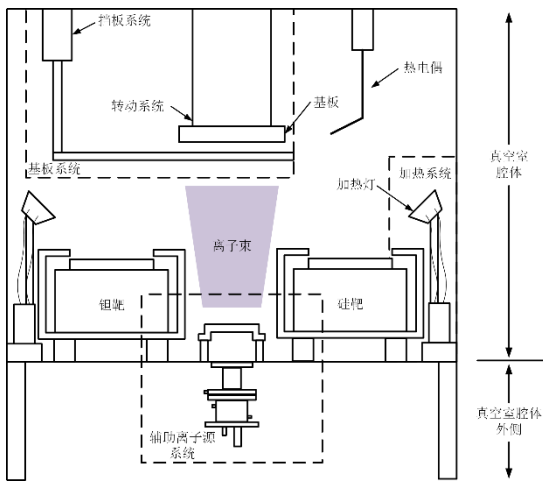


图2 镀膜机内部结构图

Fig.2 Internal structure of the coating machine

辅助离子源的主体结构图如图3所示,其分为上下两个腔体,下部的加热灯丝腔为一级腔,上部的磁场回旋腔为二级腔。工作时首先从离子源的一级腔底部通氩气,一段时间后开启灯丝加热激发电子,在确保通入反应气体的流速小于氩气的流速的情况下,在二级腔底部的侧面馈入反应气体,如氧气。如此,可以保证灯丝在工作时一直处于惰性气体的保护中,确保灯丝能在既定的工作时间内稳定的工作。另外,将加热灯丝放置于一级腔内的设计使得该腔体与镀膜机有一定隔离,使在工作一段时间后

产生的钨蒸汽不至于轻易地进入镀膜机中造成污染,同时避免灯丝工作时产生的大量热量,影响镀膜机腔内的温度分布。

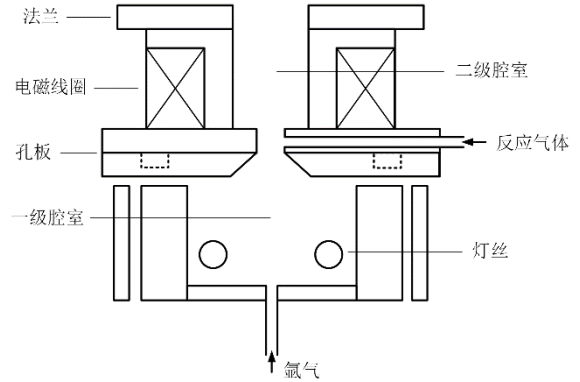


图3 离子源主体结构图

Fig.3 Main part of ion source

离子源系统的电路示意图如图4所示,其中使用的电源都为直流电源,灯丝电源的阴极与阳极环电源的阴极相连,阳极环电源的阳极与离子源上部、镀膜机真空室内部的金属阳极环相连,二级腔外壁绕制的电磁线也通过一电源为其供电,以使其产生磁场。在实际使用离子源的过程中,首先开启灯丝电源,再开启阳极环电源和电磁线电源,在离子源出口与阳极环之间的气体被离子化后,灯丝与阳极环之间形成回路,此时离子源起弧并正式开始工作。

