ICS 83.140.99
CCS Y 28

团　　体　　标　　准

T/CPPIA XXXX-202X

全息高分子材料的评价方法

Evaluation methods for holographic polymer materials

（征求意见稿）

202X-XX-XX 发布　　202X-XX-XX 实施

中国塑料加工工业协会　发布

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专利的责任。

本文件由中国塑料加工工业协会提出。

本文件由中国塑料加工工业协会团体标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：华中科技大学、中国印钞造币集团有限公司、中钞特种防伪科技有限公司、武汉华工图像技术开发有限公司、南昌虚拟现实研究院股份有限公司。

本文件主要起草人:解孝林、彭海炎、郭红喜、赵志成、张宝利、张云、倪悦、鲁琴、牟靖文、倪名立、吴远启、杨志方、周兴平、李阳。

全息高分子材料的评价方法

1 范围

本文件规定了全息高分子材料与全息光栅的术语和定义，以及全息高分子材料性能的评价方法。

本文件规定了全息高分子材料与全息光栅的可靠性测试项目、条件及评价方法，适用于全息高分子材料在运输、储存、服役期间预期会遭遇的各种环境应力下的性能稳定性与耐久性的评价。

本文件适用于任何形式的全息高分子材料，包括记录了全息光栅的塑料、橡胶制品以及包含全息高分子材料的各类光学元件等。

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 10125 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验

GB/T 16422.2 塑料 实验室光源暴露试验方法 第2部分：氙弧灯

GB/T 16422.3 塑料 实验室光源暴露试验方法 第3部分：荧光紫外灯

GB/T 2410 透明塑料透光率和雾度的测定

GB/T 2423.1 电工电子产品环境试验 第2部分：低温试验

GB/T 2423.10 环境试验 第2部分：试验方法 试验Fc: 振动（正弦）

GB/T 2423.2 电工电子产品环境试验 第2部分：高温试验

GB/T 2423.22 电工电子产品环境试验 第2部分：温度变化试验

GB/T 2423.3 电工电子产品环境试验 第2部分：恒定湿热试验

GB/T 2423.4 电工电子产品环境试验 第2部分：交变湿热试验

GB/T 2423.5 环境试验 第2部分:试验方法 试验Ea和导则:冲击

GB/T 33826 玻璃衬底上纳米薄膜厚度测量 触针式轮廓仪法

GB/T 38518 柔性薄膜基体上涂层厚度的测量方法

GB/T 39822 塑料黄色指数及其变化值测定

GB/T 614 化学试剂 折光率测定通用方法

GB/T 7962.1 无色光学玻璃测试方法 第1部分 折射率和色散系数

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准

3.1

全息光栅 holographic grating

基于激光全息技术制作的条纹结构，特点是能够记录光波的振幅、相位等全部信息，可以通过模压转印、双光束或多光束干涉的方法形成。

3.2

全息高分子材料 holographic polymer material

一类基于衍射光学原理的高分子材料，通过全息光栅记录干涉光波的振幅、相位等全部信息，实现三维立体图像再现、分光、聚焦或色彩衍射效果。它们在防伪标签、增强现实、全息光学元件及装饰领域有广泛应用。

3.3

曝光剂量 exposure dose

记录全息光栅时，激光辐照总强度与曝光时间的乘积，单位为J/m^2或mJ/cm^2。

3.4

曝光特性曲线 exposure characteristics curve

以曝光剂量 (mJ/cm^2)为横轴，衍射效率或折射率调制度为纵轴，描述全息记录过程中全息光栅的衍射效率或折射率调制度随曝光条件的变化。

3.5

感光灵敏度 photosensitivity

记录全息光栅时，衍射效率达最大时所需的最小曝光剂量。

3.6

入射光 incidence wave

检测全息光栅时照射全息光栅的光。

3.7

衍射光 diffraction wave

入射光被全息光栅衍射而改变传播方向后的光。

3.8

透射光 transmission wave

检测全息光栅时，与入射光在同一直线上，直接穿过全息光栅的光。

3.9

透射式全息光栅 transmission holographic grating

使入射光和衍射光分别位于光栅平面两侧的光栅。

3.10

反射式全息光栅 reflection holographic grating

使入射光和衍射光分别位于光栅平面同侧的光栅。

3.11

Q值 Q-value

在折射率呈正弦分布的周期性结构中，用来区分体全息光栅和表面全息光栅的数值。

3.12

体全息光栅 volume holographic grating

引起布拉格 (Bragg) 衍射的全息光栅，其厚度远大于光栅间距。Q值>>1时被认为是体全息光栅。

3.13

表面全息光栅 surface holographic grating

引起拉曼-奈斯 (Raman-Nath) 衍射的全息光栅，其厚度远小于光栅间距。Q值<1时被认为是表面全息光栅。

3.14

光栅间距 grating pitch

相邻两个光栅中心之间的距离。

3.15

空间频率 spatial frequency

单位长度上光栅的数量，与光栅间距的倒数成正比。

3.16

衍射效率 diffraction efficiency

衍射光的能量占衍射光与透射光能量之和的份额，符号为η，量纲为1。

3.17

折射率调制度 refractive index modulation

折射率的调制量，等于全息光栅的折射率极大值与极小值的差值的一半，符号n_1。

3.18

角度选择性 angular selectivity

入射光波长恒定时，衍射效率或透光率与入射光的入射角之间的关系。

3.19

波长选择性 wavelength selectivity

入射光角度恒定时，衍射效率或透光率与入射光的波长之间的关系。

3.20

光谱亮度 spectral brightness

全息光栅在特定光谱范围内能够输出的总能量通量，即以透光率为纵坐标，波长为横坐标，全息光栅衍射峰内的面积。

3.21

环境可靠性 environmental reliability

产品在规定的条件下、在规定的时间内完成规定功能的能力。根据不同的环境条件 (如温度、湿度、振动、冲击、盐雾等)，对产品进行环境模拟试验，以检验产品是否具有可靠性。根据不同的环境条件，其评价内容通常包括：气候环境可靠性 (climatic environment reliability)、光稳定性 (photostability)、力学稳定性 (mechanical stability) 和耐化学腐蚀性 (chemical resistance)。

