



中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

成像衍射光学元件衍射效率的测量方法

Measurement of diffraction efficiency for imaging diffractive optical elements

（征求意见稿）

（本草案完成时间：2021 年 6 月 25 日）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言..... II

引言..... III

1 范围..... 4

2 规范性引用文件..... 4

3 术语和定义..... 4

4 原理..... 5

5 试验条件..... 5

6 仪器设备..... 5

6.1 测量装置框图..... 5

6.2 光源..... 6

6.3 分光镜..... 6

6.4 聚光镜..... 6

6.5 空间滤波器..... 6

6.6 平行光管..... 6

6.7 光电探测器..... 7

6.8 光电探测器前的针孔光阑..... 7

6.9 其它实验部件..... 8

7 样品..... 8

8 试验步骤..... 8

8.1 单一波长衍射效率的测量..... 8

8.2 多波长衍射效率的测量..... 8

9 试验数据处理..... 8

9.1 衍射效率测量结果的数据处理..... 8

9.2 带宽积分平均衍射效率的计算..... 9

10 试验报告..... 9

附录 A（资料性）成像衍射光学元件衍射效率测量报告..... 10

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中国科学院提出。

本文件由全国光电测量标准化技术委员会（SAC/TC 487）归口。

本文件起草单位：长春理工大学。

本文件主要起草人：朴明旭、薛常喜、崔庆丰、张博。

引 言

成像衍射光学元件由于其特殊的成像性质在现代光学系统中得到广泛应用。衍射效率是评价成像衍射光学元件以及含有成像衍射光学元件的折衍射混合光学系统的重要指标之一。光束通过衍射光学元件后，会产生多个衍射级次，一般只关注主衍射级次的光能，其它衍射级次的光能在主衍射级像面上形成杂散光，降低像面的对比度，影响衍射光学元件的成像质量。因此，对成像衍射光学元件衍射效率的准确测量是十分必要的。

本文件基于衍射光学元件衍射效率的定义，分析了成像衍射光学元件衍射效率的测量原理及方法，给出了衍射效率测量的实验装置，讨论了测量步骤以及测量结果的分析计算方法。成像衍射光学元件衍射效率采用双光路测量的方法，该方法具有更高的测量精度和更强的环境抗干扰能力。

成像衍射光学元件衍射效率的测量方法

1 范围

本文件规定了成像衍射光学元件衍射效率的术语和定义、原理、试验条件、仪器设备、样品、试验步骤、试验数据处理、试验报告等内容。

本文件适用于成像衍射光学元件衍射效率的测量。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1.1-2020 标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则

GB/T 1224-2016 几何光学术语、符号 第4部分：光学系统的光束限制

GB/T 13962-2009 光学仪器术语 第4部分：物理光学

GB/T 11168-2009 光学系统像质测试方法 第3部分：像质测试方法

GB/T 9247-2008 显微镜 聚光镜 第3部分：分类及基本参数

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

主衍射级次 main diffraction order

成像衍射光学元件的第一级衍射级次为主衍射级次。

3.2

工作波长 working wavelength

成像衍射光学元件衍射效率测量装置进行测量时所选用光源的波长。

3.3

衍射效率 diffraction efficiency

含有成像衍射光学元件的折衍射混合光学系统的主衍射级次光能与光学系统后焦面的总光能之比。

3.4

带宽积分平均衍射效率 polychromatic integral diffraction efficiency

有限成像波段范围内衍射效率的积分平均值，其表达式见公式(1)：

$$\bar{\eta} = \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \eta_m d\lambda \quad (1)$$

