

多层膜软X光反射镜

郑天水 金庆原 尤天祥*

(复旦大学)

摘要: 复旦大学物理系激光研究室从1984年开始软X光反射镜的研制工作。六年来,进行了超薄多层膜的膜厚监控的方法研究、单层超薄金属膜的特性研究、Ni—C和Mo—Si多层膜软X光反射镜的制备与测试以及用PVD与LB技术相结合制备软X光反射镜。本文详细介绍了这些工作。

一、引言

X射线光学近年来有了突飞猛进的发展。它不仅使人类对宏观世界(从活的生物细胞到日冕、脉冲星、星云等重要天体)获得崭新的X光观察结果,而且势将促进天体物理学、等离子体物理学、生物学、医药学、材料科学和其他许多相关学科发生革命性的变化。X射线光学获得如此迅速发展的重要原因之一是多层膜X光光学元件的制成。

早在1895年伦琴发现X射线和1912年劳厄证明它是一种短波电磁辐射以来,许多科学家包括伦琴和劳厄本人都曾努力设法使X光反射、折射和聚焦。但都失败了。长期以来,人们虽然能利用它的衍射性质来分析晶体结构或利用它的透射性质来诊断和探伤,但在红外、可见和紫外区广泛使用的许多光学仪器在X光区却无法使用。尽管利用X光掠入射反射技术制成了一些显微镜和望远镜,但它们远没有达到X光所能达到的分辨极限,它们的剩余像差、巨大的体积和重量以及较小的光通量极大地限制了它们的应用范围。

自从1972年美国IBM公司的E. Spiller提出了用高、低吸收率的材料制备多层膜来反射X光以来,他本人和世界上许多科学家都致力于这一新技术的研究,并取得了巨大成就。Spiller本人在1989年报道说^[1],他的反射镜在波长4.5nm、6.3nm和11.4nm处的正入射反射率已分别达到了5%、14%和25%。Ceglie则在1988年报道说^[2],他的Mo/Si反射镜对于13.3nm的正入射反射率已达到60%。

如此高的反射率足已能满足许多实际应用的需要。因此,利用多层膜反射镜进行科学研究、制造X射线光学仪器以及其他许多应用都已开始付诸实施。基于多层膜反射技术的高分辨多层膜衍射光栅^[3]、多层膜位相光栅^[4]、X光实心F—P标准具^[5]、X光偏振仪^[6]、双晶多层膜X光单色仪^[7]、X光全息系统^[8]、X光激光谐振腔^[9]、软X光太阳摄谱仪^[10]、大视场高分辨正入射X光显微镜^[11]等等,都已经实现或正在建造。无论是1987年、1989年美国已经发射的火箭和卫星^[12],还是1996年、1998年欧洲空间组织与美国宇航局将要联合发射的太阳观察站^[13]都带上了和将带上高性能的多层膜X光望远镜。多层膜X光光学元件在激光核聚变、

*注:参加此项工作的还有刘丽英、邢中菁、徐新民、柯国庆、应登同、陈开泰、王文澄、沈元华、章志明。

高温等离子体研究、X光天文物理学研究、X光激光研究、X光光刻技术、X光全息技术、X光微探针荧光分析技术、同步辐射应用及生物与医学研究中正发挥着越来越大的作用。

二、制备与测试

为了获得一个真正实用的软X光反射镜，合理选择基板与膜层材料是首要的问题。基板必须是平整的、光滑的、物化性质稳定的。常用的基板是按一定晶向切割的单晶硅或高精度抛光的玻璃。低Z膜料的选择中要挑选吸收尽量少的材料，总层数可以比较多而使总反射率提高。常用的材料为C($Z=6$)和Si($Z=14$)，其中C适宜于更短的波长(10nm以下)。以碳氢化合物为主的一些有机材料采取适当的工艺也可以成为极好的低Z材料。高Z材料的选择首先要考虑它能否与已选的低Z材料构成光滑稳定的界面，不产生化学反应，也不迅速地互相扩散。按不同波段，常用材料有Ni、Mo、W、Re等。当然，对基板与膜料的选择还要考虑到具体的实用环境，例如耐高温、耐磨擦、抗辐射、抗腐蚀等。

