

# 真空紫外反射率的测定

李云硕

**摘要:** 研制了一台测定真空紫外反射率的仪器, 在真空紫外区可测量各种反射元件在不同入射角下的反射率。用壁稳氩弧光源在100—200nm区对Al+MgF<sub>2</sub>薄膜和CVD法制备的SiC镜的反射率进行了测定。并与Al膜的理论反射率曲线做了比较。

## 一、前言

近年来随着同步辐射加速器的发展, 大大地推动了真空紫外光学和真空紫外光谱仪器的发展。由于材料在真空紫外区的高吸收特性, 很难做成透射式光学元件, 因此几乎所有的光学元件都是采用反射式的。为此怎样测定和改进各种光学元件在真空紫外区的反射特性就成为一个极为重要的研究课题。

真空紫外区已有各种各样的光源<sup>[1]</sup>。我们所研制并且投入使用的大、中、小功率的壁稳氩弧光源<sup>[2]</sup>及1m正入射Seya—Namioka型单色仪<sup>[3]</sup>和掠入射单色仪<sup>[4]</sup>等, 在真空紫外区研究光学特性及测定光学器件性能方面提供了良好的条件。

## 二、真空紫外反射特性

波长短于200nm的紫外光, 由于大气强烈吸收, 光传递都在真空中进行, 因此, 给测定工作带来一系列麻烦。尽管如此, 各种类型的真空紫外光谱仪器的发展及同步辐射光束线问世以来, 真空紫外区光谱反射特性的研究引起人们的注意, 并做了很多工作<sup>[5, 6]</sup>。

真空紫外区使用的反射镜在一般的情况下用玻璃基板上镀各种金属反射膜层。金属反射膜层在真空紫外区的反射, 由膜层材料的复折射率和电导率—即 $n = n + ik, \epsilon = \epsilon_1 + i\epsilon_2$ 来决定, 在直入射情况下其反射率为,

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (1)$$

在掠入射情况下其反射率随不同偏振状态而不同,

s偏振的反射率为,

$$R_s = \frac{\cos\theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}} \quad (2)$$

p偏振的反射率为,

$$R_p = \frac{\epsilon\cos\theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}}{\epsilon\cos\theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}} \quad (3)$$

真空紫外在短波区反射损失更为明显,因此,往往采用大角入射,接近或大于全反射临界角。波长为 $\lambda$ 的真空紫外光,当入射角 $\theta$ 时,掠入射角 $\varphi_c = 90^\circ - \theta$ ,产生全反射的临界角由下式给出,

$$\sin\varphi_c = \lambda \left( \frac{e^2 N}{m \pi c^2} \right)^{1/2} \quad (4)$$

或用古典电子半径 $r_0 = \frac{e^2}{m c^2}$ 代入(4)式,

$$\sin\varphi_c = \lambda \sqrt{\frac{N r_0}{\pi}} \quad (5)$$

式中 $e$ 为电荷, $N$ 为单位体积中的电子数目, $c$ 为光速,电子的古典半径 $r_0 = 0.28 \times 10^{-12} \text{cm}$ 。从式(5)中可以求得全反射最小临界波长 $\lambda_{\min}$ ;

$$\lambda_{\min} = (3.34 \times 10^{13}) (N)^{-1/2} \sin\varphi_c \quad (6)$$

在表1中列出几种常用材料的 $N$ 数及最小全反射临界波长 $\lambda_{\min}(\text{nm})$ 。掠入射角大于全反射临界角 $\varphi_c$ 时光全反射,而小于 $\varphi_c$ 时则反射率急剧下降。图1表示Au在全反射临界角附近的反射率变化。

真空紫外区反射特性突出的是反射光强随波长而变化,所以,所测定的都是光谱反射率,图2所示100—200nm区的Al的反射特性。可知在110nm以下Al的反射率很低,因此,常用反射膜是Au或Pt,或采用CVD法制备的SiC材料。

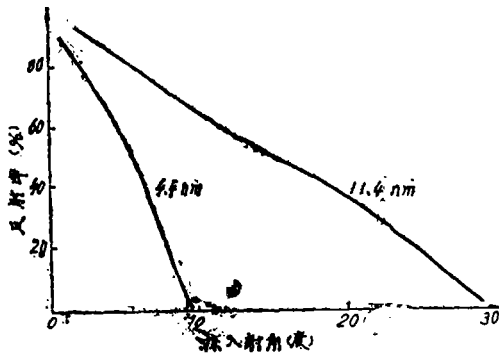


图1 Au反射面在掠入射角的反射率<sup>[5]</sup>

表1 各种反射材料的 $N$ 和 $\lambda_{\min}$ <sup>[5]</sup>

材 料	$N$ 数	$\lambda_{\min}(\text{nm})$
油(泵油)	$27 \times 10^{22}$	$64.1 \sin\varphi_c$
玻 璃	$78 \times 10^{22}$	$37.9 \sin\varphi_c$
Al	$78 \times 10^{22}$	$37.9 \sin\varphi_c$
Au	$466 \times 10^{22}$	$15.4 \sin\varphi_c$
Pt	$514 \times 10^{22}$	$14.7 \sin\varphi_c$

