

超低透过率的测定

崔敦杰 任建伟

摘要: 本文介绍了用波长为632.8nm的He—Ne激光器作为光源测量透射比小于 $10^{-7}/\text{cm}^2$ 的X光滤光片针孔透射比的方法。为了测量这样低的透过率,我们设计和安装了反射式超低透过率测定装置。用黑色玻璃作为反射式衰减元件,用光电倍增管作为接收器,用数字电压表作为读数仪表。同时,还用中性玻璃滤光片组作为透过式衰减器,也测量了超低透过率。两种方法都得出满意的结果。

一、引言

X光滤光片是无基底镀铝薄膜,其针孔透射比低于 $10^{-7}/\text{cm}^2$,这一点对光学测定工作来说是一项特殊的要求。通常所说的光学透射比(以下简称透射比)是指出射辐射通量与入射辐射通量之比。要在 10^{-7} 这样的数量级上比较能量是困难的,这种困难首先在于没有一种接收器和显示器系统具有这样大的线性范围。第二是为了保证测量精度,要求入射光功率大,稳定性好。第三是这种滤光片的几何形状特殊,而且要求测量面积平均透射比,必须要一套扫描机构。另外,由于出射通量很低,杂散光影响很大,并且这种透射机理是针孔衍射,出射光与入射光大不相同,因此测定出射光时也要采用相应的措施。

我们采用透过减光和反射减光两种方法进行测量,并进行比较,其结果令人满意。

二、测量装置

镀铝薄膜的透过机理是小孔透过,可认为无光谱选择性。为了保证测量精度,我们采用国产20mW He—Ne激光器作为光源,用外部激光稳功器来克服输出功率的不稳定性,其特点是辐亮度大、准直性好,输出功率变化小于2% (短时间内小于1%)。

为了测量样品的平均透射比,将光束扩束到 $\phi 10\text{mm}$,然后在扩束器后面用梯形孔光阑限制光束,取出适当大小的光斑,使之适合于扫描扇形样品。

图1是反射减光方式测量装置的原理图。 M_2 是一块镀铝反射镜, M_3 是黑色玻璃。黑玻璃的表面经光学加工成镜面, M_2 与 M_3 平行放置。反射镜 M_1 在 M_2 与 M_3 的中间位置,可沿它们的中线移动,改变光线在 M_2 与 M_3 上的反射次数。

样品有特定的形状和大小(见图2),数量也较多,为防止杂散光和提高测量速度,设计了超低透过比测定装置,在积分球前放置样品,样品前还有一个光阑,当移动样品时,可沿样品长度方向人工扫描,得样品的平均透射比。

积分球内表面喷涂氧化镁(MgO),使到达光电倍增管的光束为一均匀光。光电倍增管为日本产R456型,其暗电流比国产品低一个数量级。光电倍增管输出由数字电压表读数,高压电源稳定在千分之几以内。

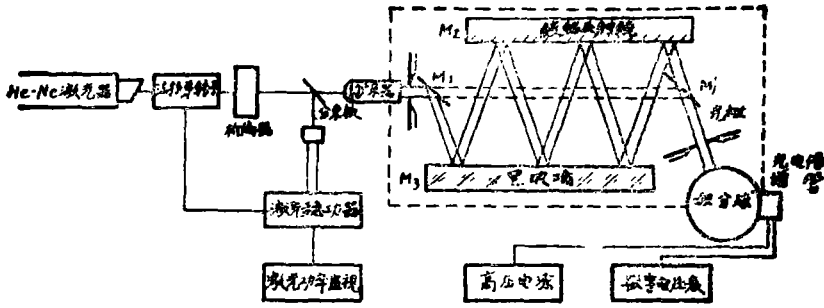


图1 测量装置原理图

三、测量原理

设未经 M_2 、 M_3 反射而进入积分球的辐射通量为 Φ_0 ，经 n 次 ($n = 2, 4, 6 \dots$) 反射后进入积分球的辐射通量 Φ_n ，两者都通过小镜 M_1 反射到积分球内。设两者的减光比为 $\beta_n^{(n)}$ ，则有：

$$\Phi_n = \beta_n^{(n)} \cdot \Phi_0 \quad (1)$$

β_n 是多次反射的反射比之积，可表示为：

$$\beta_n^{(n)} = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot \dots \cdot \beta_n \quad (2)$$

在理想情况下应有：

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_n = \beta$$

这时有：

$$\beta_n^{(n)} = (\beta)^n \quad (3)$$

但在实际情况下，反射镜各点的反射比并不完全相同，即 $\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \dots \neq \beta_n$ ，因此我们只能逐次测出反射表面上各点的反射比：

$$\beta_2 = \frac{\Phi_2}{\Phi_0} \quad \beta_4 = \frac{\Phi_4}{\Phi_2} \quad \dots \beta_n = \frac{\Phi_n}{\Phi_{n-2}}$$