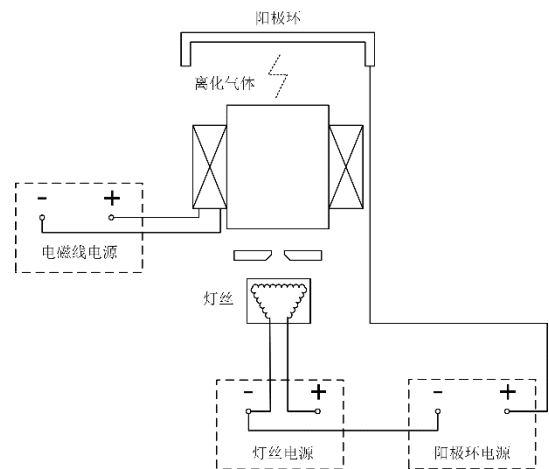


图4 离子源电路示意图

Fig.4 Circuit diagram of ion source

2.2 磁场

阴极灯丝通电发热后激发的电子在阳极和阴极间产生电场的牵引下以一定的速率飞出离子源的腔室,电子在传导的过程中会与通入离子源腔室的工

作气体的分子发生碰撞,使得气体分子电离产生带正电的分子和带负电的电子,但是由于电子的传导速率较快,无法与通入的工作气体发生充分的碰撞,因此就不能形成一定的稳定电离气体或者稳定的等离子体,并且在通入工作气体流量一定的情况下,离子源产生束流的密度也会偏小。因此为尽可能充分地利用通入离子源的工作气体和离子源灯丝发热产生的电子,需引入磁场以延长电子从离子源腔体中出射的时间,使电子在离子源的腔室内产生径向的回旋运动,与工作气体分子发生充分的碰撞。

同时,注意到在阴极产生的热电子在飞向腔外的阳极的过程中会有部分电子在腔室中具有径向运动的速度分量^[14],这些具有径向速度的高能电子会对腔室的壁面进行撞击,这就加大了电子在离子源腔室内的能量损耗,降低了对高能电子的利用率,同时也会对腔室的壁面造成侵蚀,缩短离子源的使用寿命。

为降低电子轰击壁面的概率,提高高能电子的利用率,同时增加电子与工作气体分子碰撞的概率,本文设计的离子源采用在二级腔室外部绕制电磁线圈通电产生磁场的解决方案,采用该方案可以同时解决两个问题,一是减少高能电子在二级腔壁面的碰撞,二是增加电子在二级腔出口与阳极环之间的区域内与工作气体分子的碰撞,使离子源与阳极环之间的气体更容易电离起弧,使得阴极灯丝与阳极环之间迅速形成一个电流回路。

在二级腔外绕制通电导线来产生磁场可以视为通电螺线管,其产生磁场的磁感应强度公式为:

$$B = \mu \frac{N}{l} I \quad (2)$$

式中: μ 为磁芯的磁导率; N 为线圈匝数; l 为线圈绕制的总长度; I 为线圈中导通的电流大小。由安培定则可知,离子源二级腔外电磁线在腔室内产生的磁场是轴向的,因此只要经过二级腔的电子具有径向速度分量,都会在轴向磁场的作用下受到洛伦兹力而发生径向的回旋运动,从而避免与二级腔的壁面发生碰撞而损失大量能量,带电粒子在磁场中运动的半径由拉莫半径 r 表示:

$$r = \frac{mv}{qB} \quad (3)$$

式中: m 为离子静止质量; v 为离子初速度; q 为离子电荷数量; B 为磁感应强度大小。因此在实验调试

时需充分考虑工作气体分子失去电子后的离子以及电子在磁场中作回旋运动的半径,调整电磁线中所加电流的大小控制二级腔内的磁场强度大小,使得离子源工作环境中的各种离子的回旋半径都小于二级腔室的内径。而通电线圈在离子源二级腔室与阳极环之间的空间内产生的磁场则不是轴向的,因该位置与阳极环的位置较近,其磁场方向恰好可以与大部分飞向阳极的电子的传导方向垂直正交,因此电子在该处又可以受到洛伦兹力的作用而做螺旋运动,增大与工作气体分子的碰撞概率,使得离子源与阳极环之间的气体更易电离。

本文选用的电磁线线径为2 mm,根据经验最大可通直流电流30 A,电磁线总长为50 m,绕制于离子源二级腔的外壁,外壁上绕制的有效长度定为50 mm,根据公式(2)可得当绕制后的电磁线通30 A直流电时产生的磁感应强度为:

$$B = \mu \frac{N}{l} I = \mu_0 \frac{50}{\pi D l} I \times 10^4 = 3000 \text{ Gs} \quad (4)$$

