



光学镀膜

新型镀膜技术实现高性能介质膜光学元件

美国莱特太平洋公司编译

随着光学应用的发展进步，其对光学元件的规格、精度、稳定性和重复性等指标也提出了更加严格的要求。除了使用新的镀膜设备以外，还可以通过对现有设备进行改进，例如将离子辅助沉积镀膜技术与膜层厚度光学宽带光谱监测技术相结合，从而实现一种新型的高性能膜层，以更好地满足应用需求。

离子束溅射镀膜

在过去的几年中，离子束溅射（Ion Beam Sputtering, IBS）镀膜技术已经在市场上投入使用，尤其是用于要求非常苛刻的镀膜。由于 IBS 镀膜具有很高的可重复性，并且沉积速率缓慢，因此镀膜层的厚度可以制作得非常精确。此外，这种镀膜技术可以制造出紧凑的膜层，对环境温度变化不敏感，并且散射非常少。但 IBS 镀膜技术的一个最大缺点是：膜层生长速度非常缓慢，制作一个膜层需要很长时间。此外，与常规的镀膜机器相比，IBS 镀膜机器的容量通常较小。

电子束镀膜

电子束镀膜是最广为人知的、可能也是市场上使用最为广泛的镀膜技术。电子束镀膜技术也被称为 PVD（Physical Vapor Deposition，物理气相沉积）或简单地叫做 E-Beam。电子

束镀膜技术的工作原理是通过一个电子束，在真空环境中蒸发介质材料。一般来说，电子束镀膜机器的室容积比较大，生产时间比离子束溅射镀膜技术更短，从而能够降低生产成本。尤其是对于纳秒脉冲激光，通过电子束镀膜方法产生的膜层具有很高的损伤阈值，而这是离子束溅射镀膜很难实现的。^[1]此外，电子束镀膜可以在一次镀膜过程中同时制作不同中心波长或不同入射角的膜层。这些都是电子束镀膜技术所具有的独特优势，是离子束溅射镀膜技术无法实现的。因此，电子束镀膜技术仍然是目前各种应用的最佳选择。直到最近，电子束镀膜技术才显现出了两个缺陷：一是膜层对温度变化过于敏感，存在热漂移现象；二是对于复杂膜层的加工精度和重复性非常有限。

随着光学技术的发展，对精密光学的要求不断增加。为了满足这种要求，弥补上述镀膜技术存在的一些不足，可以利用一些先进技术对现有的镀膜设备进行相应的改进。

离子辅助沉积镀膜——紧凑型温度不敏感膜层

为了避免热漂移现象，可以在现有的镀膜机器上安装一个高性能的离子源。镀膜时，有一束低能量的离子流对准沉积膜层，所以将这种

方法称为离子辅助沉积（Ion-Assisted Deposition, IAD）。由于这种动力转移，使得膜层表面沉积的分子获得额外的动能，从而在不断生长的膜层结构中填充每个空隙。因此，通过仔细调整离子束，可以实现明显更为紧凑的膜层。相较于电子束镀膜技术，通过这种方法获得的膜层的机械性能和热稳定性都有了极大的提高，已经接近于离子束溅射镀膜技术所产生的膜层。这种方法还可以避免膜层中掺水。这样膜层就可以不受外界环境的影响，而且能够保证即使在多变的工作环境下，膜层的规格性能也能保持不变。

通过交替使用低能量离子源，可以准确地控制离子辅助的程度，得到不同性能的膜层。这是离子辅助沉积镀膜的优势，尤其是在处理对压力高度敏感的材料或者生产极高破坏阈值的膜层时，这一点尤为重要。

复杂膜层厚度的在线宽带光谱监测

为了达到更高的制造精度和重复性，可以另外安装一个光学原位宽带光谱监测仪器，用于测量膜层的厚度（见图 1）。与通常的监测概念不同，沉积的膜层厚度不是在白片的中心测量，或者是由石英微量天平测量，而是直接在基片上测量。这样可以提高制造精度。更重要的是，整个可见光



