

应用圆柱形磁控溅射技术制备X射线反射膜

王 哲 何静富

摘要: 本文主要叙述如何应用柱状磁控溅射技术, 制备X射线望远镜内双曲面和抛物面反射镜内表面反射膜的工艺。所制备的大工件内表面反射膜, 膜层结构致密, 牢固性好, 均匀性在 $\pm 5\%$ 之内。

前 言

随着科学技术的迅速发展, 国内外各种光学薄膜的制备技术也在迅速发展, 新技术和新工艺不断地出现。其中各种溅射技术的广泛应用, 使薄膜结构和性质有了很大的改善, 无论是光学性质还是化学稳定性都有了很大提高, 同时, 由于溅射膜结构细密, 针孔少, 可以满足某些恶劣环境条件的使用要求, 对一些特殊的工件也容易达到设计指标。所以, 近年来溅射镀膜技术得到了迅速的发展。

为了实现在X射线望远镜(双曲镜和抛物镜)的内表面镀制均匀、致密, 且牢固性好的反射膜, 我们采用柱状磁控溅射技术, 首先在铝合金基底样品上溅射一层过渡层铜膜, 然后再溅射一层均匀的镍膜(或用化学方法镀镍), 所制备的溅射膜对波长为 $20\text{ \AA} - 60\text{ \AA}$ 的软X射线, 掠射角为 1.5° 时, 反射率 $R \geq 70\%$ 。

二、工艺原理

众所周知, 磁控溅射技术的实质是利用阴极(靶)和阳极之间存在的正交电磁场来实现高速、低温镀膜。其工作原理是从阴极表面发出的电子, 由于受到正交电磁场的作用在靶面附近作螺旋状运动。因此, 使电子具有很长的运动路程, 从而和工作气体具有很高的碰撞电离几率, 在阴极靶面附近形成高密度的等离子区, 在电场作用下, 正离子轰击靶面, 从而溅射出大量的金属原子, 被溅射出来的金属原子以很大的能量飞到基片上形成了薄膜。如图1所示。

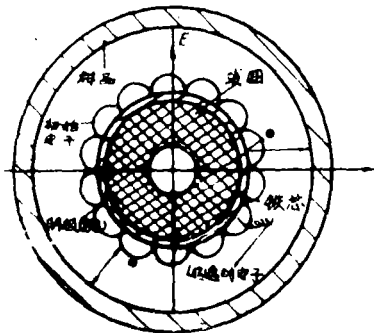


图1 圆柱形磁控溅射靶的工作原理

为解决双曲镜和抛物镜内表面反射膜的均匀性, 要求靶面到样品内表面之间的距离适当, 以及磁场在轴向能作均匀往复直线运动。我们同时设计了电磁铁和永磁铁两种磁场, 均能在轴向上作往复运动, 行程为 $120 - 180\text{mm}$ 。

由于磁力线是曲线，这样在反射镜内表面上形成的溅射膜层厚度亦为一曲线，而磁场在轴向上作往复运动时，则曲线在各个不同位置上的峰值叠加起来近似于一条直线。由图2所示。

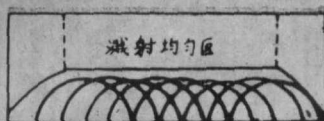


图2 改善膜层的均匀性示意图

从图2可以看出，磁场在轴向上作往复运动时可以在一定程度上改善膜层的均匀性；另外为了克服安装被镀样品时所造成的样品内表面与靶之间的距离不等而产生的膜层不均匀性，要求样品在溅射过程中作匀速的自身旋转运动。