根据(2)式得出：

$$\begin{aligned} \beta_n^{(n)} &= \left(\frac{\Phi_2}{\Phi_0} \right) \cdot \left(\frac{\Phi_4}{\Phi_2} \right) \cdot \dots \cdot \left(\frac{\Phi_n}{\Phi_{n-2}} \right) \\ &= \left(\frac{i_2}{i_0} \right) \cdot \left(\frac{i_4}{i_2} \right) \cdot \left(\frac{i_6}{i_4} \right) \cdot \dots \cdot \left(\frac{i_n}{i_{n-2}} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $i_0, i_2, i_4, \dots, i_n$ 为相应于 $\Phi_0, \Phi_2, \Phi_4, \dots, \Phi_n$ 的光电流。其中的每个值都可控制在光电倍增管的线性范围以内。当 $n = 8$ 时， β_n 在 10^{-8} 数量级上。

根据透射比的定义：

$$\tau = \frac{\Phi}{\Phi_0}$$

Φ 是 Φ_0 光经样品后的输出光。这时代入(1)式有：

$$\tau = \frac{\Phi}{\Phi_n} \cdot \beta_n = \frac{i}{i_n} \cdot \beta_n^{(n)} \quad (5)$$

在某一条条件下预先测定 $\beta_{\cdot}^{(n)}$ 后，只要在线性范围内测出 i 和 i_{\cdot} 值，就可以算出 τ 值来。这种方法的好处是通过调节 β_{\cdot} （反射次数）可使 i 和 i_{\cdot} 同为线性输出，能得到很低透过比。

三、对产生误差原因的分析

1. 光电倍增管的线性

设光电倍增管对辐射通量 Φ_1 、 Φ_2 的响应为 i_1 、 i_2 ，对辐射通量 $\Phi_1 + \Phi_2$ 的响应为 i_{12} ，当 $\Phi_1 \approx \Phi_2$ 时如果 $i_{12} = i_1 + i_2$ ，则认为光电倍增管在 Φ_1 至 $\Phi_1 + \Phi_2$ 区间内线性很好。为表示线性程度，令 $i_{12}/(i_1 + i_2) = 1 + |\alpha|$ ，当 $|\alpha| \leq 1\%$ 时，一般可认为线性满足要求。光电倍增管的线性区域与所加高压和入射辐射通量有关。对R456型光电倍增管的线性来说，当高压加到1000V，电流小于 10^{-5} A时 $|\alpha|$ 值小于1%，我们的测量就是在这种条件下进行的。

2. 减光比的测定

如公式(4)所示，在每次测量样品前要先求得黑玻璃与铝表面之间的各次反射比的乘积。这看起来似乎不必要，而且由于增加测量次数，可能增加误差的来源。但这样做的原因在于：

(1) 镀铝和黑玻璃表面上各点反射率不一定相同，而且每次调光时入射角都有些变化，使减光比产生变化，因此不能用某一点的反射比代替他处的反射比；

(2) 光线在 M_2 、 M_3 上的入射角为 13° 左右，我们所用的激光是线偏振光，因此在反射表面上随着反射次数的增加而反射比也变化。

一次实验中反复测量 $\beta_{\cdot}^{(n)}$ 值结果如下：

次 数	1	2	3	4	5
测量值 ($\beta_{\cdot}^{(n)}$)	2.46×10^{-6}	2.55×10^{-6}	2.51×10^{-6}	2.66×10^{-6}	2.53×10^{-6}

标准偏差 $\sigma_{n-1} = 0.074 \times 10^{-6}$

相对标准偏差 $\frac{\sigma_{n-1}}{\bar{\beta}_{\cdot}} = 2.9\%$

$$\text{其中 } \bar{\beta}_{\cdot} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \beta_{\cdot i}$$

3. 与组合透过滤光片组比较

用吸收滤光片组合也是一种很方便的减光方法。用一组相互隔离的滤光片时，如果滤光片内吸收足够大而可以忽略介面之间多次反射的影响^[1]，则有

$$\tau_{\cdot, \lambda} = \tau_{1, \lambda} \cdot \tau_{2, \lambda} \cdots \tau_{n, \lambda} \tag{6}$$

其中 $\tau_{\cdot, \lambda}$ 为组合后的总透射比， $\tau_{1, \lambda}$ ， $\tau_{2, \lambda}$ ， \cdots ， $\tau_{n, \lambda}$ 分别为各个滤光片的透射比。我们用了下列五种滤光片： $\tau_1 = 2.23 \times 10^{-2}$ ， $\tau_2 = 9.73 \times 10^{-2}$ ， $\tau_3 = 9.93 \times 10^{-2}$ ， $\tau_4 = 9.98 \times 10^{-2}$ ， $\tau_5 = 32.1 \times 10^{-2}$ （均为实测值）。其中 τ_1 和 τ_5 是不得已采用的滤光片， τ_5 容易产生介面反射的影响， τ_1 则容易产生非线性问题。用这五个滤光片组成的 $\tau_{\cdot, \lambda} = 6.90 \times 10^{-6}$ （计算值），我们称这种减