确定了基板与膜层材料后，就可以根据使用的波长、反射率、分辨率等要求设计出理想的膜系，接下来的问题是成膜方法与监控手段。

最早应用于实际的成膜方法是L-B^[14]技术，即从水面上拉出有机化合物的单分子膜，它的厚度均匀、严格、易于控制，因而很早就有商品出售。它的缺点也很明显，即厚度不能任意选择、层数难以做得很多，不能承受大功率的照射或加热。

化学汽相沉积(CVD)也是一种常用的薄膜制备方法，但至今尚未成功地用于制备X光反射镜，原因是快速多次地改变气体成分比较困难，并且它所要求的基板温度太高，往往导致膜层间的互扩散。然而由于它具有高效快速、面积大、设备简单等优点，仍有人在继续研究用CVD方法制备X光反射镜。

目前发展最快、最成功的方法是PVD，包括热蒸发技术和溅射技术两种

斯坦福大学的Barbee采用溅射方法成功地制备了许多X光反射镜^[15]，其方法是让基板接连分别通过两个靶的上方，停留时间(淀积时间)由计算机严格控制，从而保证了各层厚度的准确性与重复性。

苏联的Gaponov^[16]采用脉冲激光蒸发的方法，让激光束分别交替打到两种材料上而得到周期性膜层，其各层膜厚由脉冲数目来控制。

IBM公司的Spiller则采用电子束蒸发而用X光反射率实时监控^[17]，这种监控方法在原理上无疑是最优的，可使用材料的范围也极广泛。但是实际上难以找到所要求波长的光源，而且电子束蒸发得到的膜层表面不够致密，使粗糙度增加而使散射损失变大。为此，他采用离子束抛光技术予以改进，得到较好的结果。

为了检测X光反射镜的质量，最简便而常用的方法是用铜的 $K\alpha$ 线X光小角衍射来观察有调制结构。从布喇格主峰和非涅耳次峰的数目，半宽高度和相对位置可以定性了解结构的周期性和界面的平滑程度，从布喇格主峰的位置还可以定量测出周期的值。

为了研究多层膜中各层的成分与杂质含量，可以在逐步刻蚀时，测量其俄歇谱。

为了进一步研究样品的结构和形貌，用高分辨率透射电镜观察其横剖面是十分有效的。它要求把样品剖开，膜面胶合以后磨薄，最后用氩离子刻蚀到电子能透射的厚度，从这样的电镜图上可以清晰地看到各层膜的结构和厚度并估算出其界面的粗糙度。根据测得的周期、粗糙度以及已知的层数和两种材料的光学常数，可以算出样品对软X光的反射率。

当然,最直接的方法是实际测定样品在软X光区的光谱反射率。为此,需要波长可连续改变的软X光光源——同步辐射源。美、日、苏、法、西德等国都已先后建立了同步辐射源上的X光反射率测试系统。可以按波长扫描或角度扫描测定样品对各种波长的X光反射率。

三、我们的工作

1. 超薄多层膜的膜厚监控方法研究

与一般光学全反膜相比,软X光反射镜的特点首先在于各层膜厚极薄,只有软X光波长的四分之一左右,要监控这样的超薄膜用一般光学监控法难以做到,在只有光学监控设备的条件下,我们首先采用的方法是可见光透射率监控法,由于制备软X光反射镜的薄膜大都是金属,在可见区有较大的吸收,因而虽然很薄,但对可见光的透射率仍有较大的变化,关键在于确定这些吸收材料在可见区的光学常数,为此,我们利用一台自制的衰减全反射薄膜光学常数测定仪^[12],精确测出两种膜料的单层超薄膜在632.8nm,处的光学常数,然后根据这些常数和基板的光学常数,按设计要求的各层厚度逐层算出样品对632.8nm的透射率,最后用一套经过改进提高了精度的可见光透射率实时监控仪对膜厚进行监控,分析表明。若透射率监控精度为0.2%,则制备一个典型的Ni-C,二十层膜时各层膜厚偏离的最大量为11.5%,而软X光反射率峰值波长的偏移为3%,峰值反射率相对值降低2.5%,实际监控结果表明,只要工作中十分谨慎,这种方法可以达到较好的重复性,用它来监控二十层以内的Ni-C软X光反射镜是可行的、可靠的^[13]。

