

测量光学滤光片的光谱

Prashant Prabhat, Ph.D

Turan Erdogan, Ph.D

索引

1. 介绍	1
2. 测量滤光片光谱的方法	1
3. 传统测量方法的局限性	2
4. 增强的陡深边缘的测量技术局限性	3
5. 非常高光密度的测量	5
6. 结语	6
参考文献	7
作者	7
致谢	7

1.介绍

光学滤光片在实现各应用的过程中发挥着重要的作用，如荧光显微镜和拉曼光谱仪。在这些应用中，存在两种不同类型的光束：照明（或激发）光束和信号（或发射）光束。这些光束不仅在光束上不同，其强度也明显不同：信号光束可比照明光束若数百万倍（甚至更高）。因此，关键的是滤光片能够选择性地透过所需波长的光，同时也能阻断不必要的光线。这类滤光片的性能由其光谱特性决定，包括信号的透过效率以及照明光和不需要的发射波长的阻断。特别是，在非常短的波长范围内滤光片要从深过阻断度到高透过率是非常关键的，也就是陡率和很深的光谱边缘。但是，由于标准测量技术的局限性，经常无法准确地测定薄膜干涉滤光片的光谱特性，尤其是当有陡深的边缘时更难准确测定。因此，在未通过反复试验法对滤光片进行试验的情况下，很难确保达到足够的系统级性能。

本文，我们将探索通过标准测量技术精确测量频谱的限制，介绍如何通过更好地理解这些限制以及在必要时进行更复杂的测量，从而达到控制这些限制的目的。

2.测量滤光片光谱的传统方法

众所周知，为了有效抑制不必要的光，滤光片的阻断参数通常比透过高多个数量级。光密度（或通常被称为 OD），用于描述通过高阻断率的滤光片或透过率极低的滤光片的透过光线。OD 简单地定义为透过率对数（底为 10）的负值，透过率在 0 和 1 之间变化，即表明 $OD = -\log_{10}(T)$ 。

滤光片的实际阻断率不仅由其设计光谱决定，还由滤光片的物理缺陷决定，例如：在薄膜涂覆过程中产生的小孔，污垢和其它表面缺陷，或者在滤光片安装过程中产生的瑕疵。不考虑滤光片光谱的设计阻断级，小孔可以使光线畅通无阻地穿阻断光片：一个 10 微米的小孔（完全穿透涂层）将对阻断 10 毫米直径的光束起到限制作用，且 OD 最多为 6。其它的表面和安装缺陷可导致光散射，这种情况下，散射光将“漏过”滤光片，或者是通过边缘或底座附近未阻塞路径穿过，由于散射光的在高入射角情况下光谱将向高透过区域发生偏移，因此，在将滤光片完全制成成品之前，评估其阻断性能是十分重要的。

