

芯飞睿技术参数十问 系列

反射率R

反射率R

一、什么是反射/透过光谱

光谱是光与物质相互作用的结果。当光照射到一个界面会发生反射、透射或吸收，不同波长的光会产生不同程度的反射或透射以及吸收损耗。于是，不同波长的光通过同一界面的作用，在接收端就会接收到不同的光的强弱信号。将这些不同的波长下接收到的光的信息绘制成谱线，即我们通常所说的光谱。研究反射光线随波长的变化曲线称为反射光谱；研究透射光线随波长的变化曲线称为透射（透过）光谱。（Crylink规格表中一般使用反射光谱作为表征，故下述举例一般都为反射光谱。）

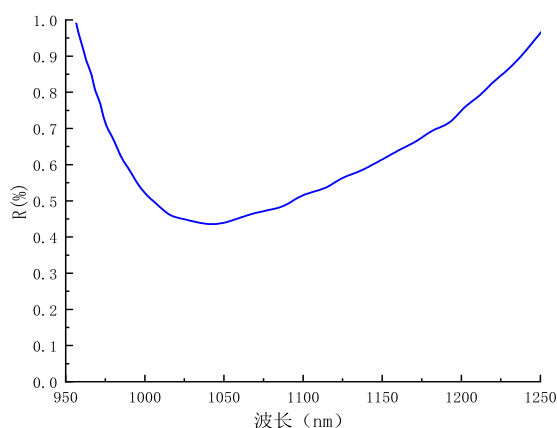


图1a.反射光谱图两种形式之一某增透膜的反射光谱

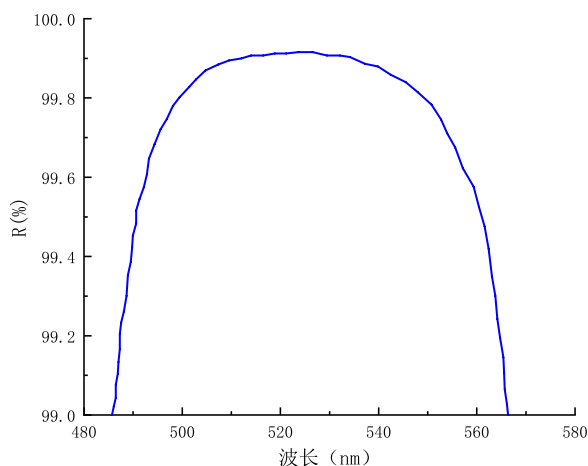


图1b.反射光谱图两种形式之一某增反膜的反射光谱

二、为什么需要反射/透过光谱

首先，光谱图比起参数表更加直观且能从图中获取很多信息。

- 1.我们能从光谱图上直接读出一定范围内每一个波长的反射率/透过率；
 - 2.我们能看出一个膜层的反射率/透过率的峰值和峰值波长，这对于我们选择窄带激光窗口片等起关键作用；
 - 3.对于宽带应用，我们可以看到膜层作用的波长范围以及是否稳定平坦；
 - 4.通过多光谱在同一坐标系下的绘制，我们可以直接从图中看出膜层的优劣等。
- 除此之外，还有一些特殊的光谱图例如偏振光反射光谱或将通过反射光谱和透过光谱获得的信息进行一定的处理，还能进而获得膜层下的群色散（GD）、群色散延迟（GDD）和吸收损耗等信息。我们将在之后的专题中详细说明。

三、反射/透过光谱图怎么看

反射/透过光谱代表反射率/透过率随波长的变化规律。所以一般情况下，反射/透过光谱图都是以“波长”作为横坐标，以“反射率/透过率”作为其纵坐标。需要注意一点，在不同坐标系下，将谱线形状直接对比是没有意义的。

