

文章编号: 1002-2082(2006)SO-0061-04

红外光学系统透射比测量

杨 红, 汪建刚, 姜昌录, 赵宝珍

(西安应用光学研究所 光学计量一级站, 西安 710065)

摘要: 讨论了光学系统透射比与辐照度、数值孔径之间的理论关系。介绍了目前测量红外光学系统透射比的几种方法: 积分球法、大面积均匀源法、全孔径透射比测量和双光路法。通过对其原理和可实现性进行比较, 认为建立在大面积均匀法基础上的测量装置简单易行, 且测量快捷、准确、可靠, 能达到比较满意的效果。采用大面积均匀源法对红外标准透射比板进行了测量, 获得了两组实验数据, 并对采用大面积均匀源法测量透射比的装置进行不确定度分析, 分析结果表明: 测量结果的不确定度为 2.6%。

关键词: 红外系统; 透射比测量; 红外光源; 红外探测器

中图分类号: TN216

文献标志码: A

Transmittance measurement for IR optical systems

YANG Hong, WANG Jian-gang, JIANG Chang-lu, ZHAO Bao-zhen

(Optical Metrology Laboratory, Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The relation of transmittance versus irradiance and numerical aperture (NA) of optical systems is discussed in this paper. Some methods of measuring the transmittance of IR optical systems are introduced, such as the method of integrating sphere, method of broad-area uniformity source, method of full aperture transmittance measurement and method of dual beam paths. The differences between theory and realizability of the above mentioned methods are also put forward. The measurement setup based on the method of broad-area uniformity source is regarded as the one which can measure the transmittance quickly, accurately and reliably, and can achieve a satisfactory effect by comparison with all the methods for transmittance measurement. The IR standard transmittance board was measured by the method of broad-area uniformity source, and two sets of experiment data were obtained. The uncertainty of the instrument which adopts the method of broad-area uniformity source is analyzed. The result indicates that the value of uncertainty is 2.6%.

Key words: infrared system; transmittance measurement; infrared source; infrared detector

引言

透射比参数是评价光学系统性能的重要指标之一。鉴于红外光学系统在侦察、跟踪、制导、夜视以及观瞄等军事领域的广泛应用, 准确测量红外光学系统透射比有着深远的意义。

红外光学成像系统的性能主要取决于到达物镜最后像平面(即探测平面)上的辐照度(单位面积上的入射通量), 而这个辐照度又随目标面辐射强度(单位投影面积上单位立体角的辐射通量)、物镜的数值孔径(或 F 数)及透射比(在反射系统情况时

收稿日期: 2006-07-20; 修回日期: 2006-09-05

作者简介: 杨红(1960—), 女, 长春市人, 西安应用光学研究所高级工程师, 主要从事光学设计、光学计量及测试研究工作。

的反射比)而变化。

1 定义及有关公式

1.1 定义

透射比是表示在给定样品的测量中透射辐射与入射辐射功率之比。通常要测量的是红外光学成像系统的轴向透射比这一参数。其定义可用下式表示:

$$\begin{cases} T(\lambda) = W(\lambda) / W_0(\lambda) \\ T(\lambda) = P(\lambda) / P_0(\lambda) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $W_0(\lambda)$ 和 $P_0(\lambda)$ 分别为入射到光学系统上的功率和能量; $W(\lambda)$ 和 $P(\lambda)$ 分别为经过光学系统后的功率和能量。通常轴上透射比是辐射波长的函数,可借助一个或多个不连续的波长测出,也可在一个特定的光谱带(必要时用加权)上测出综合透射比。

1.2 辐照度与数值孔径和透射比的理论关系

假设一个辐射率为 N 的目标经一均匀透射比的透镜(透镜的数值孔径为 $n \sin \alpha$, n 为成像介质的折射率,对空气而言, $n=1$)成像,对一个目标像给出的辐照度为 H 。入射到面积为 ds 的透镜入射光瞳上的目标总辐射通量由下式给出:

$$H = \pi N ds \cdot \sin^2 u \quad (2)$$

式中: u 是在目标处透镜入射光瞳所对的半角;目标像 ds' 的总辐射量等于 $F \times T$, 则有

$$H = \frac{F \times T}{ds'} = \frac{\pi N T ds \cdot \sin^2 u}{ds'}$$

根据正弦条件得:

$$h \sin u = h' \sin u' \quad (\text{设目标和像都在空气中})$$

式中 h' 和 h 分别是像和目标的高度,于是有:

$$ds \cdot \sin^2 u = \pi N T ds \cdot \sin^2 \alpha = \pi N T (NA)^2 \quad (3)$$

式中: N 为辐射度 ($Wsr^{-1} \cdot cm^{-2}$); NA 为透镜数值孔径; T 为被测透镜的透射比; H 为像面辐照度 (Wcm^{-2})。