随着膜数的增加,镀每层膜时透射率的相对变化逐渐减少,因此,对于更多的层数,上述方法难以达到足够的精度,因此我们改用石英晶体振荡膜厚监控仪,这种监控仪对膜厚的灵敏度可达0.1nm,而总厚度可达1 μ m。因此,用它来监控超薄多层膜是可行的,但是,它所测量的样品并不是正在制备的样品,从而会带来许多误差,我们采取了下述措施来减少这种误差。①适当选择安装晶振片的位置和角度;②充分水冷,以减少蒸发源对它的热辐射影响;③尽量维持各次镀膜工艺的重复与稳定;④在总厚度达到0.5 μ m时,即更换新的晶片,以保证较好的灵敏度与线性,在此基础上,我们采用了三步定标法来确定晶振仪显示值与待镀片上真正膜厚的关系。这种定标法是①用轮廓仪(Alpha Step 200型)测量各种不同厚度定标片的台阶厚度与晶振仪显示厚度相比较,获得初步的定标值,②按上述定标初值制备一批周期不同的Ni-C、Mo-S,超薄多层膜系,用X光小角衍射法测量它们的周期,从而对定标初值进行修正,③按照修正后的定标值再镀一批周期性膜系,用高分辨率电子显微镜拍摄其横剖面照片,从照片上测出各层膜的平均厚度,对定标值作最后的判定,实际监控结果表明,采用了上述各项措施后,石英振法可以比较精确的监控六十层左右的Ni-C和Mo-S,周期性超薄膜。我们目前已经得到的一些最好的软X光反射镜就是用这种方法制备的。

2. 单层超薄金属膜的特性研究

为了制备性能优越的多层膜,必须首先掌握制备高质量单层膜的关键技术,由Debye-Waller因子可知,波长越短,散射越严重,对于软X光反射镜,除了膜厚监控精确以外,薄膜质量的优劣主要反映在它的粗糙度上,薄膜的生长过程中散射的实时测量结果表明^[14],在薄膜生长的初期,粗糙度迅速增大到一个极大值,然后下降到一个极小值,以后缓慢增加,开始时粗糙度的迅速增加是由于岛状结构造成的,当岛屿群相互接通后,继续镀上去的膜料将填充尚存空隙,因此粗糙度减小,直到形成连续膜,然后,均质的膜层继续生长,表面

粗糙度以大约 $D^{1/2}$ 的速度增加，由此可见，超薄膜的粗糙度与厚度关系极为密切，在刚开始接通时，（电导率突然变大处），粗糙度极大，而比该厚度大一倍左右处，粗糙度极小。

大量实验结果表明，非晶碳膜的粗糙度极小，它通常可以进一步减小基板的粗糙度，因此，我们选择与C搭配的Ni作为研究粗糙度的典型材料，研究方法是四电极薄膜电阻测试法，在镀膜时关闭测试电源以免电场对膜层生长的影响。

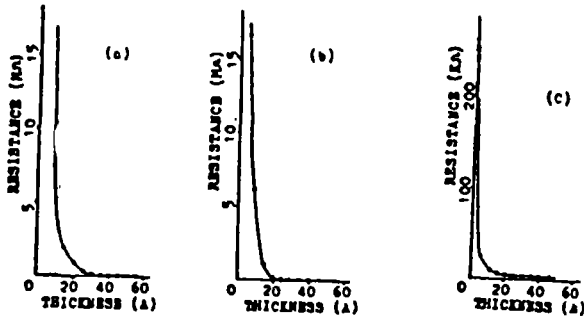


图1 不同基板上的镍膜电阻与膜厚的关系
(a) 普通光学玻璃 (b) 高精度抛光光学玻璃
(c) 预镀了15nm非晶碳膜的光学玻璃

图1是测得的Ni膜电阻随膜厚变化的曲线，其蒸镀条件相同，但基板不同。由图可见，基板越光滑，Ni膜越易于形成连续膜。从图上大致可以估计出这种蒸镀条件下开始形成连续膜的厚度对三种基板分别为：普通光学玻璃（2nm），高精度抛光光学玻璃（2.5nm），预镀15nm非晶碳膜的光学玻璃（1nm）。这些测量结果与文献^[21]的结果基本一致。

相同玻璃基板上不同温度下淀积的Ni膜的电阻随厚度变化。开始形成连续膜的厚度分别为18℃，2nm；80℃，4nm；100℃，5nm。

用这种电阻测量法可以比较容易地判别怎样的蒸镀工艺（真空度与剩余气体成分、基板材料与温度、蒸发速率与淀积速率等）可以获得在所要求的厚度下有较小的膜层表面粗糙度。

为了进一步证实这种电阻测试法的正确性，我们还对上述镍膜用 Philips EM480型高分辨透射电镜进行了观察。样品的制备方法是先在TEM铜网上涂一层10nm的类火棉胶有机膜作为衬底，然后放入真空室蒸镀一层约15nm的非晶碳膜以平滑衬底，待降至室温后，再以3nm/min的速率淀积待测镍膜，最后再蒸镀一层约5nm的碳膜以防止镍膜受氧气污染。电子对无序碳膜和有机膜的透射率很大，因此对观察结果没有大的影响。