3.22

光学性能保持率 optical retention ratio

环境可靠性试验前后，产品的关键光学性能参数 (如衍射效率、衍射波长、雾度) 的稳定程度，通过式(13)计算得到。

4 技术要求和试验方法

4.1 测量环境

4.1.1 除非另有规定，试验样品应在标准大气条件下 (温度23±2 ℃，相对湿度50%±10%) 进行预处理和初始性能测量。

4.1.2 试验样品应具有代表性，表面清洁、无划痕等缺陷。尺寸应符合测试设备要求。

4.1.3 试验前应详细记录样品的初始光学性能 (如衍射效率、雾度、折射率调制度等) 和物理状态。

4.1.4 试验过程中，若需进行中间测量，应确保测量条件一致，并记录测量时间点。

4.1.5 试验结束后，样品应在标准大气条件下恢复足够时间，然后进行最终性能测量和外观检查。

4.2 测量装置和仪器

测量应根据测量方法的要求，使用以下设备和测量方法，所有设备在使用前需经过校正：

4.2.1 光源

激光光源应保证输出功率稳定，例如：30分钟内输出功率波动不超过±5%。如果使用白光光源，应在测量波长范围内提供连续光谱。

4.2.2 样品夹

夹持全息光栅时，样品夹能够在相当于全息光栅尺寸的范围内移动。

4.2.3 检测器

检测器应具有足够的动态响应范围和相对于待测强度的响应，并经过校准。

4.2.4 角度控制器

角度分辨率优于0.1°；旋转范围覆盖0至360°；角度定位精度优于0.01°。

4.2.5 紫外可见光谱仪/反射率仪

需覆盖待测光栅的工作波段，典型范围为200至2500 nm；光谱分辨率应优于0.2 nm，更高要求的测试需要0.05 nm甚至更细的带宽；波长准确度需达到±0.3 nm或更好，重复性优于0.02 nm；杂散光水平应低于10^{-4}甚至达到10^{-5}量级。

4.3 衍射效率

对于记录材料存在膨胀或收缩的体全息光栅，当入射光的角度或波长与参考光相同时，测量的衍射效率可能由于不满足布拉格条件而导致比实际衍射效率偏低。在这种情况下，需要调整入射光的波长或角度以重新测量衍射效率。当入射光、透射光或衍射光斜入射到探测器上时，由于探测器表面的反射，可能导致无法正确测量光强。在测量光强时，探测器的设置应使入射光、透射光或衍射光能以近似垂直的方向进入。

4.3.1 透射式全息光栅的衍射效率

采用图1所示的光学系统测量衍射光 (I_d) 和透射光 (I_t) 的光强，计算透射式全息光栅的衍射效率 (η)：

$$\eta = \frac{I_d}{I_d + I_t} \times 100\% \tag{1}$$

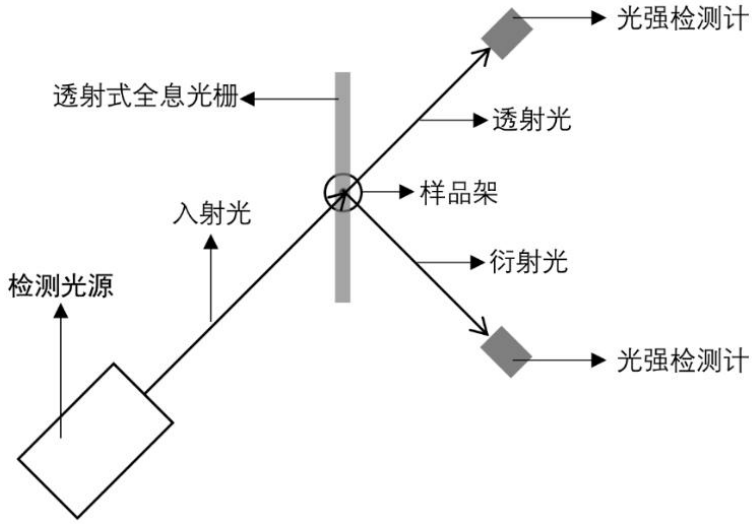


图 1 测试透射式全息光栅衍射效率的光学系统示意图

4.3.2 反射式全息光栅的衍射效率

(a) 搭建光路法

采用图2所示的光学系统测量反射式全息光栅的衍射效率，计算方法和原理同4.3.1。

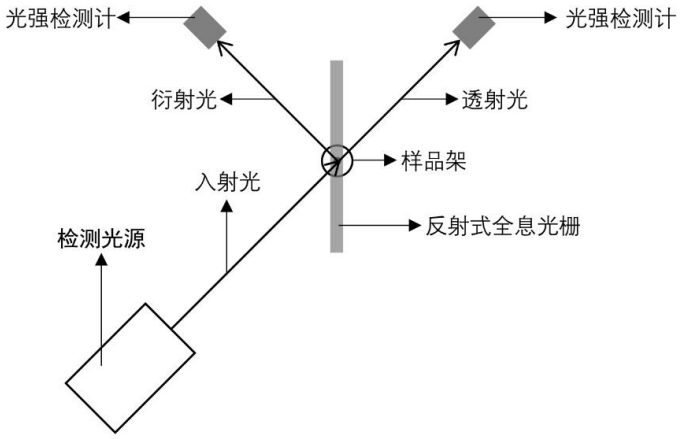


图 2 搭建光路法测试反射式全息光栅的衍射效率的示意图

(b) 透光率法

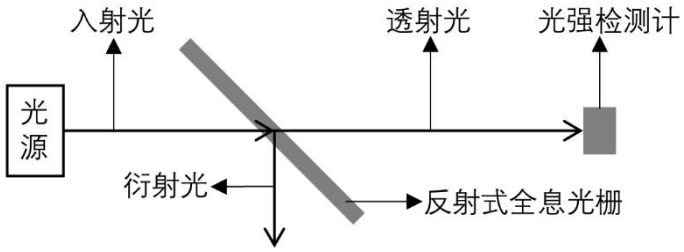


图 3 透光率法测试反射式全息光栅的衍射效率的示意图

采用图3所示的装置测得透射光谱，得到如图4所示的透光率曲线，根据基线透光率 (T_b) 与衍射峰透光率 (T_a) 计算衍射效率：

$$\eta = \frac{T_b - T_a}{T_b} \times 100\% = \frac{I_d}{I_d + I_t} \times 100\% \quad (2)$$