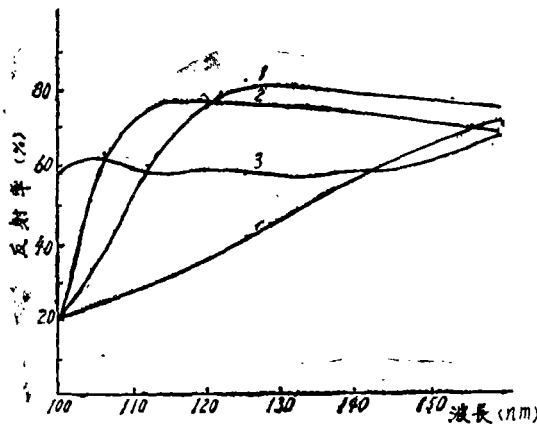


图2 反射率随波长而变化<sup>[6]</sup>

1. Al+MgF<sub>2</sub>(T=25nm) 2. Al+LiF(T=22nm) 3. Al+LiF(T=17nm) 4. Al(24h后测)

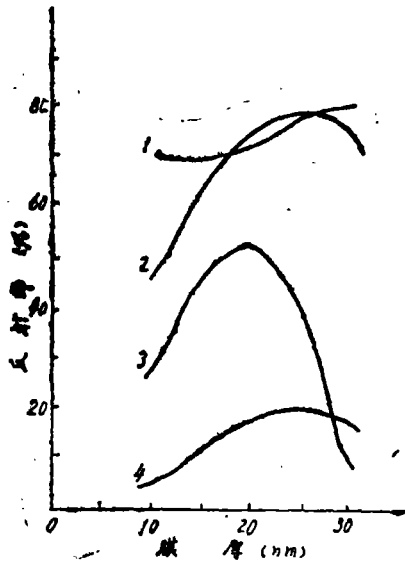


图3 膜厚与反射率关系

Al+MgF<sub>2</sub> 1. 160.6nm 2. 121.6nm  
3. 110.5nm 4. 102.5nm

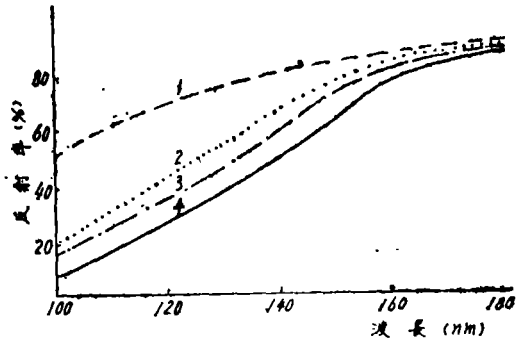


图4 在直入射情况下Al膜反射率随时间变化(s)

1. 在真空中 2. 一个小时之后  
3. 一天之后 4. 一个月之后

从图3中可知，反射镜的膜层厚度也影响反射率，过薄或过厚都降低反射率，Al膜在真空紫外区一般采用18—25nm的厚度。

在真空紫外区影响反射率的因素很多，除上述种种以外，膜层表面氧化对真空紫外的反射损失也很大。P. H. Berning<sup>[7]</sup>等人曾发表实验结果，在直入射情况下纯Al膜的反射率随时间变化，在图4中表明这个实验结果的反射率变化曲线。

为了防止Al膜的表面氧化，必须在超高真空镀膜，镀Al后立即再镀一层LiF或MgF<sub>2</sub>保护膜。

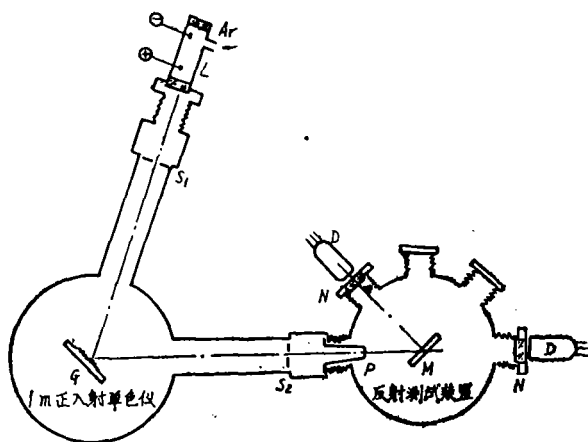
综上所述，在真空紫外区影响反射率的因素很多，此外，还有镀膜工艺，反射镜的基底表面光洁度等。