3. Ni-C, Mo-Si多层膜软X光反射镜的制备与测试

有了关于淀积单层膜的经验 and 监控多层膜的技术后，我们开始在一台上安装了上海机械学院生产的e型电子枪的北仪DM-450A型镀膜设备Ni-C、Mo-Si周期性多层超薄膜，镀膜室配置如图2所示。为了提高真空度和使基板的挡板a，当膜厚达预定值时此挡板可自动关闭，挡板b是手动的，带有小孔的挡板c则可以减少热辐射对石英晶体探头的影响。蒸发源对基板平面的入射角约为70°。

基板采用<111>取向或<100>取向的硅单晶片，用X光定向仪挑选，晶面偏差角不超过30"，从而保证了表面粗糙度不大于2nm。硅片的清洗采用集成电路的四步法传统工艺，每步溶剂清洗后都用高于10MΩ去离子水冲洗15分钟，放进真空室后，再在120—150℃的温度下烘烤半小时以去表面吸附的杂质气体等。

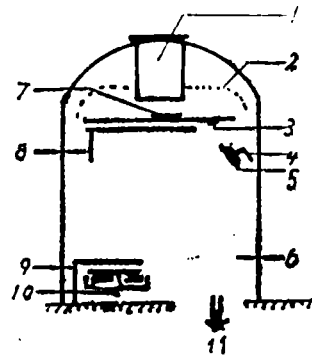


图2 镀膜室内装置示意图

- | | |
|-------------------|-----------|
| 1. 液氮冷阱 | 2. 加热罩 |
| 3. 热电偶 | 4. 石英晶振探头 |
| 5. 带孔的挡板C | 6. 真空室 |
| 7. 待测基板 | 8. 自动挡板 |
| 9. 手动挡板b | 10. e型电子枪 |
| 11. 抽气口（至扩散泵与机械泵） | |

蒸镀过程在基板冷却到室温时开始进行，由于蒸发源的辐射加热，基板温度会逐渐升高，根据激光测温^[22]的经验，电子束蒸发时温升可达30—35℃。由研究单层 Ni 膜的经验可知，基板温度升高时，膜层开始接通的厚度变大，超薄膜的粗糙度就会增加。因此，我们在每蒸镀一层膜后，总是等基板冷却后再镀下一层膜，以保证每一层膜都有较光滑的界面，同时也为了保证膜厚监控所要求的相同的工艺条件。