一般情况下，市场上出售的分光光度计用于测量滤光片的透过速率和 OD 光谱性能。但是，当滤光片具有高边缘陡度和/或非常深的阻断率时，这些仪器具有非常大的局限性。

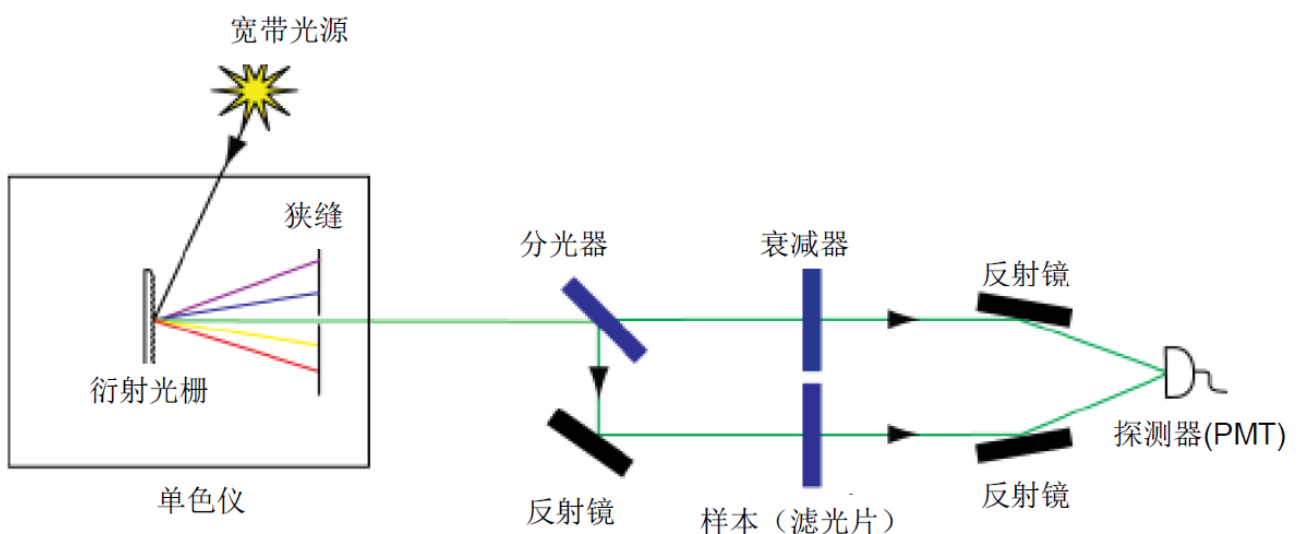


图 1 中示出了普通分光光度计的操作原理。单色仪包含有衍射光栅，用于将来自宽带光源（通常是石英钨卤（QTH）或弧灯）的光分散成不同角度的光线，然后使用可调节的狭缝选择窄带波长。之后，该准单色探测光束将直接射向样本（测试）滤光片。在双光束分光光度计（如图所示）中，可以使用分光器将探测

光束分成参考光束和测量光束，或者以相对较高的速率将光线在参考路径和测量路径之间及时切换。参考光束直接进入探测器，然而，对于校准的中性密度滤光片，光束可能会变弱，这取决于样本滤光片的阻断级。所述的测量光束穿过样本滤光片后，照射在检测器上。可通过在很宽的范围内扫描波长时来自两个光束的信号比来确定滤光片的光谱，或作为波长功能的透过（或阻断）参数。该光谱也可以从单光束分光光度计获得，除了以下这种情况：无样本滤光片时在光路中产生了参考信号，然后通过将样本滤光片插入光路产生了测量信号（如下图 4 所示）。

在实际的分光光度计中，还需要一个更复杂的光学和电子系统，以避免因对准问题、组件不完善、散射光和其它光学和电子噪音源造成的测量误差。尽管有这种先进的仪器可用，但无法通过这些分光光度计，准确地测量具有陡峭边缘和/或深阻断率的高性能滤光片的关键特性。

3. 传统测量方法的局限性

传统分光光度计的灵敏度有限，并且探测光束并非完全单色。由于存在这些局限，实际的滤光片光谱及其测量结果之间存在三大差异。第一个差异是锐利角度的光谱特征的“圆形钝角”（如图 2）。这种效应主要是由于分光光度计探测光束的非零带宽造成的。最小带宽受狭缝宽度和光栅周期数量的限制：衍射光栅区域（每毫米给定的光线数量）越大，则分辨率越高。对于给定的 $f/\#$ （锥角），光栅区域越大，路径长度也越长，因此需要更大的仪器。分辨率也可通过减小狭缝宽度的方式增大，但是较窄的狭缝将减少通过单色仪进入探测器的光的数量，从而降低灵敏度。

第二个测量差异是由于分光光度计的灵敏度有限造成的。当滤光片 OD 较高（如 OD 大于 6）时，只有极少的光线能达到探测器，并且探测器上的光学和电子噪音限制了能准确测量的最低信号。其识别区是一个平的噪声光谱，似乎是“固定”为某一 OD 值，尽管实际滤光片 OD 可远高于测量体现值。此信号限制通常称为本底噪声，是波长依赖的，随着光源的不同和探测器的响应光谱而变化。需要注意的是，可以通过打开单色仪狭缝并让更多的光线通过系统，从而降低本底噪声，这样就可以测量到更大的 OD 值，但是这样做虽然增加了灵敏度却降低了光谱分辨率。