式中：

$\bar{\eta}$ ——带宽积分平均衍射效率，单位为百分比（%）；

η_m ——第 m 级次衍射效率表达式；

λ_{\max} ——波段范围内的最大波长值，单位为微米（ μm ）；

λ_{\min} ——波段范围内的最小波长值，单位为微米（ μm ）。

4 原理

通过测量含有成像衍射光学元件的折衍射混合光学系统的主衍射级次能量与光学系统后焦面的总光能之比得到衍射光学元件的衍射效率，其表达式见公式(2)：

$$\eta = \frac{\text{主衍射级次光能}}{\text{总光能}} \quad (2)$$

式中：

η ——衍射效率，单位为百分比（%）。

5 试验条件

除特殊要求外，试验应在下述环境条件下进行：

- 1) 环境温度：20℃±0.5℃；
- 2) 相对湿度：≤70%；
- 3) 清洁光学元件表面，避免光学元件表面出现划痕、灰尘或污染。

6 仪器设备

6.1 测量装置框图

成像衍射光学元件衍射效率的双光路测量装置框图如图1所示，该装置主要由光源、分光镜、聚光镜、空间滤波器、平行光管、光电探测器以及待测光学系统等组成。测量时，由光源发出的光束经分光镜分成两束光，一路光束经过平行光管出射平行光后，入射到待测光学系统，由光电探测器在其后焦面位置处接收能量；另一路光束直接经分光镜反射后由另一个光电探测器接收，作为参考光路。在衍射效率测量过程中，首先在光电探测器前放置尺寸适当的针孔光阑，测量待测光学系统后焦面上主衍射级次的光能量 E_{1P} ，同时记录参考光的能量 E'_1 。一般针孔光阑不可能使全部能量通过，只能使中央亮斑和邻近的少数亮环能量通过并被探测器所接收；然后，从测量光路中移出光电探测器前放置的针孔光阑，测量并记录待测光学系统后焦面上的总能量 E_0 和参考光能量 E'_0 ；最后，成像衍射光学元件的衍射效率 η_b 可以通过公式(3)进行计算

$$\eta_b = \frac{E_{1P}E'_0}{P(r)E'_1E_0} \quad (3)$$

式中：

η_b ——采用双光路测量方法得到的衍射效率，单位为百分比（%）；

E_{1P} ——测量光路中成像系统后焦面上主衍射级能量的探测器示值；

$P(r)$ ——通过针孔光阑的主衍射级能量的比例，单位为百分比（%）；

E'_1 ——测量主衍射级能量时参考光路中的探测器示值；

E_0 ——测量光路中成像系统后焦面上总能量的探测器示值；

E'_0 ——测量总能量时参考光路中的探测器示值。

根据圆孔夫琅禾费衍射，可以得到针孔光阑所包含的能量，其表达式见公式(4)：

$$P(r) = 1 - J_0^2\left(\frac{kar}{f}\right) - J_1^2\left(\frac{kar}{f}\right) \quad (4)$$

式中：

$P(r)$ ——通过针孔光阑的主衍射级能量的比例，单位为百分比（%）；

- k ——波数，单位为 m^{-1} (m^{-1})；
 r ——积分区域，单位为毫米 (mm)；
 a ——针孔光阑的半径，单位为毫米 (mm)；
 f' ——被测光学系统焦距，单位为毫米 (mm)；
 J_0 ——零阶贝塞尔函数；
 J_1 ——一阶贝塞尔函数。