按照以上工艺，我们制备了一批 Ni-C, Mo-Si 软 X 光反射镜，层次最高的达五十层，周期最小的为 4.2nm。

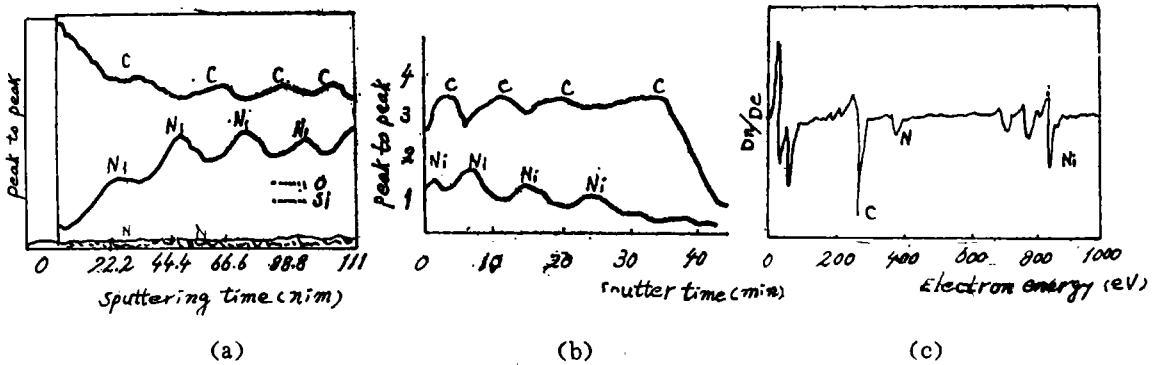


图 3：两个 Ni/C 膜的俄歇谱测量结果

(a) 25 层膜前 8 层深度分析 (b) 8 层膜深度分析 (c) 25 层膜第 5—6 层界面附近的谱

我们用 PHI550 ESCA/SAM 型俄歇电子谱仪对所作的不少样品进行了深度分析。图 3 (a) 是一个二十五层 Ni-C 样品的俄歇电子深度分析谱，我们刻蚀了该样品外面的前十层，可以看出，Ni 与 C 的成分峰谷相对，互为涨落，周期振荡，十分规则。考虑到 Ni 与 C 俄歇电子灵敏度的差别，俄歇电子的逃逸深度以及氩离子刻蚀对膜层界面的影响，这个 AES 谱所代表的多层膜具有相当好的周期结构与相当尖锐的界面。图 3 (b) 则是同一仪器测得的一个 8 层 Ni-C 样品的 AES 深度分析谱，这个样品是由透射光监控法制备的，从比较中可以看到，它的周期性及界面尖锐程度都比前一个样品要差。图 3 (c) 是前一个样品在刻蚀到七十二分钟时（在 Ni-C 界面附近）的俄歇成分分析谱。由图可见，样品中的主要杂质是氮，氧和硅的含量都很少。其它时刻的谱与之相似，说明镀两层膜之间基板冷却的过程中并未引入更多的杂质，扩散泵的返油也没有带来明显污染。

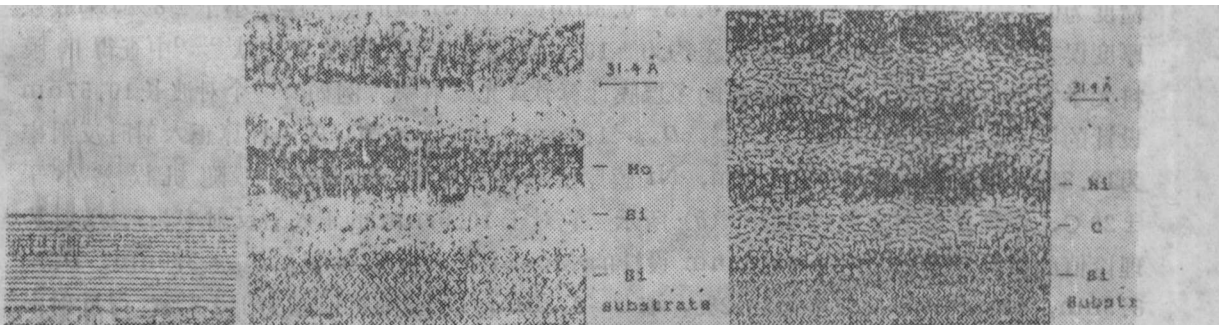
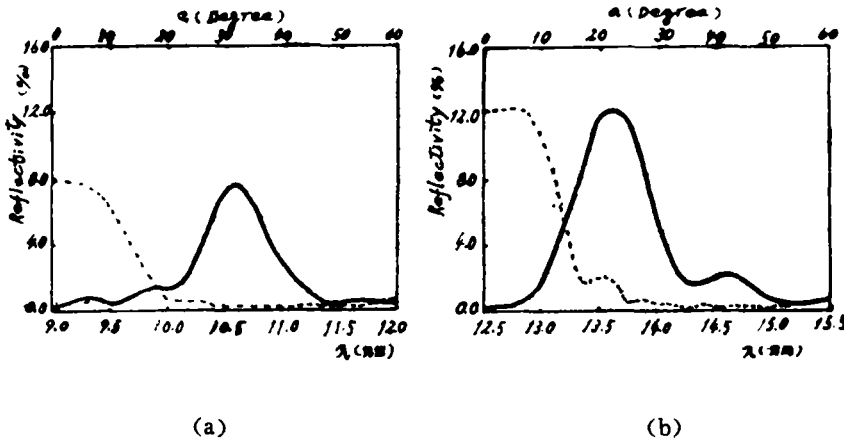


图 4 多层膜的透射电镜照片

(a) 32 层 Mo/Si 膜全貌 (b) Mo/Si 膜高分辨像 (c) Ni/C 膜高分辨像

为了进一步对所得的样品进行较定量的测试和分析，我们用 Philips EM430 型透射电显微镜对几个典型的样品进行了剖面观察。图 4 (a) 是一个 32 层 Mo-Si 膜样品的透射电镜