光法为透过减光法。我们用反射式减光法进行实测验证，多次测量得出：

$$\tau_{\text{测}} = 6.99 (\pm 0.11) \times 10^{-6}$$

与计算值比较相差1.3%。

4. 小孔的随机分布问题

X光滤光片小孔直径大小在 μm 数量级上，其分布是随机的，所以小孔的分布问题是决定测量结果重复性的重要因素。我们采用的人工机械扫描的位置精度远达不到 μm 级，很难保证测量的重复性。为了保证不漏检针孔，使每次测量的扫描光斑都有部分重叠，如图 2 所示。这样测得的平均值要比实际值差，但不能产生漏测问题。

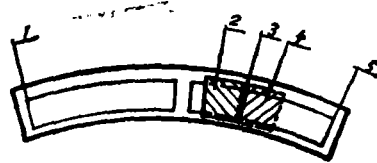


图2 光斑重叠措施

1. 样品，2. 光斑区，3. 光斑重叠区，
4. 光斑区，5. 样品架。

5. 其它问题

(1) 光电倍增管高压电源的稳定性

为了考查光电倍增管高压电源稳定性对其输出的影响，我们在某一高压下对读数的变化进行了记录（其它条件不变），开机30分钟后，每隔10分钟读一次数，结果如下（相对单位）：

次数	1	2	3	4	5	6	7	平均
读数	0.00214	0.00214	0.00211	0.00209	0.00211	0.00212	0.00211	0.00212

$$\text{标准偏差 } \sigma_{n-1} = 1.8 \times 10^{-6}$$

$$\text{相对标准偏差 } \frac{\sigma_{n-1}}{\bar{X}} = 0.85\%$$

其中 \bar{X} 为读数的平均值。

可以肯定，高压电源对读数的影响是很小的。

(2) 杂光问题

光路中采取了较严格的挡光措施，反光系统装在封闭盒内，因此外杂光的影响可以忽略。但是由于内杂光的影响，反射次数很大时（减光比很大时）影响测量精度，如图 3 所示。

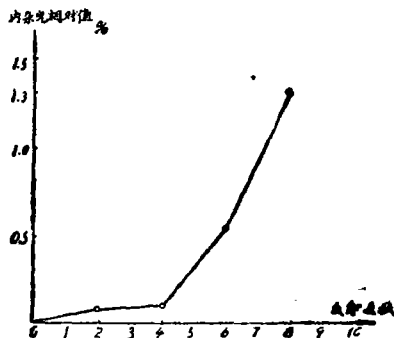


图3 内杂光和反射次数的关系

(3) 对光问题

激光的准直性较强,系统中使用的光学件较多,而且多数是可调的,因此对光时也需留心。测定减光比时,由于每次对光不能完全相同,因此对每批样品,测量一次总减光比 β ,不能隔些时间后还用以前的数据。

四、结 果

在不考虑针孔的随机分布问题的前提下(不考虑样品本身透射率变化的情况),用这种系统进行测量时可能产生的偏差大致如下:

$$\Delta = \sqrt{\sum r^2}$$

$$= \sqrt{r_{\text{线}}^2 + r_{\text{杂}}^2 + r_{\text{反}}^2 + r_{\text{光}}^2}$$

其中 $r_{\text{线}}$, $r_{\text{杂}}$, $r_{\text{反}}$, $r_{\text{光}}$ 分别为光电倍增管的线性偏差、杂光影响减光比精度产生的相对偏差、激光不稳定性产生的偏差。对这些值有如下的估计: $r_{\text{光}} = 2.0\%$, $r_{\text{杂}} = 1.3\%$, $r_{\text{反}} = 2.9\%$ ($r_{\text{反}}$ 为反射减光比 β 的测量误差), $r_{\text{线}} = 2.0\%$, 由此, $\Delta = 4.1\%$ 。在 $10^{-6}/\text{cm}^2$ 数量级的透射比测量中,这种精度已足以满足X光滤光片测量精度的要求。

本装置的测量范围到 10^{-8} 量级,如果再提高光源功率,或用制冷等一些办法来减少光电倍增管的暗电流,则测量范围有可能再扩充。

两年来,我们测量了近两千片次样品,在透过率为 $10^{-7}/\text{cm}^2$ 数量级上,连小孔随机分布引起的不重复性在内,测量值的重复性小于30%,满足了预定要求。这项工作始终是在冯家璋先生的指导下进行的。王勤同志为实验设计了机械装置,陈素芳、周雅琴同志也参加了实验工作,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] G. Wyszecki and W.S. Stiles, «Color Science», John Wiley Sons, Inc. New York, 1969, 70

Measurement of the Ultralow Transmittances

Cui Dunjie Ren Jianwei

Abstract

This paper presents a method to for testing optical transmittances of the X-ray filters as low as $10^{-7}\sim 10^{-8}/\text{cm}^2$. In this method we used a He-Ne laser operating at 632.8nm wavelength as a light source. In order to measure such low transmittances, we designed and equipped a ultralow transmittance measurement device of reflection mode, using a photomultiplier as the detector, a digital voltmeter as the reading device. Moreover, we also used a group of grey absorbing filters as the transmitting attenuator to measure the ultralow transmittances. Both methods have given satisfactory results.