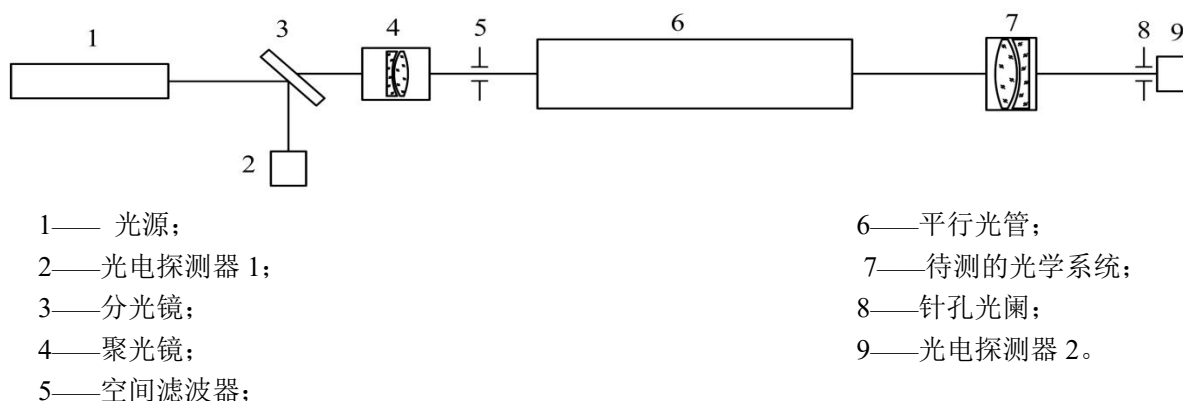


图1 成像衍射光学元件衍射效率的双光路测量装置框图

6.2 光源

在衍射效率测量装置中，选择光源稳定性较好的固体激光器作为成像衍射光学元件衍射效率测量装置的光源。激光器在开机之后的输出功率处于波动状态，根据激光器的使用说明先预热几分钟，当激光器的输出功率处于一种相对平缓的波动时，再进行成像衍射光学元件衍射效率的测量。

6.3 分光镜

分光镜是将激光器发射的一束激光束分为两束：其中一束作为测量光，用于待测折衍射混合光学元件或光学系统焦面能量的测量；另一束作为参考光，用于衡量激光器输出功率的波动性对测量结果的影响。分光镜的反射率为 30%，透过率为 70%。

6.4 聚光镜

激光器的光束发散角小，需要用聚光镜增大光束的发散角。通常可以选用 20 倍、40 倍的显微物镜或者短焦距单片正透镜或负透镜来实现激光光束的扩束目的。

6.5 空间滤波器

空间滤波器的位置位于平行光管物镜焦面上，作为成像衍射光学元件衍射效率测量装置中的星点孔。为了保证星点像具有好的对比度和足够的衍射细节，空间滤波器的直径 d 必须满足公式(5)：

$$d \leq \frac{0.61\lambda}{D} f'_c \dots\dots\dots (5)$$

式中：

- λ ——照明光源的波长，单位为微米 (μm)；
 D ——待测折衍射混合光学系统的入瞳直径，单位为毫米 (mm)；
 f'_c ——平行光管的焦距，单位为毫米 (mm)。

6.6 平行光管

平行光管的焦距大于待测衍射混合光学元件或光学系统焦距的 3 倍，平行光管的口径大于待测衍射混合光学元件或光学系统口径的 1.2 倍。

6.7 光电探测器

光电探测器通常采用数字显示的光功率计，为了保证衍射效率的测量精度，光功率计应具有四位有效读数。

6.8 光电探测器前的针孔光阑

根据夫琅禾费的圆孔衍射理论，如果包括艾里斑的中央亮斑和一级衍射亮环，则光斑的半径尺寸表达式见公式(6)：

$$r_1 = f' \frac{2.233\lambda}{D} \quad (6)$$

式中：

r_1 ——带上一级衍射亮环的光斑半径尺寸，单位为毫米（mm）；

λ ——照明光源的波长，单位为微米（ μm ）；

D ——待测衍射混合光学系统的入瞳直径，单位为毫米（mm）；

f' ——待测衍射混合光学系统的焦距，单位为毫米（mm）。

根据待测光学系统的参数，可以计算出一级暗环内的光斑直径为 $d_1 = 2r_1$ 。根据计算得到的一级暗环内的光斑直径 d_1 ，可以选择光电探测器前的针孔光阑大小，保证中央亮斑和一级衍射亮环能量通过并被探测器所接收。