其中，T_b是透射光强度与入射光强度的比值，$T_b - T_a$是衍射光强度与入射光强度的比值。

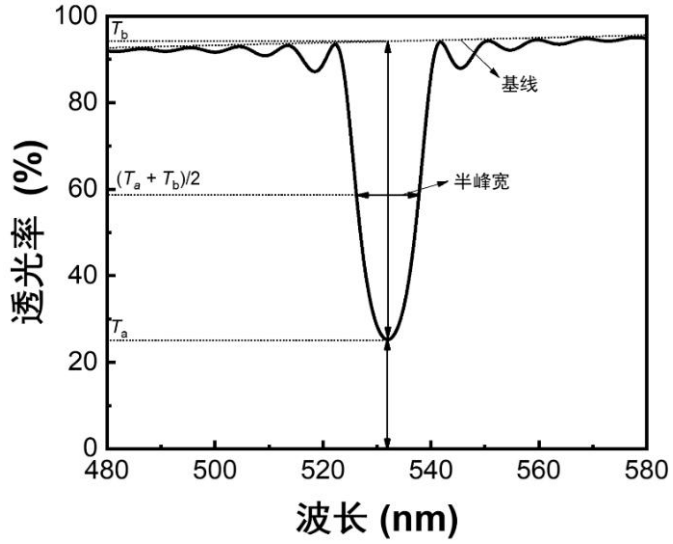


图 4 反射式全息光栅的透光率光谱

(c) 反射率法

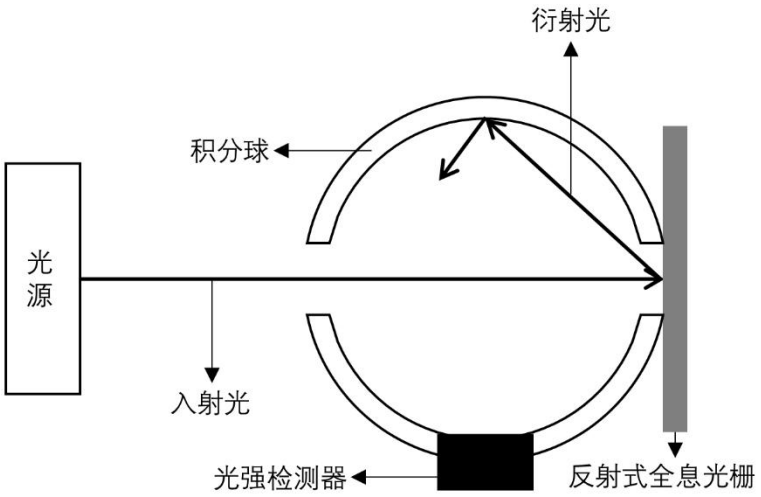


图 5 反射率法测试反射式全息光栅的衍射效率的示意图

采用图 5 所示的光学系统测量反射率光谱，得到如图 6 所示的反射率曲线，衍射效率为全息光栅的反射率 (R_a) 与未记录全息光栅时的最大反射率 (R_b) 之差：

$$\eta = R_a - R_b \tag{3}$$

反射率测量法的光谱衍射效率仅适用于反射式全息光栅。

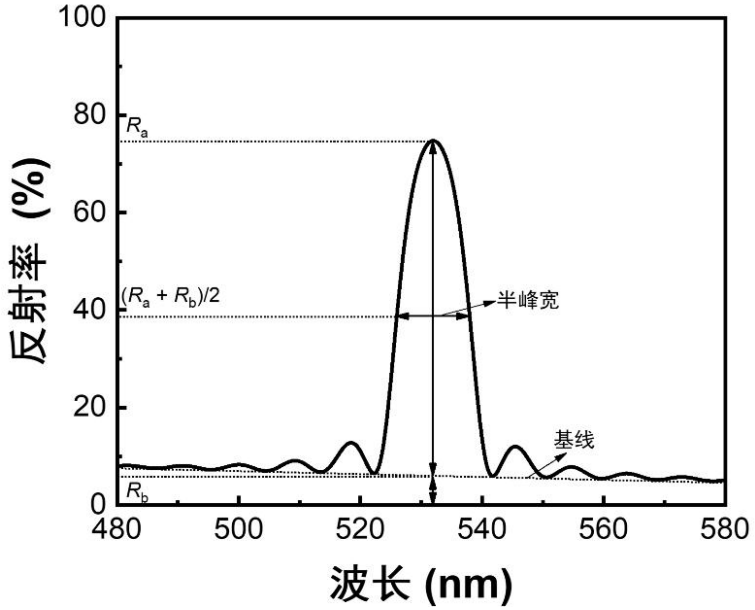


图 6 全息光栅的反射率光谱

4.4 角度选择性

全息光栅的角度选择性的测量包括以下程序：

(a) 使用波长确定的光源作为入射光，小幅度改变入射光的角度，根据4.3所要求的方法测量衍射效率。

(b) 将衍射效率的值相对于入射光的角度绘制成图，并从该图中读取衍射效率达到最大值时入射角 (布拉格角) 和半峰宽 (衍射效率达最大值的1/2时的两个入射角的差值)。

全息光栅的角度选择性代表了通过全息光栅再现图像的入射光角度范围的宽窄。当图像再现的角度范围较窄时，“角度选择性”就称为“高”；当图像再现的角度范围较宽时，“角度选择性”就称为

“低”。

4.5 波长选择性

全息光栅的波长选择性的测量包括以下程序：

(a) 固定入射光的角度，小幅度改变入射光的波长，根据4.3所要求的方法测量衍射效率。

(b) 将衍射效率的值相对于入射光的波长绘制成图，从图中可得到衍射效率达到最大值的波长 (布拉格波长) 和半峰宽 (衍射效率达最大值的1/2时的两个波长的差值)。

全息光栅的波长选择性表示全息光栅可以再现图像的波长范围的宽度，用于再现图像的波长范围较窄时，“波长选择性”就称为“高”，相对较宽的波长范围时，“波长选择性”被称为“低”。当白光作为入射光时，波长选择性是决定再现图像清晰度和色彩再现性的一个因素。

4.6 光栅间距

4.6.1 全息光栅间距的理论值

透射式全息光栅和反射式全息光栅的光栅间距理论值 (nm) 分别通过式(4)和式(5)计算得到：

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2\sin\frac{\theta_{\text{set}}}{2}} \tag{4}$$

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2\sqrt{n^2-\cos^2\frac{\theta_{\text{set}}}{2}}} \tag{5}$$