技术中心 Technologies Center

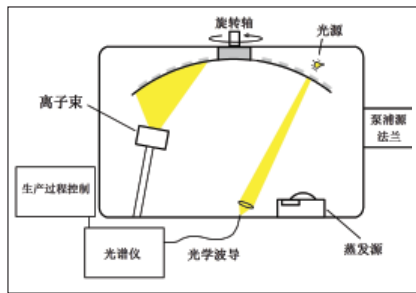


图1: 改装的镀膜真空室示意图(带离子辅助电子束汽化和光学宽带光谱监测膜层厚度)。

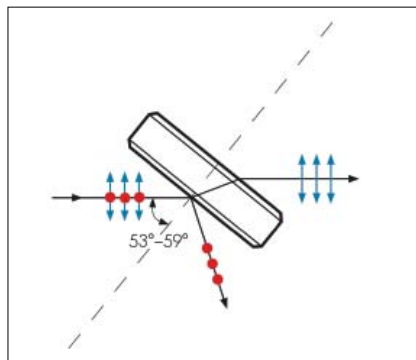


图2: 薄膜型偏振片以约56°的布鲁斯特角插入光路, P偏振光透射, S偏振光以112°角反射。

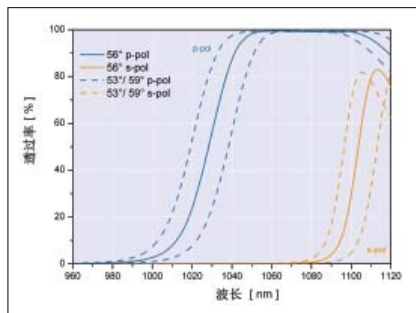


图3: 宽带薄膜型偏振片TFPB(CWL=1064nm)的透射曲线。

谱都用于监测膜层厚度。白光光源发出的光束穿过要测量的基片, 光束入射到真空室底部, 耦合到光纤。白光通过光纤导入一个光谱仪, 可以分析从紫外到近红外的整个波长范围。

目前广泛使用的是单波长膜层厚度监测, 只有单个波长用于探测分析。一般来说, 这限制了膜层结构, 膜层的厚度(膜层厚度 × 折射率)只能是 1/4 的参考光波长, 或其整数倍。这种膜层结构也称为 $\lambda/4$ 系统。

宽带膜层厚度监测技术使观测的

频谱从单一波长扩展到宽光谱范围。换句话说, 同时测量的参考波长的数目只受限于光谱仪的分辨率, 因此测量 1000 多个测量点也并不少见。宽带监测具有巨大优势。首先, 膜层设计不再局限于单一的参考波长和 $\lambda/4$ 系统。因此, 现在可以沉积任意厚度的膜层和任意组合, 极大地扩展了复杂膜层的设计。其次, 生产控制也得以显著提高。测量点数目的增多显著提高了当前膜层厚度测量的准确性。此外, 基片每旋转一次, 就实时测量当前基底的透过率, 并且与理论目标值比较。这样, 即使是光学材质参数或者沉积膜层厚度发生微小的波动, 也都能被系统探测到, 并且可以在生产过程中进行相应的补偿。

新产品的开发与改进

将离子辅助镀膜和宽带膜层厚度监测技术相结合, 不仅能够获得传统电子束镀膜技术所具备的优势, 而且还能实现 IBS 膜层的优良性能。这方面的一个典型例子就是薄膜型偏振片(TFP, thin-film polarizer), 这是以布鲁斯特角(约 56°)插入光路的。入射光的 P 偏振光部分透射(只略微偏离原光路), 而 S 偏振光部分以约 112°角反射(见图 2)。

由于薄膜型偏振片的高抗损伤阈值, 尤其适用于高功率激光的偏振分离, 达到了 P 偏振光的高透过率 T_p 和尽可能高的消光比 T_p/T_s 的目标。LASER COMPONENTS 公司生产的薄膜型偏振片的标准指标是 P 偏振光的透过率 $T_p > 95\%$, 消光比 $T_p/T_s > 100:1$, 最高可达 300:1。但是, 为了达到这些最优值, 标准的薄膜型偏振片的入射角需要在 53° ~ 59° 之间调整。

通过执行宽带监测技术, 现在可

以显著提高薄膜型偏振片的指标。这直接促成了新型宽带偏振片(TFPB, broadband thin-film polarizer)的发展。TFPB 在 53° ~ 59° 的整个入射角范围内都始终满足这些指标(见图 3), 甚至可以实现 300:1 的消光比。

受益于 TFPB 的宽接收角范围, 因此无需对入射角作进一步优化。这使得其使用非常简便, 省去了后续的优化调整步骤。此外, 这种偏振片还可用于低发散光束或聚焦光束的光路中, 而不用担心性能的损失。另一方面, 如果不需要扩展角度范围(也就是使用固定入射角), TFPB 可以适用于某个波长范围, 而不仅仅是适用于中心波长(CWL, center wavelength)。以 $CWL = 532\text{nm}$ 为例, 适用的波长区间约为 20nm, 对 $CWL = 1064\text{nm}$, 其适用的波长区间可以超过 25nm。

宽带薄膜型偏振片 TFPB 的产品可以覆盖 355 ~ 1064nm 的常用波长范围。此外, 对于特殊波长的应用, 还可根据用户需求定制。

除了 TFPB 薄膜型偏振片的免调整之外, 宽带监测系统也可以实现复杂的多膜层设计。比如, 带有负群速度色散的反射镜, 我们通常称之为“啾啾镜”。这种镜片用于补偿光学材料正常色散引起的超短激光时间脉冲展宽。此外, 其他可能的设计还包括非偏振光束分束器、带通镜片、45°入射的薄膜型偏振片、光学滤光片, 或者是根据客户要求的透射率和反射率曲线定制产品。□

参考文献:

- [1]. Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2008, Proc. SPIE, Vol. 7132, Editors G.J. Exarhos, D. Ristau, M.J. Soileau and C. J. Stolz.