测定反射率，也必须在实际使用条件相同的环境下进行，测试系统必须是高真空或超高真空系统，在测定中待测反射镜的位置更换及入射角的旋转必须保持高真空或超高真空。

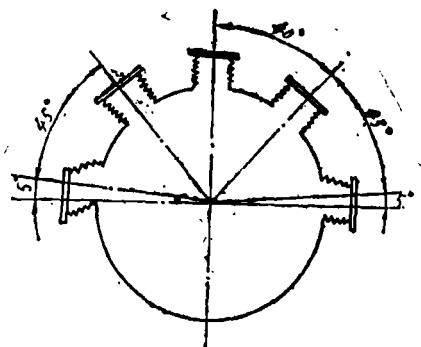
### 三、测试系统简介

测真空紫外反射率装置见图5。图中L为中等功率(1500W)的壁稳氩弧光源，它在100—250nm波长区能得到连续而且很稳定的辐射。G为1米正入射式Seya—Namiok型单色仪，其色散元件为600条线/mm的凹面光栅。从单色仪射出的单色光入射到反射率测定仪器的入射光栏P上，光栏孔径为φ1.5和φ3毫米两种，为了防止杂散光在管壁上多次反射引起的噪音，光栏固定在锥形筒的端面上。锥形筒的两个侧面各开了宽10mm长80mm的矩形开口，做为抽真空时抽气通道。从光栏P通过的光，根据测定需要的入射角照射到待测样品M上。单色仪出射狭缝到待测样品中心距为406mm，单色仪的发散角为0.3rad。光栏限制光束大小，使在待测样品上的光斑尺寸为3×3mm<sup>2</sup>。待测反射镜安放在样品架上，样品架固定在两个同心轴的端面处。这两个同心轴可以使样品前后移动，也可以使样品旋转任意角度。测定样品最大尺寸为60×140mm<sup>2</sup>。

从待测样品上反射的光，反射到涂有水杨酸钠荧光粉的密封窗口  $N$  上。光电倍增管接收荧光粉发出的可见光并转变为电讯号，再经过两次放大后记录器记录光谱谱线强度。



1 米正入射单色仪  
图 5 反射测试系统



反射测试装置  
图 6 波纹管位置

样品前后移动最大行程为 60mm。样品旋转最小刻度分隔为  $1^\circ$ ，9:1 的涡轮蜗杆传动系统来完成待测样品的旋转角度。最小反射测量角度为  $22.5^\circ$ 。图 6 所示，光电倍增管  $D$  可以在四个不同的位置上更换。每一个波纹管的摆动角为  $\pm 10^\circ$ ，而且整个测量仪器以入射光光点为轴心也可以摆动  $\pm 10^\circ$ ，因此，可测量反射角的变动范围如图 6；

- 第一波纹管  $22.5-60^\circ$  能测范围  $37.5^\circ$
- 第二波纹管  $70-110^\circ$  能测范围  $40^\circ$
- 第三波纹管  $120-160^\circ$  能测范围  $40^\circ$
- 第四波纹管  $170-180^\circ$  能测范围  $10^\circ$

从图 6 中看到第一波纹管 and 第四波纹管偏离  $5^\circ$  是为了在掠入射情况下测定反射率而设置的。样品室全部采用不锈钢，密封结构采用超高真空金属密封，在测量过程中样品的移动和旋转都在保持真空下进行。该仪器今后安装在同步辐射光束线上进行测量工作，因此，结构设计要求达到  $10^{-9}$  torr 的超高真空。在沈阳科学仪器厂实测，真空漏率不大于  $5 \times 10^{-9}$  L/s。

### 四、测定结果

对 Al 膜和 Al +  $MgF_2$  膜及 CVD 法制备的 SiC 镜片进行了测量，测定工作主要对 Al +  $MgF_2$  反复进行，测定光谱范围在 100—250nm 的真空紫外区。

若令光源的光谱强度为  $I_0$ ，经样品反射后的光谱强度为  $I$ ，则光谱反射率  $R$  为：

$$R = (I/I_0) \times 100(\%)$$

图 7 是壁稳氩弧光源光谱强度实测曲线。为方便观察，在同一图上也标出实测样品的反射光谱强度。上面曲线是不经样品的反射光谱强度，做为标准比较，下面曲线是经过样品后的反射强度曲线。这两者比较并换算出的 Al +  $MgF_2$  光谱反射率曲线在图 8 中。

图 9 是根据日本计测研究所波冈武先生提供的 Al 在真空紫外区的消光系数而计算的理论反射率曲线。

SiC 反射率在 100—250nm 区较低，为 24% (150nm)，31% (200nm)