其中，λ为曝光时激光的波长 (nm)，θ_{set}为曝光时物光和参考光的夹角，n为全息高分子材料的平均折射率。式(5)的推导过程见附录B。

4.6.2 全息光栅间距的实测值

采用原子力显微镜、扫描电子显微镜或透射电子显微镜测量全息光栅的实际光栅间距。

4.7 空间频率

通过式(6)计算全息光栅的空间频率 (lines/mm)：

$$\mathrm{SF} = 1/\Lambda \tag{6}$$

其中，Λ为全息光栅的光栅间距。计算全息光栅的空间频率时，需采用全息光栅的实际光栅间距。

4.8 曝光特性曲线

曝光特性曲线 (表示曝光剂量和衍射效率关系的曲线) 绘制方法为：对于确定的曝光时间 (s)，应逐渐改变曝光时物光和参考光的光强 (mW/cm^2)；对于确定的曝光光强，应逐渐改变曝光时间。

图7给出了曝光特性曲线的代表性示例。

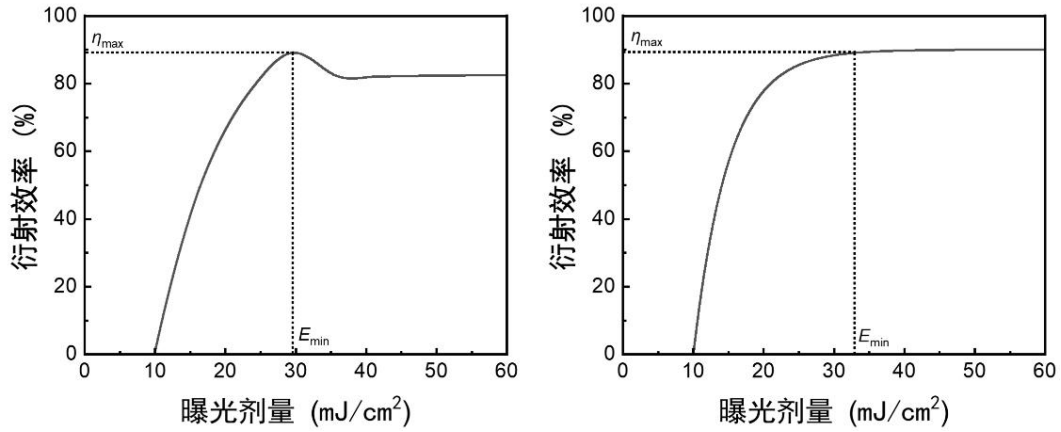


图 7 代表性的曝光特性曲线：峰值曲线 (左) 和渐进饱和值曲线 (右)

4.9 感光灵敏度

全息高分子材料的感光灵敏度 (cm/mJ) 定义为衍射效率达到最大值时所需的最小曝光剂量，感光灵敏度通过下式计算得到。

$$S = \frac{\sqrt{\eta}}{dIt} \tag{7}$$

其中η为衍射效率，d为记录材料的厚度，I为激光辐照总强度，t为曝光时间。

全息高分子材料的感光灵敏度越高，说明全息高分子材料达到最高衍射效率所需的曝光光强越小或曝光时间越短，曝光光强小有利于大面积全息光栅的记录，曝光时间短有利于加快全息加工速率并减小振动的干扰。

4.10 折射率调制度

全息光栅的衍射效率和折射率调制度的关系通过Kogelnik耦合波理论给出，具体见附录C。全息光栅的相位调制与折射率调制度的关系的推导过程见附录D。

4.10.1 透射式全息光栅的折射率调制度测量方法

(a) 采用双光束激光曝光，假设物光和参考光的入射角分别为θ和2π-θ。

(b) 在4.8导出的曝光特性曲线 (图7) 中确定衍射效率最大值 (或饱和度识别的最高值)。

(c) 折射率调制度 (n_1) 由下式计算得出：

$$n_1 = \frac{\lambda \cdot \sin^{-1}(\sqrt{\eta}) \cdot \cos\theta_B}{\pi \cdot d} \tag{8}$$

其中，$\sin^{-1}$的值以弧度制计算，η为衍射效率，布拉格角θ_B为全息光栅衍射效率达到最大时入射光的入射角，λ为衍射光的波长 (nm)，d为全息光栅的厚度 (nm)。

4.10.2 反射式全息光栅的测量方法

(a) 采用双光束激光曝光，假设物光和参考光的入射角分别为θ和π-θ。

(b) 在4.8导出的曝光特性曲线 (图7) 中确定衍射效率最高值 (或饱和度识别的最高值)。

(c) 折射率调制度 (n_1) 由下式计算得出：

$$n_1 = \frac{\lambda \cdot \tanh^{-1}(\sqrt{\eta}) \cdot \cos\theta_B}{\pi \cdot d} \tag{9}$$

其中，$\tanh^{-1}$的值以弧度制计算，η为衍射效率，布拉格角θ_B为全息光栅衍射效率达到最大时入射光的

入射角，λ为衍射光的波长 (nm)，d为全息光栅的厚度 (nm)。

4.11 光谱亮度

全息光栅在特定光谱范围内能够输出的总能量通量，即以透光率为纵坐标，波长为横坐标，全息光栅衍射峰内的面积，通过下式计算：

$$B_\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [T_\mathrm{b}(\lambda) - T(\lambda)]\mathrm{d}\lambda \tag{10}$$

其中，B_λ为光谱亮度，量纲为1；λ为波长，量纲为nm；$T_\mathrm{b}(\lambda)$为不同波长下的基线透光率，量纲为nm^{-1}；$T(\lambda)$为衍射峰的光谱分布，量纲为nm^{-1}。

4.12 雾度与清晰度

雾度 (Haze) 是偏离入射光2.5°角以上的透射光强占总透射光强的比率，雾度越大意味着材料光泽以及透明度下降。清晰度是透射光强中平行光 (偏离入射光的角度小于2.5°) 的占比，用下式计算得出：

$$\mathrm{Clarity} = 1 - \mathrm{Haze} \tag{11}$$

全息光栅的雾度测试应考虑衍射光的影响，对于反射式全息光栅，由于衍射光与透射光在材料的两侧，因此不影响其雾度的测试；对于透射式全息光栅，由于衍射光与透射光在材料的同侧，可能会影响其雾度的测试，因此测试时应调整试样的角度以避免产生衍射。测试方法按GB/T 2410中的规定进行。