照片(调制周期7.9nm),由图可见,该样品结构清晰、周期稳定、均匀性较好。图4(b)是它靠近基板的前五层高分辨像,放大倍数为52万倍。图上可以清晰地看到硅基板的晶格分布,由它的晶面间距(0.314nm)可以测量出其中Mo层和Si层的平均厚度分别为3nm和3.2nm,周期6.2nm,它与电子衍射的结果5.9nm、X光小角度衍射的结果5.6nm都比较接近,误差±4%,在仪器误差范围以内。图4(c)是一个24层Ni-C膜的高分辨TEM照片中最靠近基板的五层膜,可以测量出其中Ni层和C层的平均厚度分别为2.5nm和3.4nm,与X光小角度衍射测得的周期值5.9nm相吻合。但仔细测量可以发现各层厚度并不完全相等,特别是碳层的平均误差约±10%,最大误差可达20%。镍层厚度误差要小得多,在±5%以内。从整个图上还可以看到,离开基板越远,膜层厚度的误差越大,界面的粗糙度越大。头几层的界面上下起伏约为0.3nm,到第十二层以后就逐渐增大到0.5nm左右。其原因,估计是温度逐渐升高所致。按着均方根粗糙度 σ 的定义(界面各原子位置偏离平均位置的均方根值)可以估算出, σ 为界面上下起伏的30—35%。



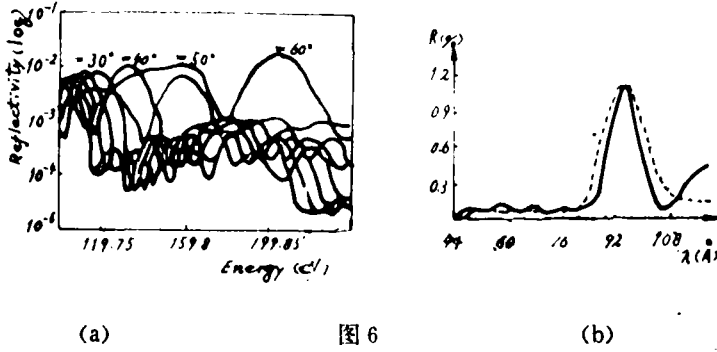
(a) 图中Ni/C, 虚线表示R- α , 实线表示R- λ , $\lambda = 10.57\text{nm}$, 制备的40层Ni/C膜

(b) 图中Mo/Si, 虚线表示R- α , 实线表示R- λ , $\lambda = 13.55\text{nm}$, 制备的41层Mo/Si膜

图5 两个多层膜正入射软X光反射镜的反射率

通过对众多的高分辨TEM照片的分析,我们得到如下一些结论:MO-Si膜的界面粗糙度为0.2—0.4nm,Ni-C膜则为0.15—0.3nm;Mo-Si膜的层厚误差小于±8%,Ni膜层厚度误差小于±5%,碳膜层厚度误差约为±10%。依据这些参数以及从文献^{[23][24]}中查得的膜料光学常数,我们可以对目前制备的多层膜计算软X光反射率。例如,一个对波长10.57nm设计的Ni-C正入射反射镜,(41层, $D_{Ni} = 1.8\text{nm}$, $D = 3.6\text{nm}$),理论计算正入射时反射率为12.8%。取粗糙度为 $\sigma = 0.15\text{cm}$,Ni膜厚度随机误差小于±5%,C膜随机误差小于±20%,得到的反射率曲线如图5(a)所示。它对于10.57nm的正入射反射率为7.8%,为理论值的61%。又如,对于13.55nm设计的Mo-Si正入射反射镜, $D_{Mo} = 3.0\text{nm}$, $D_{Si} = 3.5\text{nm}$,42层的理想反射率为26.2%,取 $\sigma = 0.2\text{nm}$,层厚随机误差小于±8%,得反射率曲线如图5(b)所示,它对于13.55nm的正入射反射率为12.2%,为理论值的47%。

图6(a)是一个用可见光透射率方法监控的12层Ni-C膜的反射率实测曲线,测量设备是日本高能物理研究所同步辐射源(KEK-SR)上的软X光反射率仪。图6(b)则是该样品在入射角为40°时的实测曲线与计算曲线的比较。为使反射率极大值的数值一致,图中的各反