光谱曲线是我们能看到最直观的光谱信息表达形式。以下举了三个例子来说明如何从光谱图上直接读到信息。

1、简单的宽带平坦光谱曲线

此类光谱曲线十分简单明了，但是最为典型。我们可以看出谱线的线型呈现倒U状，顶部极其平坦。如图2的标注我们可以看到该曲线的顶点的坐标在（536，99.997）附近。说明该曲线的峰值，即反射率的最大值在99.997%左右，峰值波长在536nm附近。但是对于一个宽带光谱来说，比起单点峰值，我们更应该关注一定波长范围内的反射率值。假定框选500-560nm波长范围，我们可以清楚地看到，该段光谱曲线全部位于99.99%以上。由数据可以看出该层膜十分适用于500-560nm内绿光的高反且要求稳定的应用场合。

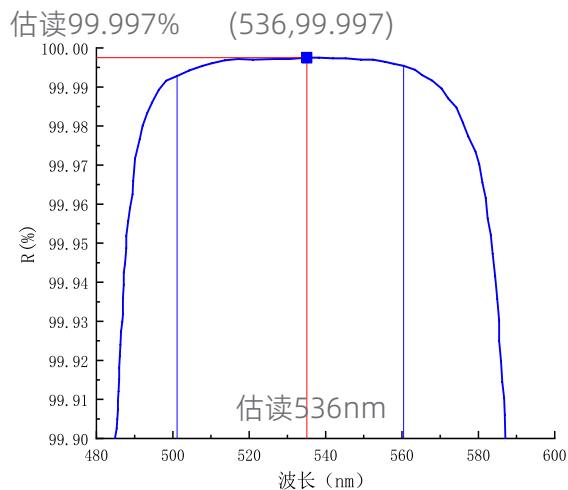


图2 简单的宽带平坦光谱曲线

2、多条含小起伏的光谱曲线

有些光谱曲线并不如图2那样直接，如图3所示。图3包含两条曲线，从图3的中心我们可以看出黑线为0°入射，蓝线为5°入射（AOI = Angle Of Incidence）。通过图像可以发现两条曲线近乎重叠，由此可以推断在小角度入射角变化下，光谱与入射角近似不相关。所以此类膜系可适用于小角度斜入射的光学应用。

再从单条曲线，如黑线，与图2曲线相比显得不是那么平坦。但从图中我们依旧可以看出，495-570nm范围内反射率小于等于1.3%；500-570nm范围内反射率小于等于0.7%；525-565nm范围内反射率低至0.4%以下。从哪个范围读数据需要根据实际应用，若客户需求应用于532nm的大于99%透过率的镀膜，该光谱图所对应的产品就能很好地满足需求。故光谱图能做到辅助个性化的选择。

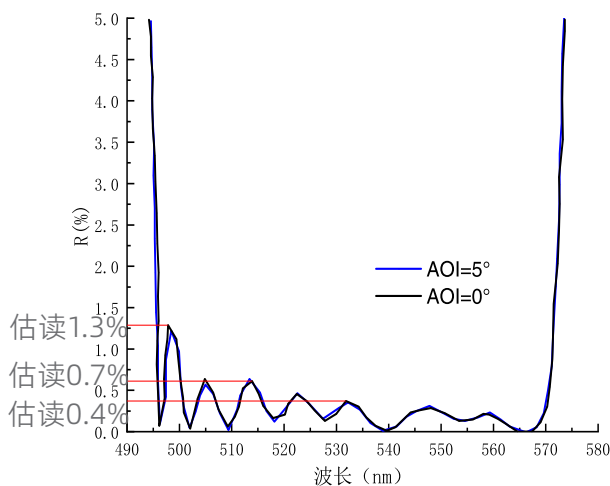


图3 多条含小起伏的光谱曲线

3、大起伏有明显峰值的光谱曲线

有部分光谱曲线并不适用于宽带的应用场景，它们普遍有较窄的稳定范围，较大的起伏和明显的峰值，如图4所示。该光谱曲线有两个明显的特征点，分别位于808nm和1064nm附近。此两点的反射率近乎接近于0，即有极高的透过率。所以该光谱所代表的膜层可很好地应用于808nm和1064nm的窄带高透过应用如分光镜。