4.13 黄色指数

黄色指数 (YI) 是指材料偏离白色或发黄的程度。测试方法按GB/T 39822中的规定进行。

4.14 厚度

采用机械测量法测量材料的厚度，试验方法按GB/T 33826中的规定进行。

采用扫描电子显微镜测量材料的厚度，试验方法按GB/T 38518中的规定进行。

4.15 折射率

液体样品的折射率采用阿贝折射仪测试，试验方法按GB/T 614中的规定进行。

固体样品的折射率采用棱镜耦合仪测试，试验方法按GB/T 7962.1中的规定进行。

4.16 Q值

Q值的大小用来评判全息光栅为体全息光栅还是表面全息光栅。Q值的计算公式为：

$$Q = \frac{2\pi\lambda d}{n\Lambda^2} \tag{12}$$

其中，λ为全息光栅的衍射光在真空中的波长 (nm)，d为全息光栅的厚度 (nm)，n为全息光栅的平均折射率，Λ为全息光栅的光栅间距 (nm)。

4.17 可靠性

可靠性试验包括气候环境试验、光老化试验、力学环境试验和耐化学腐蚀试验等，试验条件可具体根据应用环境和需求设定。试验产生的结果可通过计算光学性能保持率 (OR) 加以评估，计算公式如下：

$$\mathrm{OR} = \begin{cases} \left(1 - \frac{|\Delta P|}{P_\mathrm{test}}\right) \times 100\%, \ \text{for } |\Delta P| < P_\mathrm{initial} \\ 0, \ \text{for } |\Delta P| \geq P_\mathrm{initial} \end{cases} \tag{13}$$

$$\Delta P = P_\mathrm{test} - P_\mathrm{initial} \tag{14}$$

其中P为材料的性能参数，如衍射效率、折射率调制度、透光率、衍射波长、光栅间距、空间频率、

清晰度等。$P_{initial}$为材料在可靠性测试前的性能，P_{test}为材料在可靠性测试后的性能，ΔP为材料在测试前后的性能变化量。

4.17.1 气候环境试验

气候环境试验结果用来描述材料的气候环境可靠性。试验名称、实验条件和参考标准如表1所示.

表 1 气候环境试验总览

试验名称	试验条件	参考标准
低温存储	-40±3 ℃下持续	GB/T 2423.1
高温存储	85±2 ℃下持续	GB/T 2423.2
高低温循环	-40至+85 ℃，温度变化速率 ≤ 15 ℃/min；高低温保持时间各1~2小时，多次循环	GB/T 2423.22
热冲击	-55至+125 ℃，转换时间<1分钟，多次循环	GB/T 2423.22
高温高湿存储	60 ℃/90% RH, 85 ℃/85% RH等，持续时间为1000小时	GB/T 2423.3
湿热交变存储	25 ℃/40% RH至60 ℃/90% RH之间循环，伴随温湿度变化	GB/T 2423.4

4.17.2 光老化试验

光老化试验结果用来描述材料的光稳定性。试验名称、实验条件和参考标准如表2所示。

表 2 光老化试验总览

试验名称	试验条件	参考标准
紫外老化	波长波段位UVA (315-400 nm)，辐照强度为0.5~1.0 W/m^2	GB/T 16422.3
日光老化	采用氙灯模拟全太阳光谱，黑板温度为60±3 ℃	GB/T 16422.2

4.17.3 力学环境试验

力学环境试验结果用来描述材料的力学稳定性。试验名称、实验条件和参考标准如表3所示。

表 3 力学环境试验总览

试验名称	试验条件	参考标准
振动	频率范围为1-2000 Hz，振动类型为正弦振动、随机振动	GB/T 2423.10
机械冲击	半正弦波，峰值加速度为3~1000 m/s^2，脉冲持续时间为6~30 ms	GB/T 2423.5
碰撞	模拟运输过程中的重复冲击，能量和次数根据应用场景决定	GB/T 2423.5
跌落	跌落高度为0.5-1.2米，或根据产品重量和预期使用场景决定	GB/T 2423.5

4.17.4 耐化学腐蚀试验

耐化学腐蚀试验结果用来描述材料的耐化学腐蚀性。试验名称、实验条件和参考标准如表4所示。

表 4 耐化学腐蚀试验总览

试验名称	试验条件	参考标准
盐雾	氛围为中性盐雾、乙酸盐雾等，持续时间为24小时~96小时	GB/T 10125
耐酸性	常温下 (23±3 ℃)，将样品完全浸没于特定浓度的酸性溶液中 (如：5% w/w 硫酸溶液或5% w/w 盐酸溶液)，持续时间为24小时或按需设定	GB/T 10125
耐碱性	常温下 (23±3 ℃)，将样品完全浸没于特定浓度的碱性溶液中 (如：5% w/w 氢氧化钠溶液)，持续时间为24小时或按需设定	GB/T 10125
耐溶剂	常温下 (23±3 ℃)，将样品完全浸没于特定有机溶剂中 (如：乙醇、异丙醇、丙酮等，根据实际应用场景选择)，持续时间可根据溶剂挥发性及测试严酷度设定 (如10分钟至1小时)	GB/T 10125

4.17.5 可靠性等级【关键性能区分等级，综合性能评价，不分级的给出明确参考，定性的给出描述性表达，定量的给出具体参数】

根据材料在可靠性试验后的光学性能保持率，可将材料的可靠性分为不同的等级，具体如表5所示。

表 5 光学性能保持率对应的等级 (I 级最低，V 级最高)

等级	V	IV	III	II	I
光学性能保持率	OR≥98%	98%＞OR≥96%	96%＞OR≥94%	94%＞OR≥92%	OR<92%

4.18 其他试验

按实际应用需求或客户的需求进行。

5 试验报告

试验报告应该包括以下内容：

(1) 记录材料的厚度

(2) 基材或保护膜的类型

(3) 用于全息光栅记录的激光束的特征 (连续激光或是脉冲激光)

(4) 全息记录过程中激光束的参数 (波长、入射角、光强和曝光时间)

(5) 全息记录过程中记录材料的后处理过程 (如光漂白、热增强等)