2 测量技术

2.1 积分球法

图1为可见波段测量透镜轴向透射比的一种传统方法,它也可用来测量红外波段光学系统的透射比。

积分球的特殊性质是:从探测器取得的信号仅为进入积分球腔内通量的一个函数,它不取决于进入的光束的截面积和张角。透射比测量是求出2个信号之比,一个信号是在准直光束通过透镜后进入积分球孔径时取得的信号,另一个信号是移去透

镜光束直接进入积分球内取得的信号。积分球目前存在的问题是积分球制造困难(制造散射内表面高反涂层困难),要求红外探测器有足够高的灵敏度(即给出足够大的信噪比)和大尺寸的探测元件。

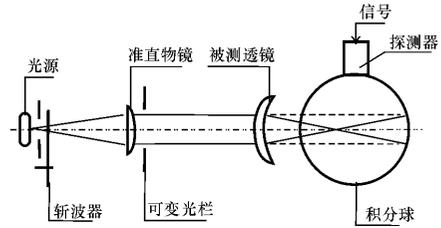


图1 积分球法测量透射比示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transmittance measurement with integrating spherical method

2.2 大面积均匀源法

由于积分球存在上述问题,人们提出另一种测量透射比的技术——大面积均匀源法(见图2所示)。均匀大面积辐射光源是由一个表面涂黑的热铜板制成的。该光源既可直接也可经过被测透镜,在探测器上成像。系统的几何形状应合理安排,以便热铜板像大于探测器元件。该方法的特点是装置制造和调校相对简单,成本低,测量方便、准确。

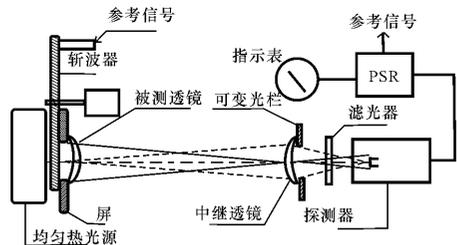


图2 用大面积均匀源法测量轴向透射比

Fig. 2 Axis transmittance measurement with method of broad-area uniformity source

当测量光路未放被测系统(空测)时,探测器输出信号由下式给出:

$$S_0 = R \cdot N \cdot \omega_0 \cdot A \cdot T_0 \quad (4)$$

式中: R 是探测器光谱响应度; N 是光源辐照度; ω_0 是探测器光栏对应的立体角(即入射到探测器上光线的立体角); A 是探测器的面积; T_0 是中继透镜的透射比。

测量光路中放上被测系统(实测)时,则有

$$S = R \cdot N \cdot \omega \cdot A \cdot T_0 \cdot T \quad (5)$$

式中: T 是被测系统透射比; ω 是在此情况下的入射立体角。

假定探测器光栏直径相同,探测器相对于中继光学系统位置相同,则 $\omega = \omega_0$,此时有

$$T = \frac{S}{S_0} \quad (6)$$

2.3 全孔径透射比测量

该方法应用大面积均匀源法,先用被测透镜将光源直接成像在探测器上获得一信号,然后移开透镜,在探测器位于光源一已知距离处测得另一信号。两次信号之比即为透射比(见图3所示)。在这种方法中,需知道被测透镜的数值孔径。为方便准直光束进入被测透镜,可用准直方法进行这种测量。这时已知距离将变为准直仪的焦距,前提是光栏要调整好,并使光束正好充满被测透镜的全孔径。

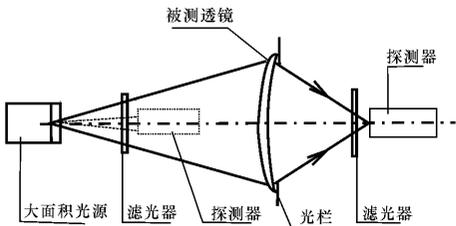


图3 用大面积光源测量全孔径透射比

Fig. 3 Full-aperture transmittance measurement with large-area light source

2.4 双光路法

此方法是以上方法的改进和完善,主要应用反射镜自动反射技术和分光镜等。从测试原理上讲,其特点是准确度更高,但光路调整复杂,测试系统光源辐射能量经各个环节衰减后,到达接收部件已相当微弱,信噪比降低;另外,这种测试系统的制造成本也比较高。

综上所述,以上几种测量方法,大面积均匀源法较为简单可行,且能达到比较满意的效果,是目前采用的先进方法之一。鉴于实际工作中大都需要

表1 3 μm~5 μm 波段标准滤光片的测量结果

Table 1 Measurement results of standard filter at waveband of 3 μm~5 μm

	1	2	3	4	5	6	\bar{x}	$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$
Φ23 硅单晶	0.959	0.959	0.952	0.958	0.957	0.961	0.958	3.1×10^{-3}
Φ35 硅单晶	0.982	0.980	0.974	0.979	0.982	0.985	0.980	3.7×10^{-3}
Φ23 硅单晶(未镀膜)	0.525	0.522	0.521	0.521	0.518	0.527	0.522	3.2×10^{-3}
Φ35 硅单晶(未镀膜)	0.522	0.516	0.521	0.521	0.522	0.515	0.520	3.2×10^{-3}