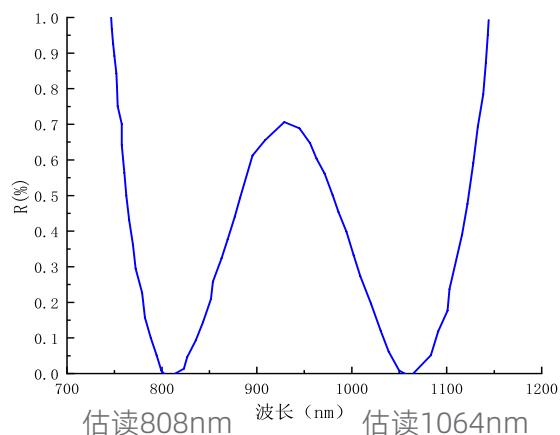


图4 大起伏有明显峰值的光谱曲线

四、增透膜和增反膜的光谱图的区别是什么

光线照射到一个界面产生反射、透射和吸收，根据能量守恒定律，入射光=反射光+透射光+吸收损耗。反射率R和透射率T分别为反射光和透射光相较于入射光的比值，吸收率A为吸收损耗相较于入射光的比值，故可以得出 $R=1-T-A$ 。若已知增透膜的吸收损耗为0或接近于0，增透膜的透过光谱同样可以用反射光谱来表示（需要注意的是，透射光谱并不能完全使用反射光谱做替代，若做相关实验，仍需要考虑吸收的影响，后续会有专题对吸收损耗做详细说明）。Crylink的规格表中增透膜（AR膜）和增反膜（HR膜）基本统一使用反射光谱作为呈现指标。增透膜的反射光谱一般呈现正U的形状，增反膜的反射光谱一般呈现倒U的形状，如前图1所示。增反膜的反射光谱曲线数值越大反射率越大，质量越好；增透膜的反射光谱曲线数值越小透过率越大（假设吸收极小），质量越好。

五、相关关键术语是什么意思

1、反射率 (reflection)：

反射率是一个参数，用于描述传输介质中的阻抗不连续性反射了多少波。我们将从界面反射功率与入射功率的分数称为反射率（或功率反射系数）R。

反射率取决于光的波长，入射光和反射光的方向，光的偏振，材料的类型（金属，塑料等），材料的化学成分和结构，以及材料及其表面的状态（温度，表面粗糙度，氧化和污染程度）等。

2、透过率 (transmittance) :

我们将折射到第二介质中的透过功率与入射功率的分数称为透过率（或透射率、功率传输系数）T。

透过率取决因素和反射率类似，此处不再做额外赘述。

3、峰值 (peak) :

变化波形上的最高点/最低点（对于反射光谱，增反膜看最高点和增透膜看最低点）。

4、峰值波长 (peak wavelength) :

在反射光谱中，峰值波长是达到反射率最大值的单一波长。通常峰值波长会被当做特定设计波长(DWL)。

5、带宽 (bandwidth) :

带宽是一个波长范围，用于表示频谱中入射能量透过或反射在光学元件界面的特定部分。带宽又称为半高全宽（一般用于滤波元件中）。

6、半高全宽 (FWHM) :

半高全宽描述光学元件传输的频谱带宽。该带宽的上限和下限是在达到反射率/透过率的50%时的波长下定义的。10nm或更低的半高全宽被认为是窄带，通常用于激光净化和化学检测；25-50nm的半高全宽经常用于机器视觉应用；超过50nm的半高全宽被认为是宽带，通常用于荧光显微镜应用。

7、波长范围 (wavelength range) :