式中: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$,为真空磁导率; $D = 40 \text{ mm}$,为二级腔壁外径; μ 为磁芯的磁导率; N 为线圈匝数; l 为线圈绕制的总长度; I 为线圈中导通的电流大小。因此,在实验时通过调节电磁线通过电流的大小,可以将二级腔内的磁感应强度从0~3000 Gs线性变化,以寻找最佳的磁感应强度。因此,相较于其它使用永磁体的离子源,本文设计的离子源可以动态地调节磁场强度,展现出了一定的优越性。

2.3 阳极环

在离子源设备中的阳极,其电位高于离子源中心区域,将阴极产生的电子牵引拉出,同时使加速电子与工作气体分子碰撞。阳极环通常是一种环形的电极,位于离子源中心区域的外环,本文提出的离子源将阳极环放置于离子源主体结构的外部,位于引出电子束流出口的上方,这也使得离子源的离化区域(Ionization region)也位于离子源的上部。阳极环的另一作用是可以限制离子束的扩散来提高离子源的分辨率,也就是控制离子源束流的密度及其发散角,通过调整阳极环的几何形状和电位,可以改变或控制离子束的形状和大小。此外,阳极环还可以保护离子源免受电弧和气体放电等损坏,其可以吸收过多的电流和能量,从而防止离子源的电极被烧毁或气体被过度电离。

本文设计的阳极环如图5所示,采用黄铜作为

材料,这是因为黄铜具有良好的导电性能,并且易于进行机加工。阳极环由三个固定耳、一个接线端头和中心的环形主体结构构成。阳极环的中心主体为中心对称的圆环,离子束在经过阳极环时,会受到相对均匀的聚焦力的作用,从而形成均匀的束流。经过实验总结可以得出,通过改变阳极环的半径可以调节离子束的羽流发散角,增大半径可以使离子束的发散角度变小,减小半径则可以使离子束的发散角度变大。本文设计的阳极环的中心环形主体在柱形铜环的基础上增加了一圈与其垂直的环形沿,使产生的离子束的羽流向中心聚束,减小了羽流发散角,从而使离子束都能有效的辐射到基板上。同时,向内收拢的环形沿可以阻挡部分继续向阳极环上方飞行的高速电子,提高了离子束流的稳定性。

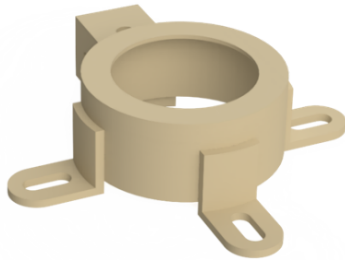


图5 阳极环
Fig.5 Anode ring

目前市面上的大多数离子源,阳极环位于离子源的腔室内部,则在离子源被加工完成后,就很难改变阳极的结构^[15]。由于到达阳极表面的高能电子会导致阳极过热并产生热沉积效应,这会严重影响阳极材料性能并降低阳极寿命。而且,此类离子源无法从外部观察阳极环的受侵蚀状况,因此在离子源工作一段时间后,需要定期将离子源拆卸。根据阳极环

的受侵蚀情况判断是否需要更换新的阳极,如此便极大地增加了设备维护的时间和成本,降低了工业生产的效率。本文创造性地将辅助镀膜离子源的阳极环放置于离子源出口的外部,与其它离子源产品相比,本文设计的离子源可以根据镀膜工艺的情况调整阳极环的大小、形状、距离离子源的高度等各项参数,使得在仅改变离子源外部的阳极环的情况下适应不同的真空镀膜机、不同位置的基板、不同的镀膜工艺要求甚至实现离子源的不同功能,如清洗、刻蚀、轰击等,同时可以非常方便地拆装、更换阳极环,如此便极大地简化了阳极环的更换与维护流程。

