

芯飞睿技术参数十问系列 (二)

波前畸变

波前畸变

一、什么是波前

波前就是波振面，也叫等相面，是指光波振动相位相同的点所构成的面。最初人们将波场中跑在最前面的波面称为波前。在现代光学中，波前指的是直接与接收平面打交道的光场。



图1. 波前

二、什么是波前畸变

据马吕斯定律：出射波面与入射波面的对应点之间的光程相等，但是由于存在像差，出射波面的等光程面相对于理想波面发生偏离，这两者的偏移量即为光程差。波前畸变是指若波前在经过一定的传输介质后与传输前发生了改变，比如不再是球面波或者平面波了，称为波前发生了畸变。

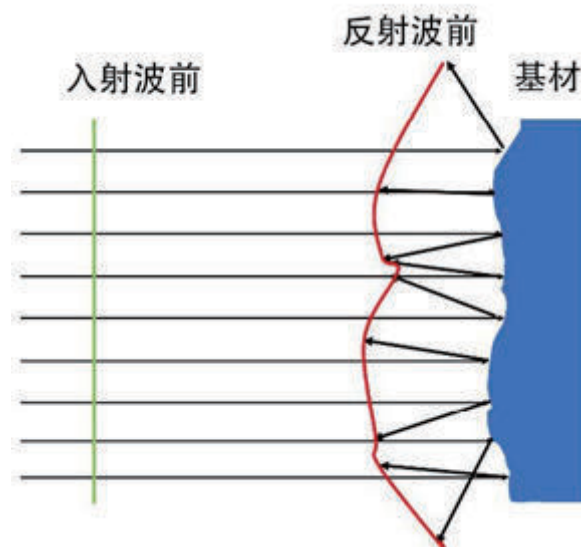


图3. 反射波前畸变

三、畸变有哪些类型

(1) 透射波前畸变 (TWD)：透射波前畸变产生的原因就是一束光波经过零件时光程 $n \cdot d$ 不相等， n 是材料折射率， d 是光在零件中走过的路程。是描述入射光透射分量与完全平坦平面波的偏差的规范。

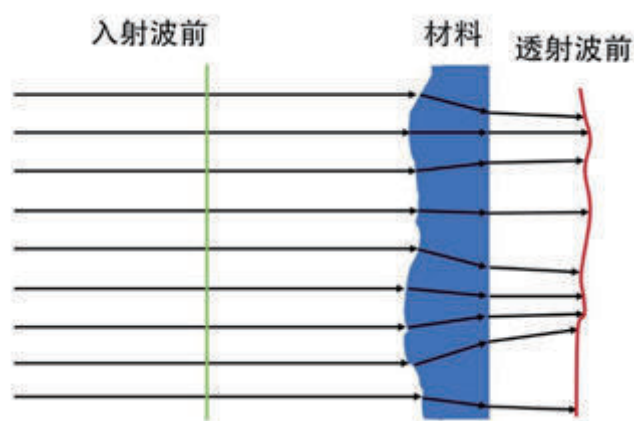


图2. 透射波前畸变

(2) 反射波前畸变 (RWD)：反射波前畸变指零件的表面面形有缺陷，引起的一束光波经反射后波前变形。用于描述入射光的反射分量与完全平坦的平面波的偏差。入射平面波在入射侧反射时被扭曲。我们称之为反射波前畸变或RWD。

四、是什么导致了波前畸变的产生

导致波前畸变产生的原因有很多，直观的表现就是由面形和平行度以及材料均匀性决定的，拿光学元件的测量举例：

(1) 自身因素

① 材料质量

晶体在生长的过程中，往往会出现各种各样的缺陷，例如杂质，气泡，晶格缺陷等。会极大的影响材料的光学性能，材料内部的条纹和气泡会造成波前的扭曲。

② 加工

抛光时材料表面的平面度，平行度；
镀膜时薄膜的应力；
元件外框的支撑力。

(1) 外部因素

① 系统本身

光在经过透镜等光学元件以及经过样品后，由于成像元件的设计和摆放位置不理想，样品折射率不均匀，导致光偏离理想光路产生波前畸变。

② 环境影响

温度和气流会使局部区域内空气密度不均匀，对测量光束引起局部偏折，改变测量波面，影响测量结果。
环境振动对干涉仪的影响在于它在两相干波面之间引入了随机的位相变化主要表现为干涉条纹出现抖动现象，从而造成条纹模糊。