(a) 12层Ni-C膜实测反射率 (b) $\alpha = 40$ 的实测 (---) 与计算 (—) 曲线的比较

射率值取计算值的57%。可见它们大致是符合的，但主峰变宽，次峰几乎消失。这显然是由于层厚误差与粗糙度引起的。从反射率值下降的数据看，与图5所估算的值大致相等。从X光衍射谱及俄歇谱的观察中，我们已证实了用石英晶振监控法所得的膜在结构上明显优于光控法所得的膜，由此可以推断，图5所示的结果是可信的。

总之，用石英晶振监控法我们已经制备了对于波长为10nm左右的正入射反射率达到10%左右的软X光反射镜，这些反射镜已经具有了实际使用的价值。

4. 用PVD与LB技术相结合制备软X光反射镜

从软X光反射镜的原理可知，为了得到尽可能高的软X光反射率，在选择材料时要选择 δ 和 β 尽可能小的材料，即Z值尽可能小的材料。但在无机固体材料中，只有锂、铍、硼这三种元素的Z值比碳低，但它们化学性质太活泼，或有毒，都难以成膜。实际上可以用的低Z材料只有碳或Z值更大的硅。

氢是原子序数最小的元素。主要由碳和氢组成的一些有机分子具有极低的平均原子序数，它们的 δ 和 β 都非常小，因而是十分理想的低Z层材料，不少有机分子都可以用Langmuir首创并由Blodgett发展的液槽拉膜技术（简称LB技术）制备单分子膜。

实际上，在用PVD方法以前，早已有人用LB膜来制备2—20nm波段的软X光反射镜，并证明了它有界面光滑、厚度精确易控的优点，但由于层数不能做得很多、层厚不能任意调节，牢度较差等缺点，因而逐渐被PVD方法所取代，然而它的优点仍然是客观存在的。我们比较了金属—有机分子多层结构与常用的高Z元素—低Z元素多层结构软X光反射特性。计算表明，在13.5nm波长常用的Mo-Si多层膜，在理想条件下（粗糙度为零，DH/DL为最佳值）十一层膜所能达到的最大反射率为16%（其中S光为28%）而金—硬脂酸膜在厚度未经优化情况下的反射率即达20%（其中S光为28%）当然，金属—有机多层膜的周期厚度是可以由金属膜的厚度来任意调节的，由于金属膜的加入，牢度也必然会大为提高。

我们采用硬脂酸镉 $[\text{Cd}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2]$ 作为有机分子材料，它的分子长度为2.5nm。制膜时，先把硬脂酸溶解在 $1 \times 10^{-4}\text{M}$ 的氯仿中，滴入盛有18M Ω 去离子水的LB拉膜槽，待氯仿完全挥发后在平行水面方向加 $3 \times 10^{-2}\text{N/m}$ 的表面压力，即形成均匀的硬脂酸单分子膜，再加入 $5 \times 10^{-4}\text{M}$ 的镉离子，即形成硬脂酸镉单分子膜。水温为 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ ，拉膜速度控制在2mm/min。