波长范围用来描述一个波长到另一个波长中间的值。光学元件的选取通常依赖于客户所需的波长范围的应用。

六、光谱怎样测试更准确

反射光谱的测试一般有两种方法：

1、直接光谱法

直接光谱法即直接使用商用光谱仪（分光光度计）进行测试。该测试较为简单，不需要复杂的设备做支持。但光谱仪的绝对准确度为0.2%，导致该方法很难做到较高的分辨率，无法做到对反射率大于99.5%的膜层的准确测试。

2、光腔衰荡光谱法

大于99.5%的膜层必须使用分辨率更高更准确的光谱测试方法，如光腔衰荡光谱法。该方法是一种高精度的绝对测量方法，高反射率和透过率值在99.5-99.9999%的范围内是由空腔衰荡时间测量确定的。误差范围通过此方法可以做到极小，例如 $R=99.995\% \pm 0.001\%$ 。

对高反射率的激光反射镜必须使用合适的测量技术以减少测试值与实际值的误差。测试值和实际值之间的这种差异可能导致性能下降、安全问题，甚至灾难性的系统损坏。下一节会对光腔衰荡光谱测试做更具体的说明，如果对这部分内容感兴趣，可以持续关注。

七、反射率/透过率的高低对光学元件的使用有什么影响

1、高反射率提高激光腔镜功率和质量

在激光腔镜的应用过程中，反射镜的反射率的提高可以减少不必要的能量损耗，由此提高激光器的输出功率。同时还可以减小腔镜的热畸变,改善激光光束的质量。

2、高透过率提高探测、检测仪器分辨率

某些仪器对精确度要求极高，例如医疗、科研，商用领域也越来越强调分辨率这一关键指标。光学元件出光面的透射率影响一次出光率与出光量,进而可以影响探测器的时间分辨率以改善仪器的分辨率。

3、低反射率、高透过率提高仪器的保护利用

在光学元件的使用中，过量的反射激光会降低通量，可能会造成激光诱导损伤和鬼影（通常为散焦）造成的危害。在光学元件表面镀增透膜以提高透过率，可以提高系统的通量，减少过量反射激光的损害。增透膜镀膜对包含多个透射光学元件的系统尤为重要。许多低光系统采用增透膜光学，以便有效地利用光线。

4、低反射率、高透过率增强成像仪器的成像质量

以望远镜系统举例，反射光不但会造成能量的损失以至于成像变暗，还会多次反射，部分穿透目镜进入眼睛，导致成像的对比度降低，雾感明显。高增透膜应用于天文、军事领域，或一些专业领域（例如摄像），能很大程度上对成像做到改善。

八、为什么选择的镀膜元件没有起到作用

1、波长范围是否选对

光学元件一般都不是全波长适用的，特别是镀膜后，会呈现出不同特性。如532nm高反射光学元件在1064nm处并不一定会呈现高反射特性。

2、带宽是否合适

固定波长的激光器腔镜或检测设备等只需要一个固定波长的窄带极高反射/透过，而成像仪器一般会要求可见光范围内为宽带高透过。



3、反射光谱的测试数据是否正确

若元件没有起到应有的作用可以先查看元件的官方光谱图，查看是否在自己设备应用范围内有较好的反射/透过率。若没有问题可以对元件进行光谱的测试与官方数据进行对比，若有出入可以结合数据分析是否有元件本身的损坏或膜层的破坏，可以寻求官方技术人员的帮助。若依旧没有问题，可以将目光聚焦到自己设备的应用和测试。

九、有哪些典型增反膜的反射光谱

1、金属膜的反射光谱

金属材料的导电性导致折射率为复数，使其在很宽的波长范围内虚部很大。这就使得金属材料产生了对波长不敏感的高反射率，可以应用于很宽的光谱范围。金属膜层通常由银、金或者铝制成，相对较软。因而容易损坏，清洁时必须特别小心。注意，金属膜应用于高功率激光系统也容易造成损坏。