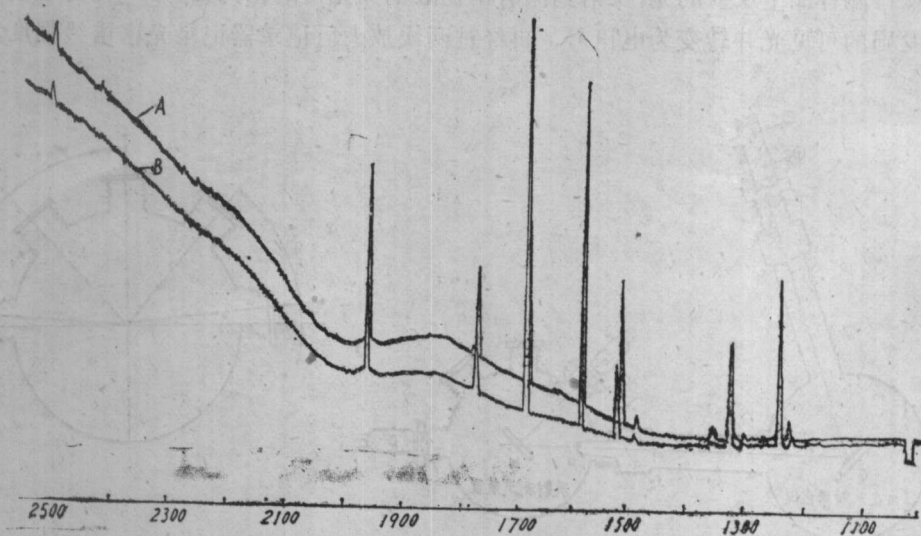


图7. 壁稳氩弧光源光谱图

A为辐射强度 B为反射强度

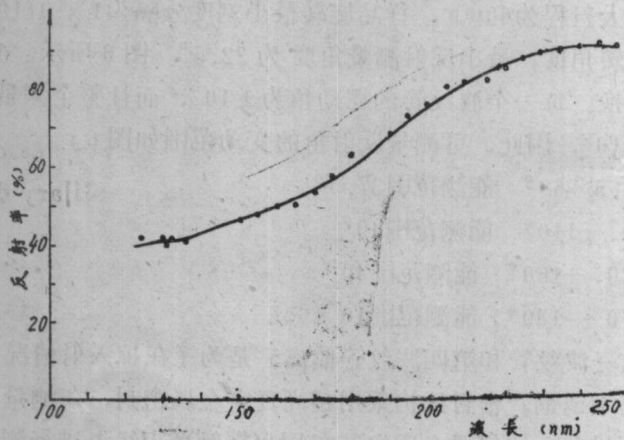


图8 Al + MgF<sub>2</sub>反射率曲线(1986, 7, 9)

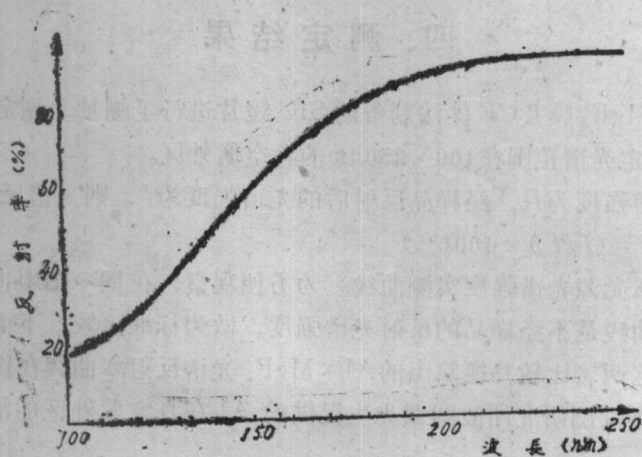


图9 纯Al的理论反射率曲线

以上测定都在入射角 $22.5^\circ$ 下进行的。

本仪器设计方案曾和陈今涌同志讨论过，郭志英同志参加设计，檀慧明同志、赵振武同志参加测定，在此表示感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] 陈星旦, 光学机械 1982.1
- [2] 李福田, 光学学报 1984.1
- [3] 王传基, 光学机械 1985.3
- [4] 陈今涌, 光学机械 1985.3
- [5] 铃木範人, 応用物理ハンドブック p691
- [6] A.N.Zaidel et.al., Vacuum Ultraviolet Spectroscopy p79 (London 1970)
- [7] H.Berning et.al., J.Opt.Soc.Amer., 50, 59(1960)

### Measurement of the Vacuum Ultraviolet Reflectivity

Li Yunshuo

#### Abstract

A high precision equipment for VUV reflectivity measurement has been developed. It consists of Seya-Namioka concave grating VUV monochromator, wall-stabilized argon arc VUV source, capillary discharge VUV source, and high precision VUV reflectometer. The reflectivity of some sample, such as mirrors coated with  $Al-MgF_2$  film and SiC mirrors prepared by CVD method, was investigated at the spectral range from 50nm to 300nm. The comparison between theoretical and experimental results is present.