第三个差异比较独特，是测量从高阻断率到高透过率的非常深的过渡，称为“边带测量假象”（见图 3）。当显示为 OD 值的曲线时，通常在边缘谱线的中体现为“弯曲”的形式，发生在 OD 约为 2.5~4.5 的范围内，具体取决于分光光度计和波长。这个测量假象来自于以下因素，除了非零带宽的探测光束，还包括非单色探测光束，在带宽范围外的波长上，它还具有微弱的边带（主要来自光栅上的瑕疵）。当探测光束定位于深边缘的波长上，探测波长上一侧的边带噪音通阻断光片在其通带内透过，因此，在探测器上记录到较大信号并导致测得较低的 OD 值。这是测量结果就显示出不是以 OD 级递减的假象。在商用仪器中，除非添加额外的滤光片，几乎没有能够减少这种边带的问题（见下文第 4 部分）

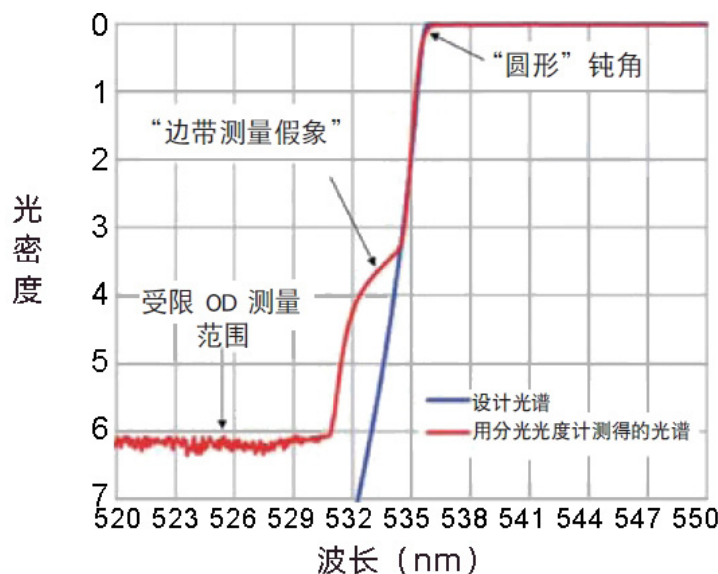


图 2: Semrock LP03-532RU- 25 RazorEdge 滤光片设计光谱和测量光谱的示例。使用商业分光光度计

当试图评估用于拟定应用的滤光片性能时，传统分光光度计中的测量差异将导致严重问题。例如，如图 2 所示的滤光片主要用作拉曼光谱应用中的瑞利滤光片，其主要目的是阻断的 532.0nm 激光谱线(>OD 6)，同时透过非常接近激光谱线的 Stokes-shift 拉曼信号。但是，由于测量差异（这种情况下，主要是边带差异），不可能立即通过观看图示确定滤光片是否在 532.0 纳米时达到 OD>6。然而，通过充分理解和表征分光光度计的限制，有可能推断出滤光片的实际性能。例如，由于可以看出精确设计的薄膜层结构中不存在合理扰动从而导致边带假象的光谱特征，因此，可通过从较低 OD 值推测曲线和使用设计曲线作为限制指南，从而确定边缘光谱，其中 OD 值大于“弯曲”值。

但是，分光光度计光学系统也可以通过改善商用仪器或开发完全定制的分光光度计得到改善，从而让测量尽可能的更好地接近真实值。Semrock 使用各种方法进行最准确的光谱测量，特定滤光片或应用都需要这种测量。

4. 增强的陡深边缘的测量技术

Semrock 采用不同的测量方法，评估制造周期内不同阶段的不同滤光片，以改变其精度。例如，图 3 显示出了 RazorEdge 的“E 级”陡缘的五种测定光谱，确保了能阻断 532nm、OD>6 的激光谱线，以及在 0.5%的激光波长范围内（到 534.7nm 为止）过渡到高透过。测得的光谱重叠在滤光片（蓝线）的设计光谱上。如图中所观察到的，选择特定的测量仪器和技术对滤光片的测得光谱有较大的影响。下面突出显示了各技术间的主要差别。