淀积了LB膜后，把样品放在充氮的干燥器中1—2天，以彻底去掉膜内剩余的水分子，然后才放入真空镀膜机中蒸镀金膜。

由于在高真空中，LB膜极易受热脱附，因而基板温度不宜过高，蒸发速度不宜过快，

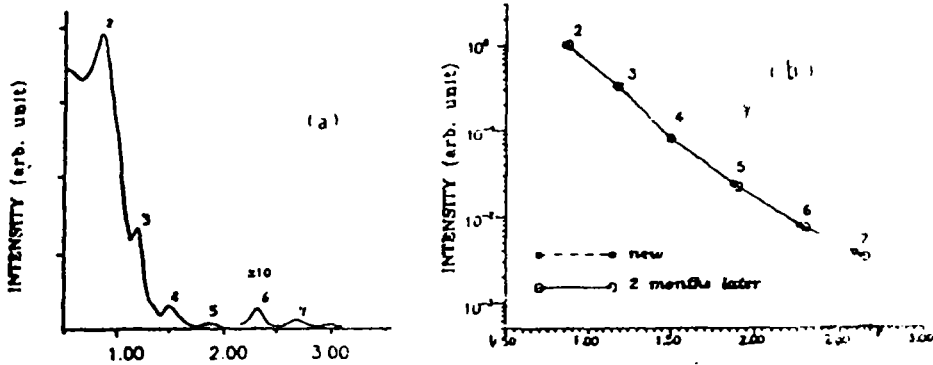


图7 Au-LB多层结构的稳定性

(a) 一个七层Au/CdSt₂结构的X光小角衍射谱

(b) 该谱的峰值位置和相对强度在放置两个月后的变化

在真空中放置时间也不宜太长，我们采用的蒸发速度为0.05nm/s，基板温度控制在20℃—30℃，在真空中放置时间小于八分钟。膜厚由石英晶振测厚仪监控，厚度按使用波长的要求控制在3nm—6nm范围。镀好金膜后再放入拉膜槽。淀积LB膜前基板先用电子束镀膜设备预镀一层非晶碳膜，厚度约为8nm，以进一步提高其表面的光洁度。

图7(a)是一个七层金—硬脂酸铜膜的CuK α X光小角衍射谱。样品由三层硬脂酸铜和厚度为4.5nm的金交替组成。该样品在室温下于干燥缸中放置两个月后再测量X光小角衍射谱，发现其各峰值的相对大小与位置基本上没有变化，如图7(b)所示，说明这种样品的结构是十分稳定的^[25]。

根据这个样品测得的周期值，并假设其粗糙度为0.5nm，由此得到其反射率与入射角的关系如图8所示。可见，它对于13.55nm的反射率峰值在53°，平均反射率为12%，其中S偏振光的反射率达到21%。



图8 一个七层 Au/CdSt₂结构的软X光反射率

Rs: S偏振光的反射率
Rt: S.P偏振光的平均反射率,
Au-CdSt₂, $\lambda = 13.55\text{nm}$

总之，我们用PVD技术与LB技术相结合的方法制备多层膜软X光反射镜的工作取得了初步的成功，但制备的周期太长，能否经受高温的考验也是问题，还有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] E.Spiller, SPIE, 1160, (1989).271
- [2] N.M.Ceglio et al., Opt.Comm., 69, 3/4, (1988), 285
- [3] T.R.Barbee et al., SPIE, 911, (1988), 169
- [4] T.Sean Ross et al., SPIE, 1160, (1989), 655
- [5] V.Lepetre et al., Opt.Comm., 51, 3, (1984), 127
- [6] A.Khandar et al., SPIE, 688, (1986), 563, (1985), 158
- [7] L.Golub et al., SPIE, 1160, (1989), 176
- [8] Ron Iscoff, Lasers & Optonics 7, 1, (1988).28

- [9] A.M.Hawryluk et al., J.Vac.Sci.Technol., B 6.6(1988), 2 153
- [10] Arthur B.C.Walker, Jr. et al., SPIE, 1160, (1989), 131
- [11] David L.Shealy et al., SPIE, 1160, (1989), 109
- [12] A.B.C.Walker. Jr. et al., Science, 241, (1988), 1 781
- [13] R.C.Cature et al., Rev.Phys.Appl., 23, (1988). 1 741
J.P.Delaboudiniere et al., SPIE, 1160, (1989). 518
- [14] J.V.Gilfrich et al., Appl.Spectrosc., 29, (1975). 322
- [15] T.W.Barbee, Jr. et al., Appl.Opt., 24, 6, (1985). 883
- [16] S.V.Gaponov et al., Opt.Comm., 48, 4, (1984). 229
- [17] E.Spiller, AIP Conferenoe Proc.No.75, (1981). 124
- [18] 杨心亮等, 光学学报, 5, (1985). 557
- [19] 郑天水等, 光学学报, 8, (1988). 572
- [20] J.P.Chauvineau et al., SPIE, 563, (1985). 245
- [21] M.Arbaoni et al., SPIE, 652, (1986). 318
- [22] 沈元华, 《真空》, 6, (1982). 33
- [23] B.L.Henke et al., Atomic Data and Nuclear Data Tables, 27, (1982)
- [24] D.L.Windt et al., Appl.Opt. 17, (1988), 188
- [25] T.Zheng et al., Thin Solid Films, 196 (1990) (To be published)

Multilayered Soft X-ray Mirrors

Zheng Tianshui Jin Qingyuan You Tianxiang

Abstract

The principle, fabrication, and test of multilayered mirrors in soft X-ray region are described. The authors also introduce their current researches and results, which include the study of thickness control, the characters of super-thin metal monolayer, the fabrication and test of Ni-C, Mo-C multilayers, and making multilayers by using the combination of PVD and LB technologies.