测量轴上中心透射比这一参数以及对红外光学系统透射比测量需求的日益增加,相应的测试仪器将随之产生和增多,需在大面积均匀法基础上建立测量更为快捷、准确、可靠的装置。

3 不确定度分析

3.1 影响测量不确定度的分量

考虑到(4)、(5)和(6)式中 A , ω , ω_0 和 T_0 对不确定度的贡献很小,在对上述3个公式分别取微分的时候,认为它们为常数,于是可得到以下结果:

$$dS_0 = N \cdot \omega_0 \cdot A \cdot T_0 \cdot dR + R \cdot \omega_0 \cdot A \cdot T_0 \cdot dN \quad (7)$$

$$dS = N \cdot \omega \cdot A \cdot T_0 \cdot T \cdot dR + S + R \cdot \omega \cdot A \cdot T_0 \cdot T \cdot dN + R \cdot N \cdot \omega \cdot A \cdot T_0 \cdot dT \quad (8)$$

$$dT = dS/S_0 - S \cdot dS_0/S_0^2 \quad (9)$$

上述公式表明: dT 与 dS 和 dS_0 有直接关系,而 dS 和 dS_0 是与光源辐照度的稳定程度 dN 以及探测器响应度的变化 dR 有关联的,由此可得出影响测量结果不确定度的主要因素有:

- 1) 测量重复性引起的不确定度 u_1 ;
- 2) 光源不稳定性引起的不确定度 u_2 ;
- 3) 标准滤光片引起的不确定度分量 u_3 ;
- 4) 机械装夹引起的不确定度分量 u_4 ;
- 5) 探测器响应度引起的不确定度分量 u_5 。

3.2 测量不确定度评定

3.2.1 测量重复性引起的不确定度 u_1

选用3 μm~5 μm波段的标准滤光片进行测量,用测量数据的实验标准差表示其测量不确定度。由下式计算 u_1

$$u_1 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

计算结果见表1。

选用8 μm~12 μm波段的标准滤光片测量6

次,用测量数据的实验标准差表示其测量不确定

度。结果见表 2 所示。

3.2.2 光源不稳定性引起的不确定度 u_2

光源特性和实验结果表明它对不确定度的贡献量为 $u_2=0.008$ 。

3.2.3 标准滤光片引起的不确定度分量 u_3

表 2 8 μm ~12 μm 波段标准滤光片测量结果

Table 2 Measurement results of standard filter at waneband 8 μm ~12 μm

	1	2	3	4	5	6	\bar{x}	$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$
$\Phi 23$ 锗单晶	0.973	0.974	0.971	0.980	0.982	0.977	0.976	4.3×10^{-3}
$\Phi 35$ 锗单晶	0.979	0.979	0.978	0.975	0.974	0.981	0.978	2.7×10^{-3}
$\Phi 23$ 锗单晶(未镀膜)	0.463	0.466	0.466	0.462	0.466	0.465	0.465	1.8×10^{-3}
$\Phi 35$ 锗单晶(未镀膜)	0.463	0.468	0.464	0.468	0.464	0.469	0.466	2.6×10^{-3}

探测器引起的不确定度为 $u_5=0.0055$ 。

3.3 合成标准不确定度

因构成合成标准不确定度的各个分量之间相互独立,所以

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} = \sqrt{0.005^2 + 0.008^2 + 0.005^2 + 0.006^2 + 0.005^2} = 0.013$$

3.4 扩展不确定度

取 $k=2$, 得到的扩展不确定度为

$$U = ku_c = 0.026$$

4 测量结果及分析

使用大面积均匀源法测量红外 3 μm ~5 μm 波段和红外 8 μm ~12 μm 波段标准滤光片得到的测量结果见表 1 和表 2 所示。在红外傅立叶光谱仪上对两组标准滤光片进行了透射比值测量标定。通过对标准滤光片在红外傅立叶光谱仪标定的光谱

标准滤光片的不确定度以测试报告给出的不确定度为准,其值为 $u_3=0.005$ 。

3.2.4 机械装夹引起的不确定度分量 u_4

机械装夹引起的不确定度为 $u_4=0.006$ 。

3.2.5 探测器响应度影响引起的不确定度分量 u_5

透射比值取加权平均值得到 2 个谱段的标定值。对比透射比板在红外光学系统透射比测量装置上的测量值和标定值,求得的透射比测量误差为 1.5%。这一结果表明:这些值均在允许误差范围内。

5 结束语

采用大面积均匀源法测量红外光学系统透射比,从测量结果不确定度分析,相对于以往的透射比测量装置,该装置的测量结果具有的准确性和可靠性更高。鉴于红外技术的广泛应用,红外光学系统透射比的测量将有助于像质评价和分析。

参考文献:

[1] 赵兴梅,师建涛,郭鸿香.一种红外双半波滤光片的设计和制造方法[J].应用光学,2006,27(3):208-210.
 [2] 郑克哲.红外光学系统焦距的测量[J].应用光学,1985,(5):27-29.