3 实验环境

本文设计的离子源在苏州岚创科技有限公司研发制造的MS-1100-TP磁控溅射镀膜机上进行实验测试。实验时所用的磁控溅射靶材是金属钽和高纯硅,两靶材纯度均大于99.999%,离子源在正式镀膜开始前开启,持续整个镀膜过程,在镀膜结束关闭溅射靶后一段时间再关闭离子源。由于实验是为了验证本文设计的辅助离子源对单层薄膜光学参数的改良,因此基板选择为透明性、热稳定性较好的QZ石英玻璃,便于镀膜结束后对薄膜参数的测量。基板的半径为65 mm,工件架采用一般的单轴旋转结构。在磁控溅射镀膜的过程中,磁控溅射靶的各项参数对薄膜沉积的速率、成膜的质量起到至关重要的作用,因此在实验时保持真空度、气体流量、基板电机转速等条件不变,探究有无本文设计的离子源参与辅助镀膜的情况下沉积薄膜质量的差异,随后改变离子源的相关参数,观察其对薄膜的参数带来的影响,除辅助离子源外的制备条件详见表1。

表1 膜沉积条件

Tab.1 Conditions of film deposition

沉积材料	基片材料	沉积温度/°C	气体流量/(cm ³ ·min ⁻¹)	背景气压/pa
Ta ₂ O ₅ , SiO ₂	QZ	200	15(Ar)+25(O ₂)	1.33 × 10 ⁻⁴
溅射功率/W	偏压/V	工作气压/pa	基片转速/(r·min ⁻¹)	沉积时间/s
3000(Ta), 3600(Si)	660(Ta), 700(Si)	1.33 × 10 ⁻²	300	5400

4 实验结果与分析

薄膜的各项参数测试在Solarbio的可见分光光度计上测量,其测量的波长范围为400~1000 nm。离子源的束流能量利用Impedans的langmiur探针测

量。馈入离子源的工作气体则用Alicat的MC-100SCCM-D气体流量控制计控制,为控制实验的变量,以下实验都在离子源以30 cm³/min、10 cm³/min的流速通入氩气和氧气的情况下进行。