五、波前畸变的大小受什么影响

波前畸变由入射表面，出射表面，和介质均匀性综合决定，如果光学材料内部条纹和包络(尤其是晶体内部有断层，位错等情形)比较严重时，面型再好，波前畸变也不能做的很好。

下面以单个基板材料举例：



图4：扁平、平行、均匀的基板

入射面：平坦；出射面：平坦；基材：均质

- TWD：低
- RWD：低

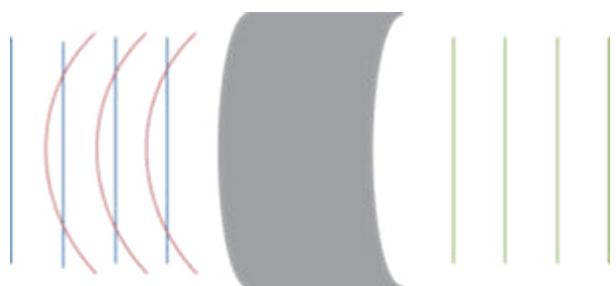


图5：弯曲、平行、均匀的基板

入射面：弯曲；出射面：弯曲(与A面相同)；基材：均质

- TWD：低
- RWD：高

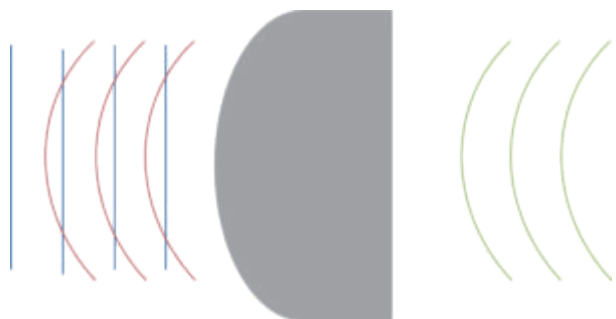


图6：弯曲、非平行、均匀的基板

入射面：弯曲；出射面：与A面不同；基材：均质

- TWD：高
- RWD：高

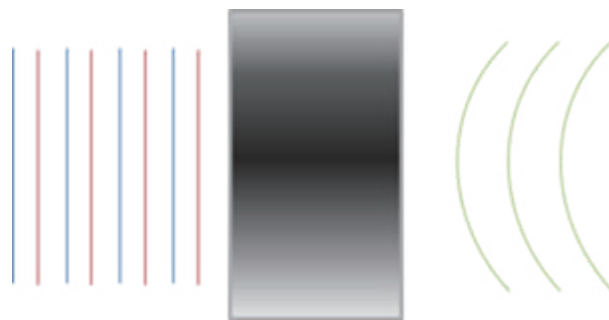


图7：扁平、平行、不均匀的基板

入射面：平坦；出射面：平坦；基材：不均质

- TWD：高
- RWD：低

六、为什么要测量透射波前畸变

因为透射波前畸变TWD反映了材料的光学均匀性。

关于光学均匀性与波前畸变的关系，可以这样说，如果光学均匀性很差的晶体，那很难通过加工得到很理想的波前畸变(pv值)。单纯的看加工后的面型，用标准平板就可以。

透射波前失真(TWD)或等效透射波前误差(TWE)是描述入射光透射分量与完全平坦平面波的偏差的规范。TWD通常被指定为用于表征表面图的标称波长的" per/λ "值比(通常为633nm)。TWD在成像应用中尤其重要，因为透射光束的失真可能导致探测器的图像失真，或者探测器的光强度变化不是由被测样品引起的，而是本身影响的结果。TWD主要受涂装前裸露基材特性的影响。基板平行度规格在很大程度上定义了TWD，但由于材料特性引起的有效光学折射率的变化，基板材料中的不均匀性也会影响透射波前。同样，涂层均匀性变化的影响也会影响TWD，尽管涂层和基材不均匀性对TWD的影响几乎总是被物理基材规格所淹没。

七、为什么要测量反射波前畸变

反射波前畸变(RWD)或等效反射波前误差(RWE)是一种规范，用于描述入射光的反射分量与完全平坦的平面波的偏差。RWD通常被指定为用于表征表面图的标称波长的" per/λ "值比(通常为633nm)。RWD适用于将反射光束用于成像或检测的应用，因为反射波前的方向和失真都很重要。与TWD一样，RWD在涂覆前受裸露基材特性的影响，但与TWD不同，涂层应力的影响通常对RWD做出非常重要的贡献。初级反射表面的平