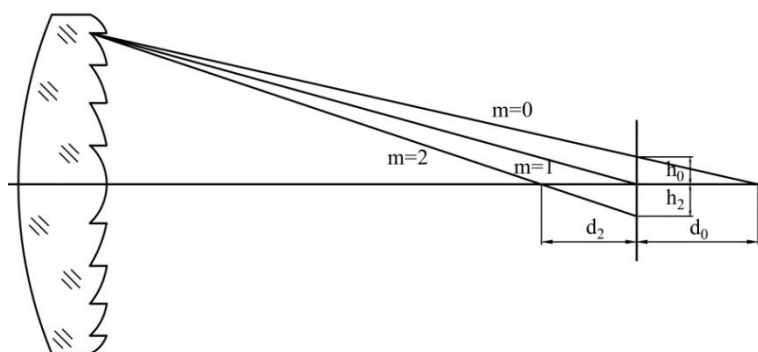


图 2 经过成像衍射光学元件后各衍射级次的分布图

为了确定次级衍射能量对测量结果准确性的影响，根据成像衍射光学元件光焦度的计算公式，可以得到不同衍射级次的焦点位置，如图2所示。通过待测系统参数，计算主衍射级次（ $m=1$ ）与相邻的衍射级次（ $m=2$ 、 $m=0$ ）之间的轴向距离 d_2 和 d_0 ，以及2级和0级衍射光在主衍射级焦面上的高度 h_2 和 h_0 。当光电探测器前面的针孔光阑直径大小为 a 时，透过针孔光阑的2级和0级衍射光所占的比例可以通过公式(7)进行计算

$$\begin{cases} k_2 = \frac{\pi(a/2)^2}{\pi h_2^2} \\ k_0 = \frac{\pi(a/2)^2}{\pi h_0^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中：

k_2 ——2级衍射光所占比例，单位为百分比（%）；

k_0 ——0级衍射光所占比例，单位为百分比（%）；

- a ——光电探测器前的针孔光阑直径，单位为毫米（mm）；
 h_2 ——2级衍射光在主衍射级焦面上的高度，单位为毫米（mm）；
 h_0 ——0级衍射光在主衍射级焦面上的高度，单位为毫米（mm）；
 π ——3.1415926…。

6.9 其它实验部件

成像衍射光学元件衍射效率测量装置还需要一些辅助元件，如光学平台、多自由度微调器、黑色挡板、激光器夹持器等，用于主要部件的固定、调整和消除杂光等作用。

7 样品

含有成像衍射光学元件的折衍射混合光学元件或光学系统，该元件或系统主衍射级次的成像质量要达到或接近衍射极限，在系统焦面上应该出现一个标准的艾里衍射光斑。

8 试验步骤

8.1 单一波长衍射效率的测量

8.1.1 主衍射级次光能量的测量

在暗室中完成衍射效率测量装置光路的调整后，放入待测折衍射混合光学元件或光学系统，并且在其前放置一个黑色挡板，用于消除背景光能量对测量结果的影响。

将选定的针孔光阑放置在光电探测器前，并保证这两个元件的相对位置不变。采用三维位移台精确调节光电探测器和针孔光阑的位置，直至成像衍射光学元件主衍射级次的焦点位置与针孔光阑的中心位置重合，得到成像衍射光学元件的一级衍射光的能量 E_{1P} ，同时记录此时参考光路的能量 E'_1 。

8.1.2 总能量的测量

保持光电探测器的位置不动，并移开其前面放置的针孔光阑，读取此时光电探测器接收的光能量 E_0 ，同时记录此时参考光路的光能量 E'_0 。

将测量的数据代入衍射效率公式(3)得到待测成像衍射光学元件在某一波长的衍射效率值。

8.2 多波长衍射效率的测量

为了实现在整个波段范围内成像衍射光学元件的衍射效率测量，选择多个不同波长的激光器分别作为光源，在不同时间对待测折衍射混合光学元件或光学系统重复进行测量步骤8.1，并通过测量数据得到成像衍射光学元件在不同波长处的衍射效率。