我们所使用的电磁铁和永磁铁的磁场强度理论计算值曲线，如图3所示。

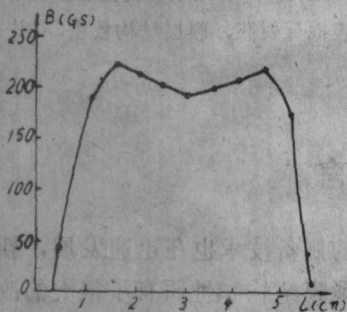


图3 (a)为电磁铁的磁场强度与L的关系曲线

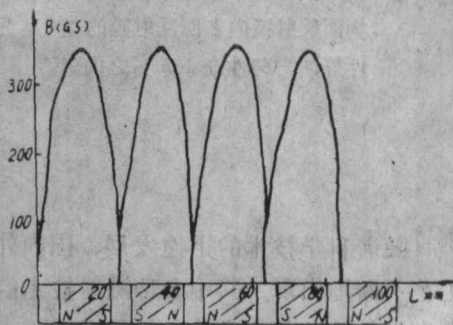


图3 (b)永磁铁磁场强度与L的关系曲线

其中 B 为磁场强度， L 为电磁线圈或永磁铁的长度。

在实验过程中发现电磁铁的理论计算值和实际测量值还有一定的差别，我们对影响电磁铁磁场强度的各种因素进行了探讨。根据实际测量的数据得到两条曲线，由图4，图5所示。

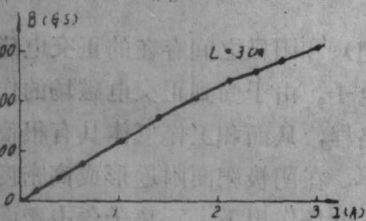


图4 激磁电流和磁场强度的关系曲线

图4中的 L 为电磁铁线圈长度。由图中可以看出：磁场强度 B 与激磁电流几乎成正比；因此，可以通过对激磁电流的调整来达到所需要的磁场强度值。

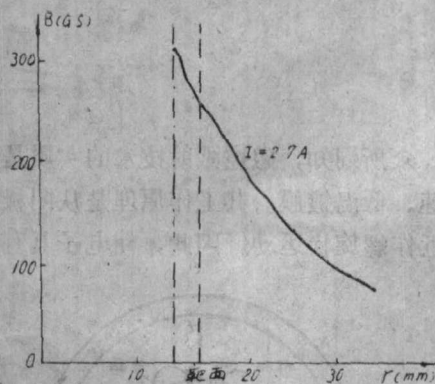


图5 磁场强度衰减曲线（剖面图）

图5中 r 为离开圆柱形靶电极中心点垂直距离， I 为激磁电流。从图中可以看到，当激磁电流 (I) 一定时，靶材的厚度不同，磁场强度也就不同，磁场强度是随着靶厚的增加和 r 的增大而减小；在电极表面处磁场强度最大。

实际上, 无论电磁铁还是永磁铁, 测得它们的水平场强均在 250—300Gs 之间。因此, 我们完全可以通过控制磁场强度的大小和方向来实现膜层的均匀性和牢固性的目的。

三、制备工艺和实验结果

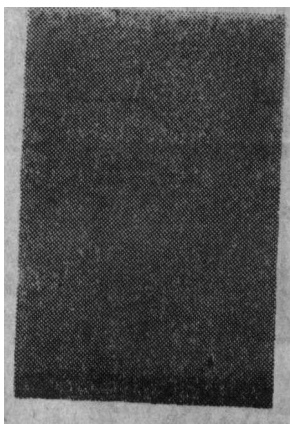
据文献^[1]报导, 英国国家物理实验室中进行过双曲面反射镜溅射铜膜。其制备过程包括用离子轰击表面的独特清洗法, 然后用真空溅射的方法镀铜。

我们的制备工艺过程如下: 首先把抛光好的铝合金反射镜安装在真空室内圆柱电极上, 铜电极沿着反射镜的轴向安置, 靶电极事先套好铝、铜、镍靶材。在同一次真空中可以实现上述溅射任务。铝靶材放在首位目的在于对工件的反溅射, 即在工件上加上高压促使等离子体放电, 高压加速氩离子并轰击反射镜的表面。这样清洗表面的离子腐蚀过程除掉约 $0.2\mu\text{m}$ 厚的材料。当清洗完工件表面后, 高压的极性反转, 氩离子轰击圆柱电极上的铜靶材或镍, 则溅射出的铜原子沉积在反射镜表面上形成薄膜, 接着需要得到一定膜厚, 停止溅射。只要我们计算好溅射条件, 稳定工艺即可以得到理想的反射膜。

表 1 溅射条件

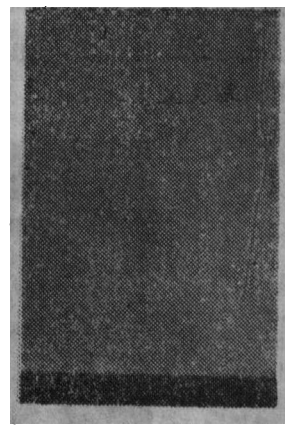
靶材	氩气压强	高压 (V)	靶电流 (A)	线圈电流 (A)	溅射时间 min	溅射速率 (Å/min)	距 离 (mm)
铜 (Cu)	$1 \sim 2 \times 10^{-2}$ torr	650—700	0.2	4.5	15'	450 Å/min	100
镍 (Ni)	$5 \sim 7 \times 10^{-3}$ torr	750	0.3—0.4	6	20'	300—350 Å/min	100