平坦度在很大程度上决定了RWD，因此基板入射表面的平坦度很重要，但是，由于复杂涂层引起的应力，该表面的曲率总是被涂层本身改变。完全平坦的基板表面可以通过过滤器涂层弯曲（凸起），但可以使用等效力度的背面涂层（应力平衡涂层）至少部分地变平。基板材料中的不均匀性在很大程度上是无关紧要的，因为反射光束不会到达基板材料本身，但涂层均匀性的变化会影响RWD。

在正常入射率下，平坦度和RWE仅相差2倍

$RWE = 2 \times \text{平面度}$

$\text{平面度} = 1/2 \times RWE$

在非正向入射时，平坦度与RWE的关系取决于入射角 θ

$RWE = [2 \cdot \cos(\theta)] \cdot \text{平面度}$

$\text{平面度} = RWE / [2 \cdot \cos(\theta)]$

八、平面度绝对检验

根据探测原理，主要有两种方法：一种是使用波前探测器直接进行探测，主要有夏克-哈特曼波前传感器等；另一种是基于干涉原理的间接探测，即先得到待测波前在某些特征面上的光强分布，通过进一步的处理，逆向求解得到波前分布。

（1）干涉测量法

干涉测量术（Interferometry）是通过由波的叠加（通常为电磁波）引起的干涉现象来获取信息的技术。干涉仪广泛应用于科学研究和工业生产中，对微小位移、折射率以及表面平整度的测量。在干涉仪中，从单个光源发出的光会分为两束，经不同光路，最终交汇产生干涉。所产生的干涉图纹能够反映两束光的光程差。依据叠加原理，波汇合的结果具有能够反映波原始状态的性质。干涉测量术正是基于这一点。当两束频率相同的光叠加时，它们产生的条纹取决于它们的相位差：相位相同时会产生增强条纹，相反则会产生减弱条纹。两种情况之间则会产生中间强度的条纹。这些条纹可以用来分析这两束波的相对相位。

光学测量通常用菲索干涉仪（如图8所示）来完成。一个参考平面放在待检平面之上。两个平面之间有狭小的空隙。参考平面上表面稍稍倾斜（倾斜角在一度之内）避免后表面的干扰。待检平面与参考平面间的空隙使得两个平面可以成一定的倾角。这个倾角可以增添一个可控的相位梯度以形成干涉纹。人们可以以此来控制干涉纹的排布与方向，得到近乎平行的干涉纹序列而非复杂的轮廓线漩涡。不过平面的分离需要照明光准直。

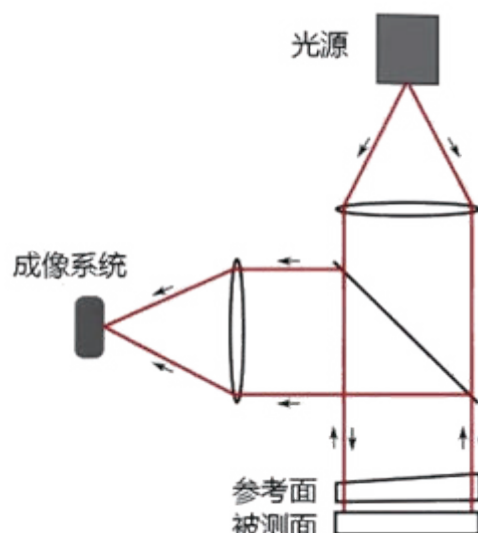


图8. 菲索干涉仪

（1）传感器测量

以Shack-Hartmann传感器（如图9所示）举例，入射光束由一组微透镜聚焦到CCD阵列上。每个镜头元素都有许多CCD像素。在插入样品之前和之后都测量了光斑位置。由样品引起的波前畸变导致斑点移动。利用光斑位置的变化来计算变形波的个数。低成本激光传感器在计量、天文、生命科学等领域有着广泛的应用。