9 试验数据处理

9.1 衍射效率测量结果的数据处理

9.1.1 单一波长的衍射效率测量数据处理

根据成像衍射光学元件衍射效率的测量步骤，针对某一波长进行 N 次主衍射级能量和总能量的测量，并计算得到每次成像衍射光学元件的衍射效率 η_{bi} ， $i = 1, 2, 3 \dots N$ ，然后将计算得到的 N 个衍射效率取平均值完成某一波长处衍射效率的测量，其表达式见公式(8)：

$$\eta_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^N \eta_{bi}}{N}, i = 1, 2, 3 \dots N \quad (8)$$

式中：

η_{ave} ——某一波长处测量衍射效率的平均值，单位为百分比（%）；

η_{bi} ——某一波长处第*i*次实际测量的衍射效率值，单位为百分比（%）；

N——测量次数。

9.1.2 多个波长的衍射效率测量数据处理

针对不同波长的光源，重复数据处理步骤9.1.1，得到不同波长处的衍射效率平均值 $\eta_{ave}(\lambda_k)$ ， $k = 1, 2, 3 \dots$ 。根据插值算法，可以得到衍射效率测量结果的拟合曲线以及描述拟合曲线的方程 η_{fit} 。通过拟合曲线方程 η_{fit} ，可以得到在成像波段范围内任意一个波长处的衍射效率测量值。

9.2 带宽积分平均衍射效率的计算

根据成像衍射光学元件的衍射效率测量拟合曲线方程，可以计算出成像衍射光学元件主衍射级的实际带宽积分平均衍射效率，其表达式见公式(9)：

$$\bar{\eta}_{ave} = \frac{1}{\lambda_{max} - \lambda_{min}} \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \eta_{fit} d\lambda \quad (9)$$

式中：

$\bar{\eta}_{ave}$ ——实际带宽积分平均衍射效率，单位为百分比（%）；

η_{fit} ——衍射效率拟合曲线方程；

λ_{max} ——波段范围内的最大波长值，单位为微米（ μm ）；

λ_{min} ——波段范围内的最小波长值，单位为微米（ μm ）。

为了衡量成像衍射光学元件的加工误差，将测量带宽积分平均衍射效率 $\bar{\eta}_{ave}$ 与理论带宽积分平均衍射效率 η 进行对比，得到成像衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率偏差，其表达式见公式(10)：

$$\Delta\eta = \eta - \bar{\eta}_{ave} \quad (10)$$

式中：

$\Delta\eta$ ——带宽积分平均衍射效率偏差，单位为百分比（%）；

η ——理论带宽积分平均衍射效率，单位为百分比（%）；

$\bar{\eta}_{ave}$ ——实际带宽积分平均衍射效率，单位为百分比（%）。

带宽积分平均衍射效率偏差 $\Delta\eta$ 反映了成像衍射光学元件的加工质量。

10 试验报告

试验报告应至少包括以下内容（参考附录A）：

- 1) 采用标准；
- 2) 测试时间；
- 3) 委托单位信息；
- 4) 试样样品名称和参数信息；
- 5) 环境温度和相对湿度；
- 6) 测试波长及对应衍射效率；
- 7) 测试单位信息和测试人员。

附录 A

(资料性)

成像衍射光学元件衍射效率测量报告

委托单位		联系人		
		联系电话		
试验样品名称		试验样品参数		
环境温度(°C)		相对湿度(%)		
采用标准				
测试波长(nm)	测量次数	衍射效率(%)	衍射效率平均值(%)	
	1			
	2			
	3			
	1			
	2			
	3			
	1			
	2			
	3			
带宽积分平均衍射效率(%)				
带宽积分平均衍射效率偏差(%)				
测量时间	年 月 日	测量单位	单位名称 (公章)	
测试人：		复核人：	审定人：	