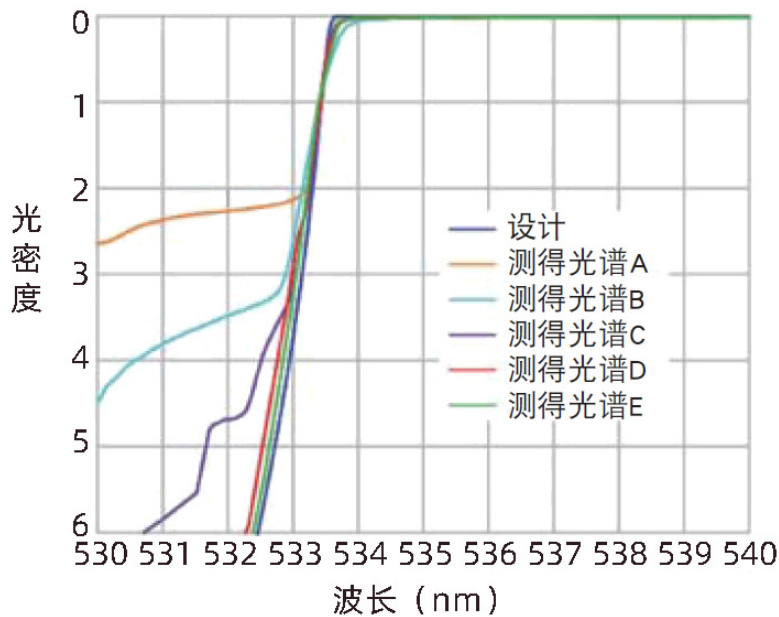


图3: Semrock LP03-532RE- 25 RazorEdge 滤光片设计和测定光谱的示例。
测量是使用商用和用户自制的分光光度计得到，仪器的设置参见本文中描述

图 3 中所述的测量方法“A”是采用用户自制的分光光度计（下文中有更详细的描述）来实现的。该测量使用诸如短的探测器整合时间和低分辨率的仪器设置，优化后可快速地从大量样本滤光片中收集数据。它主要用于定位边缘位置，以致能精确列出来自薄膜涂层的完整滤光片组的光谱均匀性。在薄膜滤光片的制造过程中，对薄膜沉积机进行持续的均匀性调整以及品质保证过程都是非常重要的环节。虽然这种技术速度很快，但选择这种设置的结果就是灵敏性差和分辨率低，如图中所示，本底噪音略高于 OD 2。

测量方法“B”采用标准的商用分光光度计（Perkin Elmer Lambda 900 系列），其基本的操作规则如第 2 部分所述。与用于生成图 2 中所示频谱图的测量基本相同。因此，实际滤光片光谱与第 3 部分所述的测得光谱之间的差别非常明显：分辨率有限，导致鲜明特征的“圆形钝角”；灵敏性有限，导致 OD 本底噪音（图中不可见，因为本底噪音仅在波长小于图中所示程度时才明显），“边带假象”导致 OD

约 3.5 的“弯曲”，以及边缘陡度突然地明显减小。需要注意的是，图 3 中所示的滤光片比图 2 中所示的要陡两倍，因此，图 3 中所示的差异比图 2 中所示的要更明显。2. 例如第 3 部分所述，需要再次注意的是，当试图评估滤光片用于预期应用的性能时，所述局限性将导致严重的问题：使用这种测量方法并不能立即见效，在 532.0 纳米时滤光片的 OD 阻断达到 6 以上。