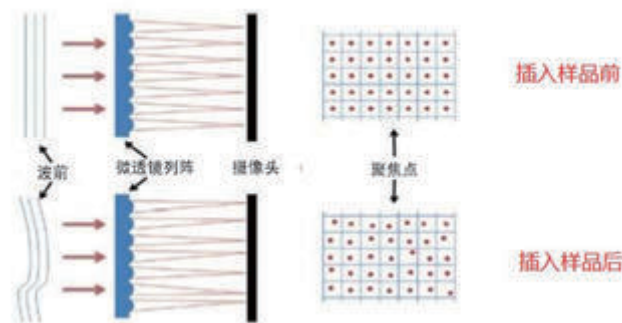


图9. Shack-Hartmann传感器

九、平面面形检测的影响因素有什么

（1）光学检测注意事项

1. 不可用手触摸光学镜片的表面；
2. 当镜片表面有脏物时，不要用手直接揩；应先用吹气球吹去灰尘，再用绒布擦，必要时用棉杆沾酒精和乙醚的混合液；
3. 安装或取下零部件时，应轻拿轻放，以免损伤仪器或产品；
4. 测量时应耐心、细致，以免产生读数误差；

- 5.对精度要求高的测量，应测三次，取平均值；
- 6.应定期对光学检测设备清洁保养；
- 7.应保持检测实验室干净、整洁、干燥、通风良好；

(2) 干涉仪的使用注意事项

- 1.仪器应放置在干燥、清洁以及无振动的环境中应用；
- 2.在移动仪器时，为防止导轨变形，应托住底座再进行移动；
- 3.仪器的光学零件在不用时，应在清洁干燥的器皿中进行存放，以防止发霉；
- 4.尽量不要去擦拭仪器的反光镜、分光镜等，如必须擦拭则应当小心擦拭，利用科学的方法进行清洁；
- 5.导轨、丝杆、螺母与轴孔部分等传动部件，应当保持良好的润滑。因此必要时要使用精密仪表油润滑；
- 6.在使用时应避免强旋、硬扳等情况，合理恰当的调整部件；
- 7.避免划伤或腐蚀导轨面丝杆，保持其不失油；
- 8.应避免在温度变化大、有风、潮湿的环境下使用，否则检测结果将受到很大影响；

(3) 传感器使用注意事项

- 1.传感器不宜安装在阳光直射处、温度高、可能会结霜处、有腐蚀性气体处；
- 2.连接导线不要和电力线、动力线使用同一配线管或者配线槽，或者使用屏蔽线；
- 3.连接导线不能过细，长度不能过长；
- 4.接通电源后要等待一定时间才能进行检测。

十、如何选择合适的产品

虽然将所有平坦度、TWD 和 RWD 指定为规范的一部分可能很诱人，但请务必确保未指定功能上不相关的参数，因为这会不必要地增加成本。

以下是有关何时指定 TWD 和/或 RWD 的一些准则：

- 在正常（0度）入射角下使用的滤光片：
- 典型应用：成像
- 在这些光学设计中，对于几乎所有情况，仅使用透射波长，所有其他光都可以被认为是“阻挡”的（而不是反射，即使这是实现阻挡的方式）
- 不应指定RWD（反射光未恢复）
- 如果保留透射光的波前或方向对应用很重要，则应指定TWD

•在非正常（通常为 45 度，但任何值>0）入射角下使用的滤镜：

- 典型应用：多波长成像、光束控制

- 在这些光学设计中，通常同时使用透射波长和反射波长（或者在镜子的情况下仅使用反射波长）
- 如果要恢复/使用反射光，则应指定RWD
- 在分束器的情况下，如果保留波前或透射光的方向对应用很重要，则应指定TWD

参考文献

- [1]<https://www.omegafilters.com/sites/default/files/202106/-Wavefront%20Tech%20Note%20Final.pdf>
- [2]https://www.iridian.ca/learning_center/how-to-specify-surface-figure-and-wavefront-distortion-for-multi-layer-optical-filters-dup/
- [3]<https://mall.pantsiao.com/entry/6>
- [4]<https://baike.baidu.com/item/%E5%B9%B2%E6%B6%89%E6%B5%8B%E9%87%8F%E6%9C%AF/16843349>
- [5]王平，田伟，王汝冬，王立朋。支撑应力对光刻透镜透射波前畸变的影响.《中国光学》2013.



有什么问题请联系我们的
技术工程师，在线为
您解答



了解更多资讯，请关
注我们的公众号--上海
芯飞睿科技有限公司