图6、7所示分别为Ta₂O₅和SiO₂于不同工艺条

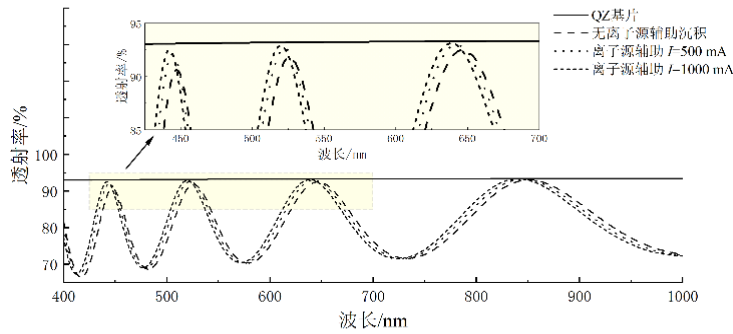


图6 不同工艺条件下的Ta₂O₅薄膜透射率曲线

Fig.6 Ta₂O₅ film transmittance curve under different process conditions

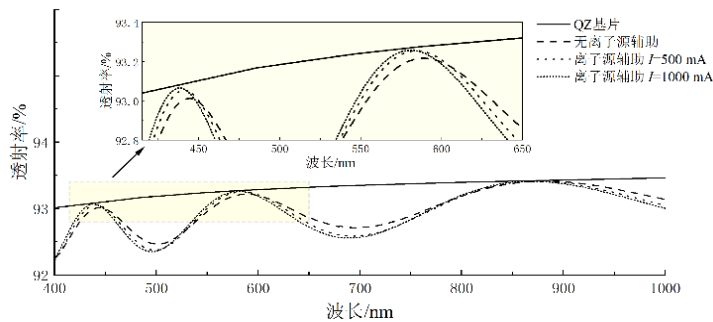


图7 不同工艺条件下的SiO₂薄膜透射率曲线

Fig.7 SiO₂ film transmittance curve under different process conditions

件下在QZ石英玻璃基板上沉积的薄膜的透射率曲线,其中,离子源的束流能量保持 $E=100\text{ eV}$ 。透射率曲线的峰值与其相应波长对应的基板透射率越接近则说明薄膜对该波段光的吸收越小,即所沉积的薄膜的纯度越高。从图中可以看出,当在镀膜工艺过程中引入辅助离子源后,薄膜透射率曲线的峰值增大,尤其是靠近短波的波峰更加逼近基板的透射率曲线,同时透射率曲线也略微向短波方向偏移,即在引入辅助离子源后,薄膜的吸收度有了明显的减小,薄膜的厚度也有所减小,这也说明了在引入了辅助离子源后薄膜的沉积速率较之前有所下降。这证明了辅助离子源对氧气的活化作用可以促进氧气和靶材材料的反应,使之反应更加充分,减少了从靶材直接溅射到薄膜表面的单质原子,从而使沉积得到的薄膜的纯度更高,因此吸收度减小;同时辅助离子源也在一定程度上使沉积的薄膜更加致密,薄膜的聚密度增大,膜厚减小,因此透射率曲线向短波方向有一定偏移。另外,在保持束流能量 E 不变,增大离子束流 I 之后,SiO₂薄膜的透射率曲线在吸收度上的变化相较于Ta₂O₅薄膜不明显,其原因可能为两

种氧化物薄膜的生长结构具有差异。

图8、9所示为在不同离子源参数下制备出的两种氧化物薄膜在550 nm波长的折射率值。对于Ta₂O₅薄膜,在没有离子源辅助沉积的情况下,折射率 $n=2.163$,在有离子源辅助情况下,当 $I=500\text{ mA}$ 时,随着离子束能量 E 的不断增大折射率不断增大,当 $I=1000\text{ mA}$ 时,折射率在 $E=150\text{ eV}$ 之后增大速率趋于平缓;对于SiO₂薄膜,在没有离子源辅助沉积的情况下,折射率 $n=1.486$,当 $I=500\text{ mA}$ 时,同样,随着离子束能量 E 的不断增大折射率不断小幅增大,当 $I=1000\text{ mA}$ 时,折射率也能随离子束能量 E 的不断增大而增大,趋于平缓的趋势更加明显。折射率的变化在一定程度上反应出薄膜致密性^[16],膜层的密度越大则其对应的折射率就越大^[17],可见本文提出设计的辅助离子源可以在一定程度上提升膜层的致密性,但由于本文设计的离子源属于低能量离子源,其对薄膜折射率的改善并不明显,因此在提升束流能量后折射率的数值基本都仅有小幅增大。比较硅、钽两者的氧化物薄膜可以发现,离子源对两种氧化物材料薄膜折射率的改善程度不同,其原因

可能是由于两种薄膜的微观晶体结构具有差异,导致离子束对薄膜表面的结构的影响程度不同。另外,在相同工艺条件下,硅更难与氧气发生反应^[18],因此增大氧气的馈入流速可能会对薄膜的折射率有更明显的改变,因本次实验条件受限,该猜想未能得到验证。

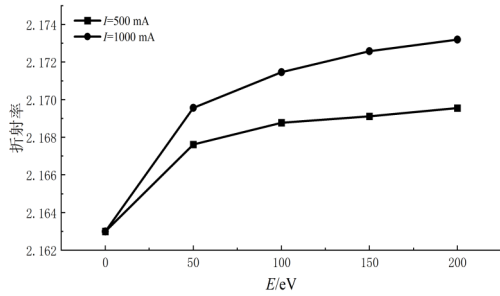


图8 辅助源离子束流对Ta₂O₅薄膜折射率(λ=550 nm)的影响

Fig.8 Effect of ion beam energy of auxiliary source on refractive index of Ta₂O₅ thin film (λ=550 nm)

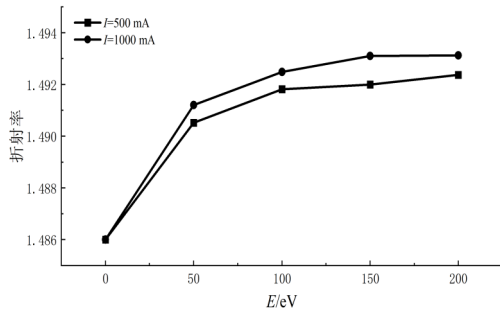


图9 辅助源离子束流对SiO₂薄膜折射率(λ=550 nm)的影响

Fig.9 Effect of ion beam energy of auxiliary source on refractive index of SiO₂ thin film (λ=550 nm)