测量方法 C 和 D 采用与方法 A 相同的定制分光光度计。该分光光度计的基本操作原则如图 4 所示。该仪器与标准商用分光光度计之间的主要差别在于：定制系统的检测是通过一个低噪声 CMOS 摄像头完成的，该摄像头能同时测量一系列的波长，而不是在扫描光栅角度时顺序地测量各波长数据点。此方法的主要优势是，在给定的分辨率和给定集成时间（导致本底噪声）的情况下，可以更迅速地进行宽频带测量。有人可能会问，既然它具有显著的速度优势，为什么不将该操作原理用于所有的分光光度计？需要注意的是，定制分光光度计的方法需要宽带光源照射的测试样本，以便探测器阵列能同时捕获一大批波长。当测试样本是玻璃滤光片时，使用宽带光源照明不会造成任何重大问题，但如果样本发出明显的自发荧光则会出现问题；例如，通过这种样本，只会对透过的精确测量产生干扰。由于商业分光光度计设计用于各种可能的测试样本，包括对宽带照明非常敏感或会发出自发荧光，因此，最好是通过这些仪器的准单色光探测样本。

在使用测试滤光片（参见图 4 中的滤光轮）之前，定制分光光度计应使用一些额外的滤过步骤，以消除下游光栅中不必要的杂散光的和高阶衍射光。透过测试滤光片的光线通过双单色仪，使用带有紫外线增强的制冷 CMOS 摄像头且收集光线。

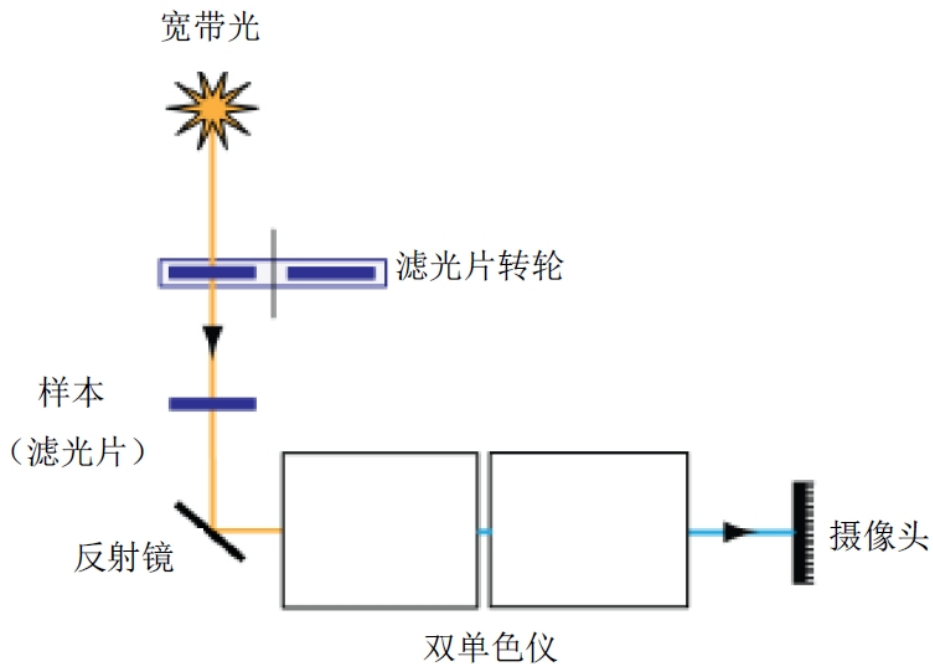


图 4: 基于测试滤光片宽带照明和通过探测器阵列同时收集大批波长的定制分光光度计的基本布局采用此方法，可以在给定的本底噪音和分辨率的情况下更快速地测量。

测量方法 C 利用仪器设置（主要是集成时间和分辨率），提供准确的陡深缘测量，包括 533.5 纳米时的“锐角”。该测量方法比得上通过市售分光光度计（方法 B）的测量法或比后者更佳，且耗时更短。但是，需要注意的是，“边带测量假象”仍然明显，表现为突然“弯曲”，或边缘陡度明显减小，OD 约为 4.5。在样本滤光片之前和/或之后，对样本滤光片通带内的波长进行额外滤过的处理，可基本消除边带假象问题，从而防止光被光栅缺陷衍射成与受滤光片高度阻断的波长相关联的像素。测量方法 D 是对方法 C 的修改，其应用了所述额外阻断。通过图 3 中将测量方法“D”与蓝色设计曲线比较可以看出，尽管在开始于 OD 2.5 的边缘处仍存在轻微的“弯曲”，但边带假象可基本消除。然而，其差别仍然非常小，小于 1OD，甚至非常高的 OD 值。