(6) 衍射效率

一般用百分数表示，描述衍射效率时，应额外说明使用的测试方法，入射光的波长和角度。

(7) 折射率调制度

描述折射率调制度时，应额外说明全息光栅的厚度、使用的衍射效率的测试方法、入射光的波长和角度以及全息光栅的类型。

(8) 角度选择性

描述角度选择性时，应额外说明衍射效率的测量方法和入射光的波长。

(9) 波长选择性

描述波长选择性时，应额外说明衍射效率的测量方法和入射光的角度。

(10) 全息光栅的曝光特性曲线

描述全息光栅的曝光特性曲线时，应额外说明全息记录时物光和参考光的光强和入射角、衍射效率的测量方法、测量衍射效率时入射光的波长和角度。

(11) 感光灵敏度

描述全息高分子材料的感光灵敏度时应额外说明全息记录时物光和参考光的光强和入射角、衍射效率的测量方法、测量衍射效率时入射光的波长和角度。

(12) 全息光栅的光栅间距

(13) 全息光栅的空间频率

(14) 环境可靠性及其试验条件

(15) 任何偏离本标准的情况说明

附 录 A
（资料性）
全息光栅的记录过程

在记录全息光栅时，改变曝光剂量，并测量在不同曝光剂量下全息光栅的衍射效率，可得到曝光特性曲线和感光灵敏度。衍射效率是通过测量全息光栅的入射光强度、透射光强度和衍射光强度确定的。从全息光栅的透光率或反射率的光谱分布也可以确定衍射效率。最后，由衍射效率作为入射角的函数来确定全息光栅的角度选择性，由衍射效率作为波长的函数来确定波长选择性。代入测量衍射效率所用的入射光的波长和角度、全息光栅的厚度、全息光栅的平均折射率，根据公式(8)或公式(9)计算得出对应全息光栅的折射率调制度。全息光栅的记录原理如下：

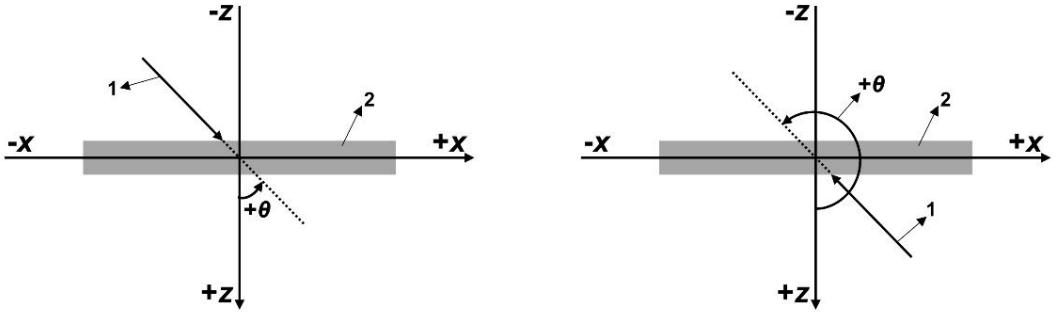
体全息光栅的制备通常涉及两束激光的干涉过程，其中一束光为物光，即在记录全息光栅的过程中，被物体反射后进入记录材料的光，另一束光为参考光，即在记录全息光栅的过程中，与物光形成一定角度且同时进入记录材料的光。

全息记录和再现过程中坐标轴的定义如下：

(a) 记录材料 (或全息光栅) 平面为 y 平面，与平面垂直的轴为 z 轴；

(b) 对于 z 轴，物光或衍射光前进的方向为正方向；

(c) 如图 A1 所示，正方向 z 轴与入射光的延伸线之间形成入射角θ，正号表示方向为逆时针方向。



a） 光波方向朝向+z　　b） 光波方向朝向-z

图例

1 参考光或入射光　　2 记录材料或全息图

图A1 测量全息光栅记录或再现过程中的坐标系和角度

全息记录应在室温、湿度稳定的暗室中进行，并防止机械振动和空气湍流带来的不利影响。例如，可以将包括激光器在内的所有设备安装在防震光学平台上以防止机械振动，或将曝光装置封闭在遮光罩内以隔断空调气流等。当激光器为风冷型或水冷型时，也应注意激光器本身可能的振动。

如图 A2 所示的光学系统可用于测量全息高分子材料的曝光特性，该系统包括：

1 激光器

激光器应保证输出功率稳定。如在 30 分钟内输出功率的波动不超过±5%。

2 物镜

选择具有合适放大倍率的物镜，以便射入准直透镜的激光束的光强在准直透镜的有效直径范围内近似均匀。例如选择放大倍率为×10 至×40 的物镜。

3 针孔

根据激光波长和物镜焦距选择适当的直径的针孔，如 5 μm~25 μm。物镜焦点处的光束直径Φ的理

论公式如下：

$$\Phi = \frac{4f\lambda}{\pi\omega} \approx \frac{4\lambda}{\pi NA} \tag{A1}$$

其中，f为物镜焦距 (μm)，ω为入射光的光束直径 (光束强度达最大值 1/e² 处的宽度，μm)，NA 为物镜的数值孔径。将通过式 (2) 计算得到的两倍大的值作为针孔直径的粗略标准。

4 准直透镜

附在透镜支架上的透镜，其球差要相对于使用的激光的波长进行校正。

5 反射镜

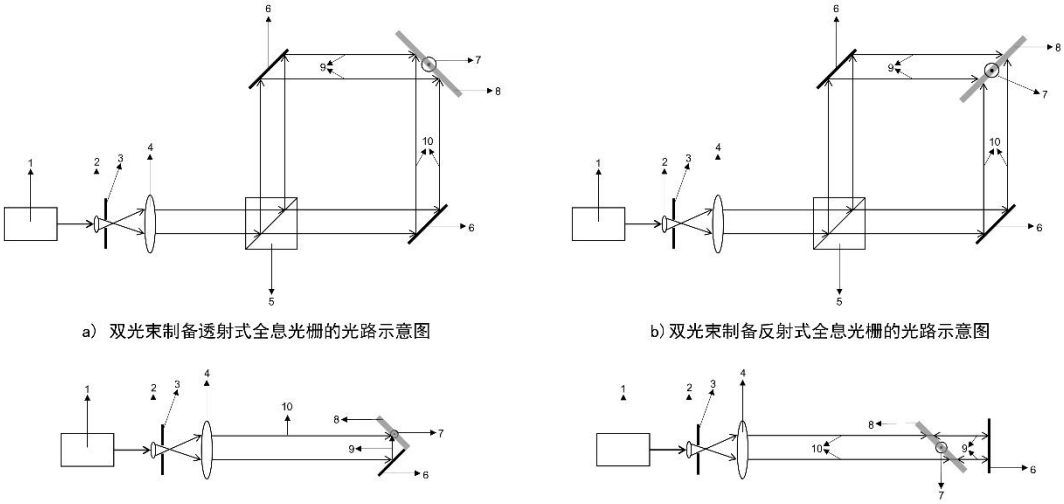
镜面应具有足够高的表面平整度 (通常优于波长水平的 1/10 左右)，安装反射镜的支架应该能进行精细的旋转和倾斜运动。