在实验过程中, 我们通过电子显微镜对溅射铜膜表面结构进行观察, 发现了其膜层结构与制备工艺条件密切相关。当氩气的压强、溅射功率、时间选定最佳值不变时, 不同工艺条件下铜膜表面的结构也不同, 如图 6、图 7 所示。



× 4000

(a) 加外磁场



× 4000

(b) 未加外磁场

图 6 同一次真空条件下两块铜膜样品表面结构 (使用 RF 电源)。

由图 6 可以看出对于使用 *RF* 电源加上外磁场后溅射的铜膜表面结构光滑、致密；而未加外磁场时铜膜样品表面结构颗粒大、粗糙。同样，使用 *D.C* 电源时在同一次真空下溅射出的铜膜表面结构，如图 7 所示。

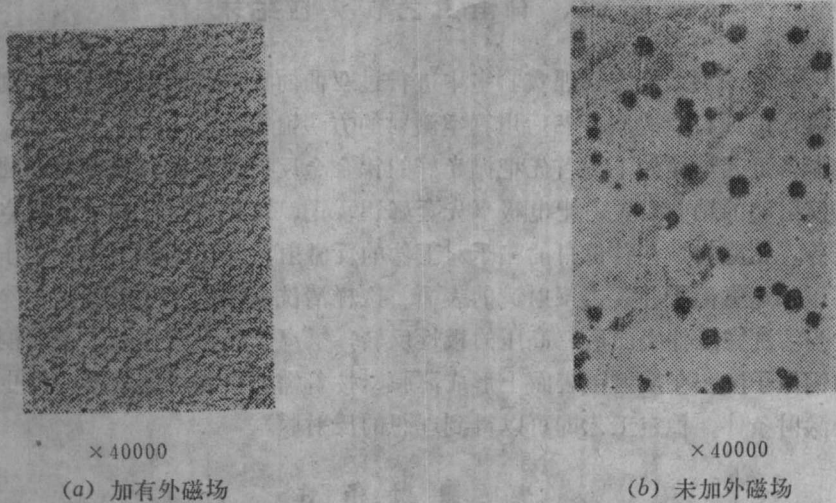


图 7 同一次真空条件下两块铜膜样品表面结构 (使用 *D.C* 电源)。

从图 7 (a) 可以看出，加有外磁场后溅射的铜膜表面结构颗粒小、致密，而未加有外磁场铜膜表面结构颗粒大、粗糙。

由图 6、图 7 两组铜膜表面结构可以明确看出，为获得膜层结构致密、表面光滑、牢固性好的溅射膜，必须探讨出最佳溅射工艺条件，稳定性好，才能得到理想的反射膜。

四、小 结

我们的研制工作是把北京仪器厂产品 *JCK-500* 型磁控溅射台的平面靶改装成圆柱形靶电极，并完成两件实验性的实物镀膜 (双曲镜和抛物镜各一件)，其中抛物镜只溅射膜厚为 4500 \AA 的铜膜，双曲镜溅射为 $\text{Cu} + \text{Ni}$ 双层膜，均匀性都在 $\pm 5\%$ 之内。试验数据表明，只要基底样品能达到设计指标，由真空磁控溅射技术所制备的反射膜完全可以满足总体技术指标要求。下面为我们所制备的 *X* 射线望远镜双曲镜和抛物镜的实物照片图 8。

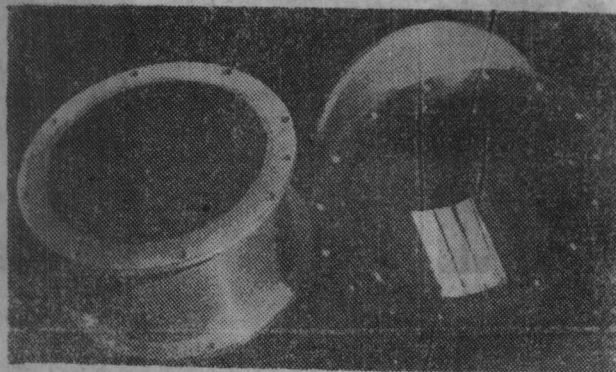


图 8

参 考 文 献

[1] D.P.Mathur, Daniel.R. Adamo, et. al., SPIE, 184, May22—24(1979), P139—148.

**Development of Preparing Technique of X-ray Reflective
Film for Hyperbolic and Paraboloid Mirrors by
Columnar Target in Magnetical Sputter System**

Wang Zhe He Jingfu

Abstract

Preparing technique of the inner-surface reflective film for the hyperbolic and paraboloid reflective mirrors in X-ray telescope by columnar target in magnetical sputter technology is described. The structure of such layers is fine and firm, its homogeneity being within $\pm 5\%$.