为了进一步消除边带假象，测量方法 E 通过仔细阻断的 532nm 激光器和滤光片自身的角度调谐，提供了非常精确的测量结果。所述激光器为固态的二极管泵浦倍频 Nd:YAG 激光器。窄带滤光片用于消除紧邻 532 nm 激光谱线的激光噪声；而宽带滤光片用于消除激光器发出的非相邻光线，如基本的 1064nm 输出。还采用了可调的滤光片和低噪声探测器（内置到 ANDO AQ6315A 光谱分析仪）。可在

滤光片激光的入射角范围内采集该测量数据，然后这些数据通过基于薄膜涂层机构的理论模型，从透过与角度关系转变为透过与波长的关系。显然，这种测量方法最接近实际的设计曲线，并且我们相信，这也是测量边缘非常陡深的滤光片最准确的方法。但是，此方法的缺点包括需要在待测滤光片边缘波长上设置一个精确的高单色激光器，且至少目前光学实验室的工程师在使用这种需要细心且耗时的测量方法，而不是适合大批量滤光片品质保证的生产环境法。

5. 非常高光密度的测量

对于一些滤光片和应用，边缘陡度并不高，这对其性能并不重要，对特定波长或波长范围内的阻断级也不重要。例如，在荧光成像系统中，荧光的吸收和发射光谱可相隔足够远，以致光通量不受激发和发射带通滤光片的限制，但是仍然关键的是激发片可在发射片的带宽上实现高阻断率，从而达到适合的信噪比。这种滤光片可设计成数十种 OD 阻断，但实际上，即使光涂层或底座上最细微的物理瑕疵，以及系统级杂散光的控制缺陷，都可能将 OD 约为 6 范围内的阻断值限制到 10。鉴于标准的分光光度计由于第 3 部分介绍的本底噪音而具有有限的 OD 测量范围，如何才能准确地确定较高的阻断级呢？

能确保较高 OD 值（OD 达 8 甚至 9）的生产兼容的简单技术被称为“互不阻断法”。该方法的基本原理如图 5 所示。来自 QTH 或电弧灯的约为平行的宽带光束通过本质上为带通滤光片的参考滤光片进行阻断，其通带重叠在测试滤光片光谱区域上，该测试滤光片需要较高的 OD 测量。

透射光被聚焦到一个低噪声探测器上，该探测器能测量非常小的亮度级，例如：带低噪放大电路或光电倍增管（PMT）的大面积光电二极管。测量过程如下：首先，只能通过参考滤光片和光路中校准的中性密度（ND）滤光片记录探测器上的信号强度。典型的 ND 滤光片选择约 3 个。ND 滤光片用于将探测器的光亮级降低一个校准量，以便可通过实际探测器实现的有限动态范围向下偏置，从而在滤光片 OD 为 8 或 9 时刻通过探测器探测信号级。换句话说，就是采用 ND 3 滤光片后，探测器的动态范围需要仅为 106 到 OD 9 阻断。在下一测量步骤中，从光路中取下 ND 滤光片，并采用测试滤光片替换。这些测量的比值给出了参考滤光片（在删除校准的 ND 值后）光谱范围内的测试滤光片 OD。为了实现高达 8 或 9 的 OD 级并确保测量精度，至关重要是测量设置完全隔绝环境光，以及最少化达到探测器的散射光和其它杂散光。