6 分光镜

分光镜应能达到 1:1 的反射光/透射光比。

7 样品夹

当样品夹夹持全息高分子材料时，应能在大约等于全息高分子材料尺寸的范围内移动，且能自由转动，在这种情况下，支架应具有抗震动特性。全息高分子材料的移除或夹持应在暗室中完成。



a) 双光束制备透射式全息光栅的光路示意图

b) 双光束制备反射式全息光栅的光路示意图

c) 单光束制备透射式全息光栅的光路示意图

d) 单光束制备反射式全息光栅的光路示意图

图例

1 激光器	2 物镜	3 小孔	4 准直透镜	5 分光镜
6 反光镜	7 样品架	8 全息记录材料	9 物光	10 参考光

图A2 记录全息光栅的光路示意图

全息光栅的环境可靠性本质上是其内部的微观光栅结构对外界环境刺激响应的灵敏度。全息光栅服役失效主要源于以下几类机制：一是热效应，包括材料热膨胀系数不匹配引起的应力累积和高温下的分解；二是光化学老化，如紫外辐照导致化学键的变化，从而引起透光率降低、黄色指数升高和力学性能下降等；三是有机溶剂、水、湿气等对光栅结构的溶解或溶胀，导致光栅间距的膨胀或收缩以及光学品质的下降；四是机械损伤，如冲击、拉伸、高处跌落、表面摩擦等导致材料外形或功能受损。全息光栅的环境可靠性测试主要用于评估材料在特定场景的应用潜力。

附 录 B
（资料性）
布拉格-斯涅尔定律的推导

反射式全息光栅的光栅间距与曝光时物光和参考光的角度的关系满足布拉格-斯涅尔定律，推导过程如下：

如图 B1 所示，根据斯涅尔定律，光进入材料时发生折射，得到式 (B1)：

$$n_{\text{ave}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta_{\text{set}}}{2}\right)}{\sin i} = \frac{\cos\frac{\theta_{\text{set}}}{2}}{\sin i} \tag{B1}$$

其中，n_{ave} 是全息光栅的平均折射率，θ_{set} 为参考光和物光的夹角，i 为折射角。

在均匀介质中，光程定义为光传播的几何路径和介质折射率的乘积。两束相干光的光程差 (Δr) 通过下式给出：

$$\Delta r = \Delta r_1 + \Delta r_2 \tag{B2}$$

$$n_{\text{ave}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta_{\text{set}}}{2}\right)}{\sin i} = \frac{\cos\frac{\theta_{\text{set}}}{2}}{\sin i} \tag{B3}$$

$$\Delta r_2 = n_{\text{ave}} \cdot a - b = \frac{n_{\text{ave}} \cdot 2x \cdot \sin^2 i}{\cos i} - \frac{2x \cdot \sin i \cdot \cos\frac{\theta_{\text{set}}}{2}}{\cos i} = 0 \tag{B4}$$

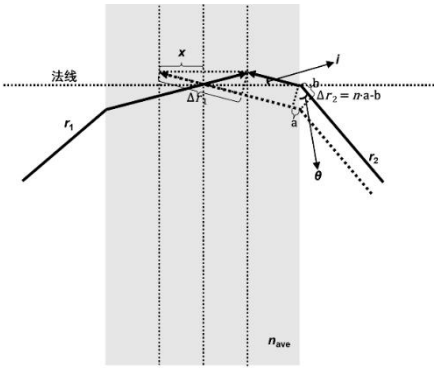
其中，x 为任意整数。当光程差为$\frac{\lambda}{2}$的偶数倍时，两束光相干增强，即产生相干亮区；当光程差为$\frac{\lambda}{2}$的奇数倍时，两束光相干减弱，即产生相干暗区。光栅间距为相邻相干亮区或相邻相干暗区，通过下式给出：

$$n_{\text{ave}} \cdot 2\Lambda \cdot \cos i = \lambda \tag{B5}$$

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \cdot n_{\text{ave}} \cdot \cos i} \tag{B6}$$

由于 $\cos i = \sqrt{1 - \sin^2 i} = \sqrt{{n_{\text{ave}}}^2 - \cos^2\frac{\theta_{\text{set}}}{2}}$，式 (B6) 的表达式变为：

$$\Lambda = \frac{\lambda_{\text{writing}}}{2\sqrt{{n_{\text{ave}}}^2 - \cos^2\frac{\theta_{\text{set}}}{2}}} \tag{B7}$$



图B1 光栅间距计算公式推导示意图

附 录 C
（资料性）
体全息光栅的耦合波理论方程

根据 Kogelnik 耦合波理论，体透射全息光栅的衍射效率通过式 (C1) 给出，体反射全息光栅的衍射效率通过式 (C2) 给出：

$$\eta = \frac{\sin^2\sqrt{(\nu^2+\xi^2)}}{1+(\frac{\xi}{\nu})^2} \tag{C1}$$

$$\eta = \begin{cases} \left[1-\frac{1-\xi^2/\nu^2}{\sin^2\sqrt{\xi^2-\nu^2}}\right]^{-1}, \text{for } \nu^2-\xi^2<0 \\ \left[1+\frac{1-\xi^2/\nu^2}{\sinh^2\sqrt{\nu^2-\xi^2}}\right]^{-1}, \text{for } \nu^2-\xi^2\geq 0 \end{cases} \tag{C2}$$