图10、11所示为不同工艺条件下膜不同位置的相对厚度曲线图。

测量时从基板中心位置沿半径方向每隔5 mm取1个点,共14个测量点,通过测量各个点位波长的偏差来反应薄膜在不同位置处的厚度偏差,利用以下公式^[19]对测得的波长数据进行归一化处理:

$$\lambda_r = \frac{\lambda_i}{\lambda_0} \quad (5)$$

式中: λ_i 为基板上各点实测的波峰位置对应的波长; λ_0 为基板中心点处波峰位置所对应的波长; λ_r 即为最终得到的基板上各点位薄膜的相对波长(Re-

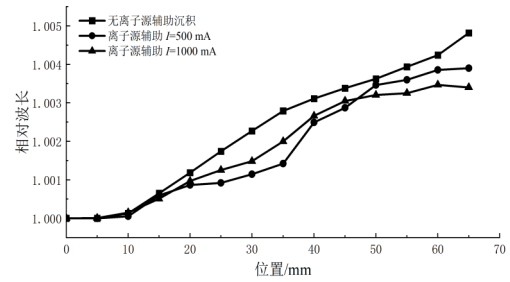


图10 辅助源离子束流对Ta₂O₅薄膜均匀性的影响
Fig.10 Effect of auxiliary source ion beam on the uniformity of Ta₂O₅ thin film

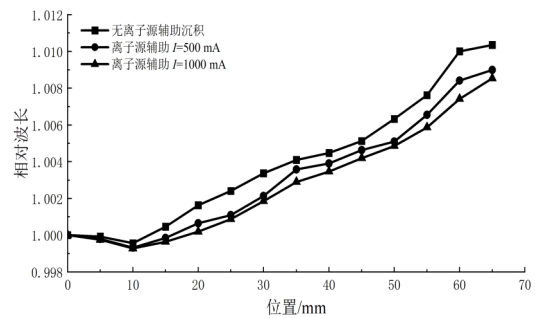


图11 辅助源离子束流对SiO₂薄膜均匀性的影响
Fig.11 Effect of auxiliary source ion beam on the uniformity of SiO₂ thin film

relative wavelength),反映了光谱中的波峰或波谷相对于基准位置的波长偏移。实验时,选取800~900 nm为光谱测量的范围,观察该范围内波峰的偏移情况。均匀性的计算公式^[20]为:

$$\text{Uni} = \frac{\lambda_M - \lambda_m}{\lambda_a} \quad (6)$$

式中: λ_M 和 λ_m 分别为相对波长的最大值和最小值; λ_a 则为该组波长的平均值。从图中可以看出,在不改变其它条件的情况下,镀膜工艺过程中加入辅助离子源之后,两种氧化物薄膜的均匀性均有一定提升,其中Ta₂O₅薄膜的均匀性从0.4806%提升至0.3892%,SiO₂薄膜的均匀性从1.0749%提升至0.9643%。而后,在保持离子源束流能量E=100 eV的情况下,将束流从500 mA提高至1000 mA,Ta₂O₅薄膜的均匀性变为0.3463%,SiO₂薄膜的均匀性变为0.9234%,均有一定程度的提升。本文设计的离子源的束流能量有限,因此对于薄膜均匀性的修正并不显著。考虑到在本实验中,磁控溅射镀膜机中未安装修正挡板(Correction mask),因此本实验得到的这一均匀性结果仍是优异的。

5 结语

本文设计并研发了一款双腔室直流灯丝型离子源,用于辅助光学镀膜,通过实验验证了其对本实验中磁控溅射镀膜机所镀的Ta₂O₅和SiO₂单层薄膜的透射率、折射率和均匀性都有不同程度的提升。对于馈入气体的流量对以上薄膜光学参数的影响则是下一步的研究方向。上述这两种氧化物薄膜作为密集波分复用(DWDM)系统以及各类光学薄膜、涂层、波导中常用的材料组合运用场景十分广泛,因此本文提出设计的辅助离子源及实验为今后光学薄膜质量的进一步提升提供了方法、思路及一定实用价值。