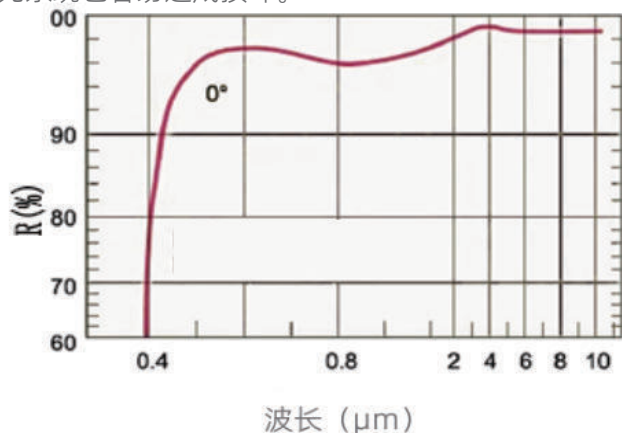


图5 具有宽带反射率的银反射镜的反射光谱

2、电介质膜的反射光谱

电介质膜层相较于金属膜层更耐用，更易于清洁，且损伤阈值更高。然而，因为其色散作用的影响且电解质膜层的折射率主要是实部，导致它的反射光谱较窄，通常用于可见（VIS）和近红外（NIR）光谱区域。电解质膜与金属膜相比，其能够在某些光谱范围内提供更高的反射率，并可提供定制的光谱响应。

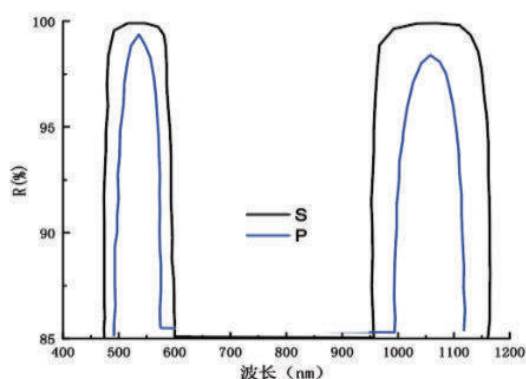


图6 两个窄反射带的电介质膜激光线反射镜（偏振）反射光谱

十、有哪些典型增透膜的反射光谱

1、V型增透膜的反射光谱

V型增透膜的设计目的是增强在设定波长(DWL)下的窄波段的透射率。其在反射光谱上的最小值即为设定波长。V型增透膜是单频窄带线激光器或窄带宽光源的获得最大透射率的理想膜层。V型增透膜在设定波长应用时的反射率一般小于0.25%。但是，应注意，在设定波长之外的局部反射率会急剧增大。

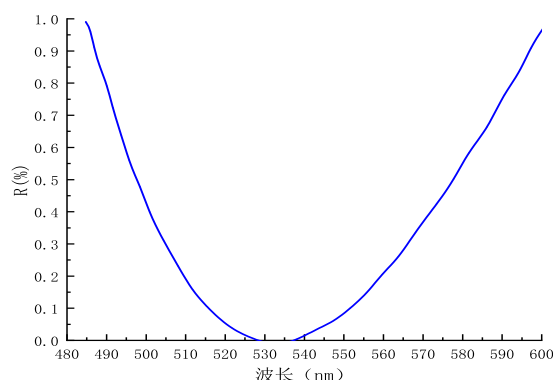


图7 在532nm处获得最小反射率的V型增透膜反射光谱

2、多层增透膜的反射光谱

V型镀膜通常只包含两层镀膜，若希望获得较宽的透射范围，可以选择多层镀膜。多层镀膜可以补偿不同的入射角，但他们更加复杂，成本较高。

参考文献

- [1] 袁波, 杨青. 光谱技术及应用[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2019
- [2] Reflection coefficient. https://en.wikipedia.org/wiki/Reflection_coefficient, 2021
- [3] Optical Filters. <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/optical-filters>, 2021
- [4] 反射镜. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/382741025>, 2021



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