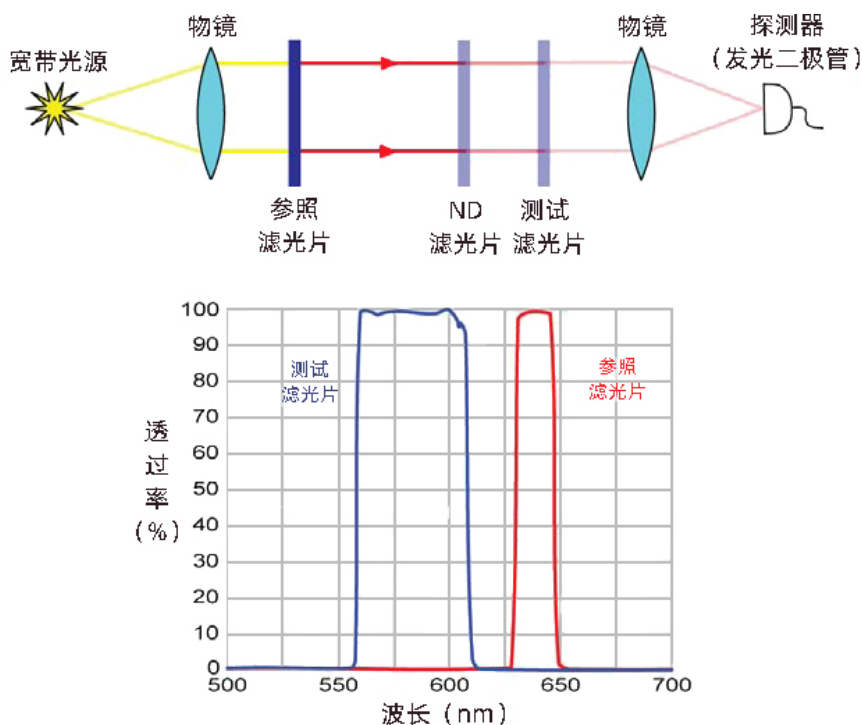


图 5：非常高的 OD 值测量
参考滤光片覆盖了波长的范围，其中必须通过该波长范围在测试滤光片中验证高 OD。

有人可能会认为，测试滤光片不同阻断区域的 OD 级测量需要不同的滤光片和多次测量。然而，值得注意的是，物理缺陷会减小 OD（使之小于设计值），此物理缺陷在每个给定的阻挡光镀层波长上就有上述类似作用。因此，如果可证明不存在任何阻断率减小的缺陷，也就是说 OD 8 是一个波长区域，那么阻断率同样不会降低到其它被相同涂层阻断的波长的此值以下。因此，一般情况下，各测试滤光片只需一个参考滤光片和一次测量。

6. 结语

总之，重要的是要了解用于生成滤光片光谱的测量技术，因为这些技术并不完美。采用适当的测量方法测定给定的滤光片或应用可减少误差，以及对使用滤光片的实验和系统进行过度设计，从而提高性能和效果，并降低滤光片成本。

参考文献:

1. T. Erdogan, "Optical Filters: Construction of Optical Filters," Semrock White Paper Series, www.semrock.com.
2. "Practical Flatness," Semrock Tech Note, <https://www.semrock.com/Data/Sites/1/semrockpdfs/idx2395-smkpractical-flatnesstechnote-fin.pdf>
3. T. Erdogan, "Optical Filters: Flatness," Semrock Presentation, <https://www.semrock.com/Data/Sites/1/semrockpdfs/flatness.pdf>, 2011.
4. B. Light, "Role of Surface Roughness In Optical Performance," Optimax Systems, <http://www.optimaxsi.com/wp-content/uploads/2015/06/SurfaceRoughnessRevA2.pdf>.
5. "Laser Damage Threshold," Semrock Resource, <https://www.semrock.com/laser-damage-threshold.aspx>.
6. "Laser Damage Threshold Calculator," Semrock Resource, <https://www.semrock.com/ldt-calculator.aspx>.
7. N. Anderson, L. Wang, and T. Erdogan, "IBS Coatings for Ultrafast Lasers and Applications," Semrock White Paper, <https://www.semrock.com/ibs-coatings-for-ultrafast-lasers-and-applications.aspx>, 2012.

作者:

Prashant Prabhat, Ph.D. and Turan Erdogan, Ph.D., Semrock, Inc., A Unit of IDEX Corporation.

E-mail: pprabhat@idexcorp.com;

Tel: (585) 594-7064; Fax: (585) 594-7095

翻译:

Wang Qi

致谢:

Michael Delay, , Ph.D.