其中，ν为强度参数，ξ为失谐参数。他们的表达式分别通过 (C3) 和(C4) 给出：

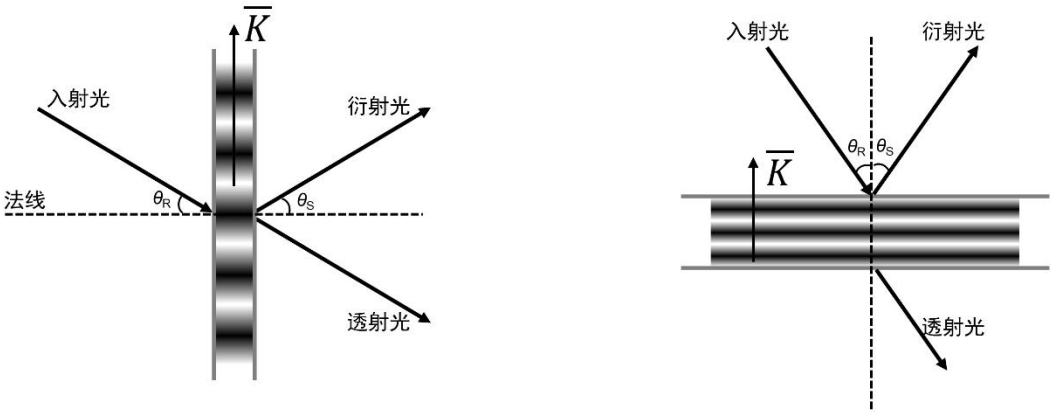
$$\nu = \frac{\pi d n_1}{\lambda_{\text{probe}}\sqrt{\cos\theta_{\text{R}}\cdot\cos\theta_{\text{S}}}} \tag{C3}$$

$$\xi = \frac{\Delta\theta\cdot K\cdot d\sin(\phi-\theta_{\text{B}})}{2\cos\theta_{\text{S}}} - \frac{\Delta\lambda K^2 d}{8\pi n_{\text{ave}}\cos\theta_{\text{S}}} \tag{C4}$$

其中，d是全息光栅的厚度，λ_{probe}是入射光的波长，θ_{R}是入射光和材料法线的夹角，θ_{S}是衍射光和材料法线的夹角，θ_{B}是布拉格角，ϕ是光栅的倾斜角，$K=2\pi/\Lambda$，是光栅的强度，$\Delta\theta$和$\Delta\lambda$分别是角度和波长的偏移量。其中$\Delta\theta=\theta_{\text{R}}-\theta_{\text{B}}$。在非倾斜光栅中，即透射全息光栅的$\phi=90°$或反射全息光栅的$\phi=0$时，当满足布拉格条件 ($\theta_{\text{R}}=\theta_{\text{S}}=\theta_{\text{B}}$) 时，式 (C3) 和 (C4) 的表达式分别简化为：

$$\eta = \sin^2\left(\frac{\pi n_1 d}{\lambda_{\text{probe}}\cos\theta_{\text{B}}}\right) \tag{C5}$$

$$\eta = \tanh^2\left(\frac{\pi n_1 d}{\lambda_{\text{probe}}\cos\theta_{\text{B}}}\right) \tag{C6}$$



a）透射式全息光栅　　b）反射式全息光栅

图C1 全息光栅重建过程示意图

附 录 D
（资料性）
全息光栅的相位调制能力和折射率调制度的关系

对于体全息光栅，波前信息通过周期性折射率调制记录在材料内部，折射率调制度由相干暗区和相干亮区的平均折射率决定的，表达式如下：

$$n_1 = \frac{|n_{\text{bright}} - n_{\text{dark}}|}{2} \tag{D1}$$

其中，n_1为全息光栅的折射率调制度，n_{bright}和n_{dark}分别为相干暗区和相干亮区的折射率。

对于简单光栅，折射率沿光栅矢量方向呈正弦变化，而在其他两个垂直方向上保持恒定。因此，沿光栅矢量的空间折射率可用下式描述：

$$n(x) = n_{\text{ave}} + \frac{\pi}{2} n_1 \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda} x\right) \tag{D2}$$

其中，x 为光栅矢量栅上的位置。

光在穿过厚度为 dφ的非导电介质时，其相位变化 dφ可以表述为：

$$\mathrm{d}\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} n(x)\mathrm{d}x \tag{D3}$$

由于材料的折射率由各组分的折射率n_i和相应的体积分数V_i决定，即材料的折射率可表示为：

$$n = \sum n_i V_i \tag{D4}$$

折射率引起的体相位变化量$\Delta\varphi$可通过下式得到：

$$\begin{aligned}\Delta\varphi &= \Delta\varphi_{\text{bright}} - \Delta\varphi_{\text{dark}} = \int_0^{\frac{\Lambda}{2}} \frac{2\pi}{\lambda} n(x)\mathrm{d}x - \int_{\frac{\Lambda}{2}}^{\Lambda} \frac{2\pi}{\lambda} n(x)\mathrm{d}x \\ &= \int_0^{\frac{\Lambda}{2}} \frac{2\pi}{\lambda}\left(n_{\text{ave}} + \frac{\pi}{2} n_1 \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda} x\right)\right)\mathrm{d}x - \int_{\frac{\Lambda}{2}}^{\Lambda} \frac{2\pi}{\lambda}\left(n_{\text{ave}} + \frac{\pi}{2} n_1 \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda} x\right)\right)\mathrm{d}x \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} n_1 \Lambda\end{aligned} \tag{D5}$$

由此，推导出全息光栅的相位调制能力和折射率调制度的关系呈正相关。

附 录 E
（资料性）
试验报告模板

全息高分子材料的性能报告		
试验内容	结果	备注
厚度	（如，15 μm）	
基材或保护膜的类型	（如，玻璃和PET）	
记录全息光栅的激光束特征	（如，连续激光）	
记录全息光栅的激光束参数	（如，波长为532 nm，参考光和物光的夹角为180°，参考光和物光与材料法线的夹角为90°）	
全息记录后的处理过程	（如，100 mW/cm^{2}紫外光辐照10 min）	
衍射效率	（如，90%）	
折射率调制度	（如，0.02）	
角度选择性	（如，布拉格角±45°范围内，检测光的波长为532 nm时，材料的衍射效率随角度的变化情况，可以给出布拉格角和半峰宽以辅助说明）	
波长选择性	（如，400~750 nm范围内，检测光的入射角为0°时，材料的衍射效率随波长的变化情况，可以给出衍射峰波长和半峰宽以辅助说明）	
曝光特性曲线	（如，0~100 mJ/cm^{2}范围内，材料的衍射效率或折射率调制度随曝光剂量的变化情况）	
感光灵敏度	（如，10 cm/mJ）	
全息光栅的光栅间距	（如，177 nm）	
全息光栅的空间频率	（如，5639 lines/mm）	
环境可靠性	（如，在特定的测试条件下，光学性能保持率为99%）	

参 考 文 献

[1] ISO 17901-1 Optics and photonics — Holography — Part 1: Methods of measuring diffraction efficiency and associated optical characteristics of holograms

[2] ISO 17901-2 Optics and photonics — Holography — Part 2: Methods for measurement of hologram recording characteristics