参考文献

- [1] Utke I, Michler J, Winkler R, et al. Mechanical properties of 3D nanostructures obtained by focused electron/ion beam-induced deposition: A review[J]. *Micromachines*, 2020, 11(4): 397-405.
- [2] Brault P, Thomann A L, Cavarroc M. Theory and molecular simulations of plasma sputtering, transport and deposition processes[J]. *The European Physical Journal D*, 2023, 77(2): 19-26.
- [3] Fan B. State of the art of PVD coating equipment for mass production in Asia[C]//Whistle L: Proceedings of the optical interference coatings conference (OIC) 2022. Columbia: Optica Publishing Group, 2022..
- [4] Li X, Yang W, Xu M, et al. Theoretical basis and performance research on advanced non-contacting ion beam manufacturing process for optical materials[C]. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2023, 2478(12): 122011.
- [5] Abegunde O O, Akinlabi E T, Oladijo O P, et al. Overview of thin film deposition techniques[J]. *AIMS Materials Science*, 2019, 6(2): 174-199.
- [6] 李晓刚, 黎子辉, 叶俊文. 基于文献数据可视化的真空镀膜技术研究与应用分析[J]. *真空科学与技术学报*, 2022(5): 1-16.
- [7] Cha J H, Kim S W, Lee H J. A study on beam extraction characteristics of RF and DC filament ion source for high current ion implanters[J]. *Applied Science and Convergence Technology*, 2021, 30(3): 92-94.
- [8] Junge F, Auge M, Hofsäss H. Sputter hot filament hollow cathode ion source and its application to ultra-low energy ion implantation in 2d materials[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2022, 510: 63-68.
- [9] Pacek A, Pieńkos T, Czarnacki M, et al. Improved three-filament thermal ionization mass spectrometry ion source for isotope ratio determination of two samples[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2020, 34(8): e8671.
- [10] Prevost D, Jayamanna K, Graham L, et al. New ion source filament for prolonged ion source operation on a medical cyclotron[J]. *Instruments*, 2019, 3(1): 5-13.
- [11] Vyas R, Herr P J, Aloui T, et al. Comparison of thermionic filament and carbon nanotube field emitter-based electron ionization sources in cycloidal coded aperture mass analyzers[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2020, 457: 116415.
- [12] Jilani A, Abdel-Wahab M S, Hammad A H. Advance deposition techniques for thin film and coating[J]. *Modern Technologies for Creating the Thin-film Systems and Coatings*, 2017, 2(3): 137-149.
- [13] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2006.
- [14] 李杰, 董攀, 王韬, 等. 磁场调控型离子源的设计与实验[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34(7): 5-9.
- [15] Goncharov A A, Litovko I V, Dobrovolsky A N, et al. Novel modification of Hall-type ion source (study and the first results) [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(2): 145-151.
- [16] Bernstein J, Gerlach J W, Finzel A, et al. Ion beam sputter deposition of SiO₂ thin films using oxygen ions [J]. *The European Physical Journal B*, 2022, 95(3): 39-45.
- [17] Park Y J, Sobahan K M A, Hwangbo C K. Optical and structural properties of Fe₂O₃ thin films prepared by ion-beam assisted deposition[J]. *Surface and Coating Technology*, 2009, 203(17/18): 2646-2650.
- [18] Song S, Cai S, Han D, et al. Tantalum oxide and silicon oxide mixture coatings deposited using microwave plasma assisted co-sputtering for optical mirror coatings in gravitational wave detectors[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(7): B73-B78.
- [19] 付秀华, 王一博, 潘永刚, 等. 离子束刻蚀改善膜厚均匀性的研究[J]. *光子学报*, 2022, 51(9): 59-70.
- [20] 张静, 刘海成, 付秀华, 等. 离子束刻蚀改善光通信滤光膜[J]. *光子学报*, 2022(12): 6-10.